

目 录

第一章 名词术语和符号	(1)
1.1 名词术语	(1)
1.2 主要符号说明	(7)
1.3 材料和层压板代号	(9)
参考文献	(10)
第二章 胶 接	(11)
2.1 胶接连接特点	(14)
2.2 胶粘剂	(14)
2.2.1 胶粘剂应具有的性能	(14)
2.2.2 常用的胶粘剂类型	(14)
2.2.3 被胶接件的表面制备	(16)
2.2.4 适宜于粘接不同材料的胶粘剂	(16)
2.2.5 胶层力学特性的测定	(18)
2.3 胶接连接设计	(19)
2.3.1 胶接设计一般原则	(19)
2.3.2 胶接基本破坏模式	(19)
2.3.3 胶接基本连接形式	(20)
2.3.4 胶接连接几何参数选择	(21)
2.3.5 胶接面纤维取向	(22)
2.3.6 温度和湿度影响	(23)
2.3.7 胶接结构的细节设计	(25)
2.4 胶接缺陷及其检测	(29)
2.4.1 缺陷类型及允许值	(29)
2.4.2 缺陷的检测	(31)
2.5 胶接连接的静强度分析	(32)
2.5.1 单搭接连接	(33)
2.5.2 双搭接连接	(37)
2.5.3 阶梯形搭接连接	(43)
2.5.4 斜面搭接连接	(43)
2.6 耐久性设计	(50)
2.6.1 胶粘剂	(50)
2.6.2 被胶接件的表面制备	(50)
2.6.3 密封	(51)

2.6.4	结构细节设计	(51)
2.6.5	复合材料胶接结构耐久性试验	(51)
	参考文献	(55)
第三章	机械连接设计	(56)
3.1	机械连接破坏模式	(56)
3.2	机械连接设计的一般要求	(58)
3.2.1	机械连接几何参数的定义及选择	(58)
3.2.2	机械连接形式及其选择	(59)
3.2.3	紧固件的选用及对拧紧力矩的要求	(60)
3.2.4	连接区的铺层设计	(61)
3.3	影响复合材料机械连接强度的主要因素	(61)
3.3.1	铺层比例	(62)
3.3.2	铺层顺序	(62)
3.3.3	拧紧力矩	(64)
3.3.4	连接形式	(67)
3.3.5	几何参数	(67)
3.3.6	载荷方向	(70)
3.3.7	沉头孔	(71)
3.3.8	湿热环境	(72)
	参考文献	(73)
第四章	机械连接静力分析	(74)
4.1	机械连接钉载分配分析	(75)
4.1.1	单排钉连接	(75)
4.1.2	多排单列钉连接	(75)
4.1.3	多排多列钉规则排列连接	(78)
4.1.4	多钉非规则分布的复杂连接	(78)
4.1.5	钉的柔度	(82)
4.2	机械连接的理论分析方法	(84)
4.2.1	应力计算方法	(84)
4.2.2	破坏载荷计算	(91)
4.3	机械连接的经验方法	(93)
4.3.1	单排钉连接	(94)
4.3.2	多排钉连接	(101)
4.4	多钉规则排列连接工程计算方法	(103)
4.4.1	连接区承载能力计算方法	(103)
4.4.2	实例	(105)
4.4.3	连接区结构参数的选取	(109)
	参考文献	(110)
第五章	螺栓连接强度	(111)

5.1	全碳纤维复合材料螺栓连接强度	(111)
5.1.1	单钉连接强度	(111)
5.1.2	多排钉连接强度	(117)
5.1.3	拉脱强度	(124)
5.2	混杂复合材料螺栓连接强度	(126)
5.2.1	碳-芳纶混杂复合材料螺栓连接强度	(126)
5.2.2	碳-玻璃混杂复合材料螺栓连接强度	(128)
5.3	连接强度校核方法	(129)
5.3.1	单钉连接强度校核	(129)
5.3.2	多排钉连接强度校核	(129)
5.4	连接设计和强度校核举例	(130)
5.4.1	受拉伸载荷连接接头	(130)
5.4.2	受剪切载荷连接接头	(132)
	参考文献	(134)
第六章	铆 接	(135)
6.1	铆接设计	(135)
6.1.1	连接参数的选取	(135)
6.1.2	铆钉的选取	(135)
6.1.3	铆钉连接的层压板铺层设计	(135)
6.1.4	提高拉脱强度的措施	(135)
6.1.5	按规定的铆接工艺方法施工	(136)
6.1.6	可靠的防电位腐蚀措施	(136)
6.1.7	铆接质量控制	(136)
6.2	螺纹抽钉连接强度	(136)
6.3	纯钛铆钉连接强度	(136)
6.4	钛环槽铆钉连接强度	(137)
6.5	钛铌铆钉连接强度	(137)
	参考文献	(138)
第七章	机械连接的疲劳	(139)
7.1	概述	(139)
7.2	复合材料机械连接疲劳试验方法	(140)
7.2.1	试件及夹具	(140)
7.2.2	试验加载	(140)
7.2.3	试验环境	(140)
7.2.4	孔径变形监控	(140)
7.2.5	条件疲劳极限	(141)
7.3	影响机械连接疲劳的因素	(141)
7.3.1	疲劳试验破断与孔永久变形间的关系	(141)
7.3.2	机械连接形式对连接疲劳性能的影响	(142)

7.3.3	拧紧力矩对疲劳性能的影响	(143)
7.3.4	铺层对疲劳性能的影响	(145)
7.3.5	连接几何尺寸对疲劳性能的影响	(147)
7.3.6	干涉配合对疲劳性能的影响	(147)
7.4	室温自然干态下机械连接的疲劳	(148)
7.4.1	等幅拉—拉疲劳的试验结果	(148)
7.4.2	拉—压对称循环等幅疲劳试验结果	(149)
7.4.3	机械连接在载荷谱作用下的疲劳	(150)
7.5	湿热环境下机械连接的疲劳	(152)
7.5.1	飞机复合材料结构的含湿量	(152)
7.5.2	湿热下机械连接的等幅疲劳	(152)
7.5.3	湿热/温载荷谱作用下机械连接的疲劳	(154)
7.6	疲劳后机械连接的剩余强度	(156)
7.6.1	载荷谱作用后机械连接的剩余强度	(156)
7.6.2	湿热/载荷谱作用后机械连接的剩余强度	(156)
7.7	机械连接疲劳失效准则和工程设计建议	(157)
7.7.1	疲劳失效准则	(157)
7.7.2	确定钉孔永久伸长变形限值的依据	(158)
7.7.3	碳—树脂层压板机械连接的工程设计建议	(158)
	参考文献	(159)
第八章	胶铆(螺)混合连接	(160)
8.1	概述	(160)
8.2	胶铆(螺)混合连接强度	(161)
	参考文献	(162)
第九章	特殊连接	(163)
9.1	夹层板结构的特殊连接	(163)
9.1.1	镶嵌件连接形式及示例	(163)
9.1.2	带安装片的盲孔自锁螺母的分析和设计	(173)
9.1.3	镶嵌设计	(177)
9.1.4	夹层板的单面连接	(182)
9.2	层压板的特殊连接	(183)
9.2.1	弹簧夹式游动螺母连接	(183)
9.2.2	快卸承力锁	(184)
	参考文献	(189)
第十章	连接工艺	(190)
10.1	制孔工艺及要求	(190)
10.1.1	制孔专用刀具和工具	(190)
10.1.2	钻孔	(191)
10.1.3	铰孔	(191)

10.1.4	铆窝	(191)
10.1.5	制孔质量验收标准	(192)
10.2	螺接工艺要求	(193)
10.3	铆接工艺要求	(195)
10.4	连接防腐和湿装配	(195)
10.4.1	电偶腐蚀	(195)
10.4.2	防腐和湿装配	(195)
	参考文献	(196)
第十一章	紧固件	(197)
11.1	紧固件选材	(197)
11.1.1	螺栓选材	(197)
11.1.2	铆钉选材	(198)
11.2	适于复合材料结构应用的紧固件	(198)
11.2.1	钛合金螺栓	(200)
11.2.2	钛合金高锁螺栓与 MJ 螺纹高锁螺母	(213)
11.2.3	抗拉型钛合金环槽铆钉	(225)
11.2.4	钛铆钉	(229)
11.2.5	Monogram 公司大底脚螺纹抽钉	(232)
11.2.6	Hi-Shear 公司 6Al-4V 钛合金高锁螺栓	(236)
11.2.7	Cherry 公司双金属铆钉	(242)
11.2.8	Huch 公司单面抽钉	(248)
11.2.9	飞机复合材料结构紧固件的应用情况	(252)
11.3	紧固件验收标准	(253)
11.3.1	材料	(253)
11.3.2	毛坯	(253)
11.3.3	成品制造	(254)
11.3.4	形位公差	(254)
11.3.5	螺纹	(255)
11.3.6	表面缺陷及损伤	(255)
11.3.7	机械性能	(256)
	参考文献	(257)
附录 A	复合材料性能数据	(258)
A.1	概述	(258)
A.2	国内几种复合材料单向层压板主要性能	(261)
A.3	国外几种复合材料单向层压板主要性能	(263)
	参考文献	(266)
附录 B	复合材料力学基础	(267)
B.1	单层应力-应变关系	(267)
B.2	层压板内力-应变关系	(269)

B.3 单层失效准则 (270)

参考文献 (271)

附录 C 开孔应力集中和强度 (272)

C.1 开孔应力集中 (272)

C.2 开孔板强度预示 (275)

参考文献 (278)

第一章 名词术语和符号

本章给出了常用的复合材料术语、各章通用的主要符号说明和层压板的代号。允许各章中使用特有的专用符号,将分别在各章中予以说明。

1.1 名词术语

为了方便使用和查阅,本节的名词术语基本上按分类顺序给出,其分类大致为材料、工艺、性能、力学、强度和设计等。此外,在名词术语后的括号中还给出了对应的英文名称。

复合材料(Composites, Composite Materials)——由两种或两种以上组分相材料组成的材料,各组分相材料基本上仍保持其原来各自的物理和化学性质,彼此间有明显的界面。

先进复合材料(Advanced Composites)——专指可用于主承力结构或次承力结构、刚度 and 强度性能相当于或超过铝合金的复合材料。目前主要指有较高强度和模量的硼纤维、碳纤维和芳纶等增强的复合材料。

碳纤维复合材料(CFRP)——以碳或石墨纤维为增强材料的树脂基复合材料。

芳纶复合材料(KFRP)——以芳纶为增强材料的树脂基复合材料。

玻璃纤维复合材料(GFRP)——以玻璃纤维为增强材料的树脂基复合材料。

硼纤维复合材料(BFRP)——以硼纤维为增强材料的树脂基复合材料。

混杂纤维复合材料(Hybrid Composites)——由两种或两种以上纤维增强同一种基体的复合材料。

短切纤维复合材料(Short Cut Fiber Composites)——以短切纤维而非连续长丝作为增强材料的复合材料。

热固性复合材料(Thermosetting Plastic)——以热固性树脂为基体的复合材料。

热塑性复合材料(Thermoplastics)——以热塑性树脂为基体的复合材料。

增强材料(Reinforcement)——置于基体中能使所形成的复合材料力学性能显著提高的增强相组分材料,如各种高强度、高模量纤维等。

纤维(Fiber)——长丝。

纤维束(Tow, Yarn)——多根纤维组成的丝束,一个纤维束可含有 1000、3000、6000 或 12000 根等不同数量的单丝。

碳纤维(Carbon Fiber)——指将原丝氧化及碳化后制成的纤维,不具有石墨结构。

石墨纤维(Graphite Fiber)——指原丝经氧化、碳化以及石墨化过程而制成的纤维(具有石墨结构)。

(碳或石墨纤维的)原丝(Precursor)——用以制备碳纤维和石墨纤维的聚丙烯腈纤维或沥青纤维。

T300 纤维(T300 Fiber)——日本东丽(Toray)公司生产的一种碳纤维的商品牌号。

E 玻璃纤维(E Glass Fiber)——硼硅酸盐玻璃纤维,由于其高电阻,适于制造电器用层压板。

S 玻璃纤维(S Glass Fiber)——镁铝硅玻璃纤维,有很高的拉伸强度。

芳纶(Aramid)——有机芳香族聚酰胺纤维。

Kevlar 纤维(Kevlar Fiber)——美国杜邦(DuPont)公司生产的一种芳纶纤维的商品名。

基体(Matrix)——将增强材料敛集粘合在一起以形成复合材料的组分相材料。

环氧树脂(Epoxy Resin)——由环氧化合物聚合而成的含有两个或多个环氧基团的一类热固性树脂。

酚醛树脂(Phenolics)——由酚、酚的同系物和衍生物与醛类或酮类缩聚而成的一类树脂。

单向带(Tape)——以长纤维为经向而在纬向加少量且更细的纤维纺织加工成不同宽度的带,浸胶后称为预浸单向带,简称预浸带。

织物(Fabric)——由长纤维按经向、纬向等方向编织而成的一种编织物。

预浸料(Prepreg)——将树脂基体浸涂到纤维或织物上,通过一定的处理后贮存备用的中间材料。

纤维含量(Fiber Content)——复合材料纤维体积或质量所占的百分比。

树脂含量(Resin Content)——复合材料树脂体积或质量所占的百分比。

空隙(Void)——制造过程中留在复合材料制件中的气体所占有的空间。

空隙含量(Void Content)——复合材料制件中空隙体积占制件体积的百分比。

夹杂物(Inclusions)——制造过程中无意间带进制件中的杂质,如颗粒、芯片、薄膜等。

富树脂区(Resin-Rich Area)——复合材料制件中局部树脂较制件平均树脂含量高出较多的区域。

贫树脂区(Resin-Starved Area)——复合材料制件中局部树脂较制件平均树脂含量低出较多的区域。

老化(Ageing)——材料在环境条件下随时间推移而产生的各种不可逆的化学变化,从而引起材料性能变坏的现象。

退化(Degradation)——由老化、腐蚀、疲劳或应力等引起的材料性能上的降低。

龟裂(Crazing)——在复合材料的基体内或组分材料的界面处出现的细微裂纹。

横向裂纹(Transverse Crack)——在层压板等的单向铺层内由横向拉伸应力等引起的基体或界面的开裂,该裂纹通常是最先一层破坏源。

吸湿(Moisture Absorption)——复合材料在环境条件下吸进水分的一种行为。

含湿量(Moisture Content)——也称吸湿量,为复合材料所含水分占其质量的百分比。按下式确定:

$$m = (W_w - W_D) / W_D$$

式中: m ——含湿量;

W_w ——环境暴露下复合材料湿态质量;

W_D ——环境暴露前,复合材料预烘干处理得到的质量。

室温自然干态(Room Temperature Dry)——简称室温干态(RTD),复合材料在试验条件下的自然存放和试验的干燥状态。

玻璃化转变温度(Glass Transition Temperature)——复合材料的刚度和强度开始急剧下降的温度,其值与材料的最高使用温度密切相关。

界面(Interface)——不同组分相复合共存的系统,在各相之间存在着的分界面。

纤维表面处理(Fiber Finishing)——为提高纤维与基体的粘接力,对纤维表面进行物理或化学方法的处理以改变纤维表面的状态。

脱胶(Debond)——由各种因素引起的铺层内、层间或胶接连接间产生分离的现象。

分层(Delamination)——由层间应力或制造缺陷等引起的复合材料铺层之间的脱胶破坏。

固化(Cure)——通过热、光、辐射或化学添加剂等的作用,使热固性树脂经不可逆的化学反应完成交联的过程。

后固化(Postcure)——补充的高温固化,通常不加压,用以完善固化过程,以改善最终性能。

共固化(Cocure)——指不同的复合材料制件在一次固化中同时完成固化和胶接过程的工艺方法。

二次胶接(Secondary Bonding)——指已固化了的不同复合材料制件通过胶粘剂再次进行胶接固化的过程。

残余应力(Residual Stress)——在复合材料中一般指复合材料制件内部由于固化后的降温 and 吸湿等引起的应力。

铺叠(Layup)——制造复合材料制件过程中用手工或机械按一定方向和顺序逐层铺放预浸料的过程。

随炉件(Processing Control Panel)——与制件的材料工艺过程相同,并在同炉固化成形的一种层压板。将其切成试样后可测试某些性能,鉴定制件质量,以便对工艺过程进行监控。

工程常数(Engineering Constants)——对单向及多向层压板进行单轴拉伸、压缩及纯剪试验直接测得的常数,包括拉伸、压缩、剪切弹性模量和泊松比等。

不变量(Invariant)——坐标变换中保持不变的量。

各向同性(Isotropy)——材料性能与方向无关的一种特性。

各向异性(Anisotropy)——材料性能因方向不同而改变的一种特性。

正交各向异性(Orthotropy)——材料具有三个互相垂直的弹性对称平面的特性。这些平面的垂直方向称为材料的主方向。

横向各向同性(Transverse Isotropy)——具有正交各向异性特性的材料,若有一个各向同性的平面时,称其具有横向各向同性。例如单向复合材料即具有此种特性。

正方对称(Square Symmetry)——指铺层面内相对于两个互相垂直的主方向具有相等的刚度和强度的对称形式。

正轴(On-Axis)——与材料主方向重合的参考坐标轴。

偏轴(Off-Axis)——与材料主方向不重合,有一个偏转角 θ 的参考坐标轴。

耦合(Coupling)——一种外力引起与其不对应的基本变形的效应称为耦合。

拉剪耦合(Shear Coupling)——由正应力引起剪应变的一种耦合,是各向异性材料特有的。

拉弯耦合(Stretching-Bending Coupling)——由正应力引起弯曲应变的耦合,也为各向

异性材料所特有。

弯扭耦合(Bending—Twisting Coupling)——由弯矩引起扭转应变的耦合,也为各向异性材料所特有。

宏观力学(Macromechanics)——在复合材料力学中采用层压板理论进行分析的力学。此时在每一铺层内纤维和基体作为一个整体而不再加以区分。

细观力学(Micromechanics)——在复合材料力学中要分别考虑到纤维和基体的性能以及界面的情况,研究它们相互关系并进行分析的力学。

细观—宏观(MIC—MAC)——综合考虑复合材料的细观力学和宏观力学进行分析的方法。

混合定律(Rule of Mixtures)——表达复合材料性能与对应的组分材料性能之间同体积含量有线性关系的法则。

失效准则(Failure Criterion)——复杂应力—应变状态下,材料失效的判据。

失效包线(Failure Envelope)——复杂应力—应变状态下,由失效准则确定的各极限值形成的包络线。

最上一层失效(First—Ply—Failure)——在多向层压板中有一个铺层最早开始出现破坏时称最上一层失效。此时对应的载荷可作为设计中的使用载荷。

层间应力(Interlaminar Stresses)——除层压板的三个面内应力分量外,指与厚度方向有关的另外三个应力分量,即 σ_z 、 τ_{zx} 、 τ_{zy} 。

层间剪切(Interlaminar Shear)——指层间应力分量中的两个剪切分量,即 τ_{zx} 、 τ_{zy} ,也称横向剪切。复合材料层间剪切强度较低,是它的一个弱点。

复合应力(Combined Stresses)——由两种或两种以上的基本应力组合成的复杂应力状态。

铺层(Lamina, Ply)——复合材料制件中一层单向带或织物称为一个铺层,是复合材料制件中一个最基本的单元。

铺层组(Ply Group)——一组具有相同铺层角的连续铺层。

铺层角(Ply Orientation Angle)——每一铺层的纤维方向与制件的参考坐标 X 轴之间的夹角,由 X 轴到纤维方向逆时针旋转为正。

铺层顺序(Ply Stacking Sequence)——铺叠中具有各种不同铺层角的铺层的排列次序。

铺层比例(Ply Ratio)——层压板中各种不同铺层角的铺层数占总铺层数的百分比。

铺层递降(Ply Drop)——随载荷的变化在一段距离上相应地逐步减少某些铺层的情况。

层压板(Laminate)——由单向或多向铺层压制而成的复合材料板。

对称层压板(Symmetric Laminate)——全部铺层及其各种特性和参数相对于板的几何中面对称的层压板。

均衡层压板(Balanced Laminate)——铺层的各种特性和参数相同,铺层角 $+\theta$ 与 $-\theta$ 的铺层数相等的层压板。

均衡对称层压板(Balanced Symmetric Laminate)——既均衡又对称的层压板。

正交层压板(Cross—Ply Laminate)——只含有 0° 和 90° 铺层的双向层压板。

斜交层压板(Angle—Ply Laminate)——只含有 $+\theta$ 和 $-\theta$ 角铺层的双向层压板。

准各向同性板(Quasi—Isotropy Laminate)——面内各方向的弹性常数相同的对称层压

板。

层压板族(Laminate Family)——一些具有相同铺层数和铺层角数,但各种角度铺层的铺层比不同的层压板。

子层压板(Sub-Laminate)——在层压板内一个可多次重复的多向铺层组合。

加筋板(Stiffened Panel)——用各种形式的筋条(型材)增强的平板或曲板。筋条有纵横之分。

使用载荷(Limit Load)——正常使用中可能出现的最大载荷,在该载荷下结构不应产生残余变形。

设计载荷(Ultimate Load)——设计中用来进行强度计算的载荷,通常由使用载荷乘以一个适当的系数得到(一般是1.5~2)。在该载荷下结构刚开始或接近破坏。

安全系数(Factor of Safety)——设计载荷与使用载荷的比值称为安全系数。

许用值(Allowables)——计算中允许采用的材料性能值。由一定的试验数据确定。

A 基准(A-BASIS)——是一个力学性能的限定值,在95%的置信度下,99%的性能数值群的值高于此值。

B 基准(B-BASIS)——是一个力学性能的限定值,在95%的置信度下,90%的性能数值群的值高于此值。

典型值(Typical Value)——从至少5个试样做出的有效试验结果中得出的算术平均值。

应力(应变)主方向(Stress or Strain Principal Direction)——是一个特殊的坐标取向,在该方向上剪应力(或剪应变)为零。对于二维应力状态,在该坐标方向上的正应力(或正应变)为最大值或最小值。

强度比(Strength Ratio)——材料的强度极限与结构所受对应应力之比,有时也称强度/应力比。

载荷系数(Load Ratio)——材料或元件最大作用载荷与破坏载荷之比。

毯式曲线(Carpet Plot)——层压板的单轴或纯剪刚度和强度为 0° 、 90° 、 $\pm 45^\circ$ 。铺层比函数的一种变化曲线,又称卡彼特曲线。

环境条件(Ambient Conditions, Environment Conditions)——制件使用和存放的周围条件,包括温度、湿度、紫外线照射、雷电、噪声、腐蚀、燃油浸泡等情况。

湿热效应(Hygrothermal Effect)——同吸湿和温度变化引起制件尺寸和材料性能改变的现象。

损伤容限(Damage Tolerance)——指结构在规定的未修使用周期内,抵抗由缺陷、裂纹或其他损伤而导致破坏的能力。

耐久性(Durability)——指结构在规定时间期限内,抵抗开裂、应力腐蚀、热退化、脱层、磨损和外来物损伤的能力。

机械连接(Mechanically Fastened Joint)——用机械方法将两个或更多个被连接板(或元件、构件)连接在一起,主要包括螺栓连接、铆钉连接和销钉连接。

胶接(Adhesive-Bonded Joint)——用胶粘剂将两个或更多个被胶接件粘接在一起。

混合连接(Combined Joint)——机械连接和胶接同时使用的连接。例如:胶-铆、胶-螺连接。

紧固件、钉(Fastener)——泛指起连接作用的螺栓、铆钉、销钉等。

镶嵌件(Insert)——夹层结构中用于局部增强的紧固件。

紧固孔、钉孔(Fastened Hole)——容纳紧固件的孔。

开孔(Open Hole)——即通孔。

填充孔(Filled Hole)——被不传载的销钉所填充的孔。

卸载孔(Unloaded Hole)——不传递载荷的孔,包括填充孔和开孔。

受载孔(Loaded Hole)——因销钉传载而承受载荷的孔。

挤压面积(Bearing Area)——钉孔的直径与厚度之积。

破坏载荷(Failure Load)——试件能够承受的最大载荷。

挤压载荷(Bearing Load)——通过销钉加载作用于挤压表面的载荷。

旁路载荷(Bypass Load)——多排紧固件连接中绕过销钉的载荷。

挤压应变(Bearing Strain)——沿作用力方向的孔挤压变形与孔直径之比。

挤压应力(Bearing Stress)——挤压载荷除以挤压面积。

挤压强度(Bearing Strength)——试件能够承受的最大挤压应力。

初始挤压失效应力(Initial Failure Bearing Stress)——指载荷—位移曲线上第一个拐点或者某个孔变形量对应的挤压应力。

许用挤压强度(Bearing Strength Allowables)——设计载荷下允许使用的最大挤压应力。

缺陷(Flaw, Defect)——加工、制造或装配过程中产生的制造上的异常。在规定的标准内是允许的,在规定的标准外属超差,是不允许的。

损伤(Damage)——制造或作用中引起的结构上的异常。通常由机械加工、紧固件安装、载荷和外来物撞击等引起的。

冲击损伤(Impact Damage)——专指外来物撞击引起的结构上的异常。

无损检验(NDI, Non-Destructive Inspection)——一种不破坏、不损伤原结构的质量检验技术和方法。

无损试验(NDT)——一般当作无损检验的同义词。

无损评定(NDE)——一般当作无损检验的同义词。

引伸计(Extensometer)——测量线性位移的装置。

试件名义厚度(Nominal Specimen Thickness)——由铺层名义厚度乘以层压板总层数而得到的厚度。

试样(Coupon)——一种小型的层压板试验件,用于测定基本铺层、层压板或通用结构(如胶接或机械连接)的特性。

元件(Element)——一个复杂结构上的通用构件,如蒙皮、长桁、承剪板或接头等。

细节件(Detail)——一个较复杂结构上的非通用构件。

组合件(Subcomponent)——一个较大的三维结构,它可为全结构的一部分提供出完整的结构代表,如梁段、盒段、壁板、翼肋、框架等。

部件(Component)——飞机骨架结构的一个主要部分,如机翼、机身、垂尾、平尾等。它可作为一个完整的单元进行试验以鉴定该种结构。

适航性要求(Airworthiness Requirements)——为保证飞机及其乘员在飞行中的安全而提出的要求,一般以适航条例的形式给出,如美国的联邦航空条例 FAR、中国的航空条例

CCAR 等。

适航鉴定(Airworthiness Certification)——按适航条例的各项要求对已研制成的飞机或其部件进行鉴定,以便颁发型号合格证、生产许可证和适航证等。

1.2 主要符号说明

A	面积
$[A]$	层压板的面内刚度矩阵
a	椭圆的长半径
a_0	平均应力准则的特征尺寸
$[B]$	层压板的耦合刚度矩阵
b	椭圆的短半径
C	应力集中减缓因子,胶接件无因次热不匹配系数
c	胶接长度的一半
D	直径,被胶接件弯曲刚度
$[D]$	层压板的弯曲刚度矩阵
d_0	点应力准则的特征尺寸
E	弹性模量
E_c	胶层剥离(横向拉伸)模量
E^*	胶接件拉伸刚度比
e	端距
f	挠度
G	剪变模量
H	高度
h	厚度
K	应力集中系数,单搭接连接偏心系数,疲劳应力系数 $K = \sigma_{\max} / \sigma_{brn}$
L	长度
l	搭接长度
l_e	胶层应力弹性槽宽度为零(胶层全部进入塑性)时之搭接长度
l^*	斜面搭接连接“过渡”搭接长度
M	弯曲,力矩
M, S	安全裕度
N	内力,疲劳破坏时的循环数
n	铺层数
P	外力
P_{ult}	破坏载荷
p	间距
Q	剪力

$[Q]$	单向层压板刚度矩阵
q	剪流
R	半径, 疲劳应力比 $R = \sigma_{brmin} / \sigma_{brmax}$
r	半径
S	剪切强度, 排距
$[S]$	单向层压板柔度矩阵
s_w	边距
T	温度, 螺栓拧紧力矩
t	厚度, 时间
u, v, w	x, y, z 方向的位移
V	体积
W	宽度
X	单向层压板纵向强度
Y	单向层压板横向强度
α	角度, 热膨胀系数
γ	剪应变
δ	位移, 挠度
ϵ	正应变
η	应力集中宽度修正系数
θ	铺层角, 角度
ζ	搭接板弯曲应力分布系数
λ	搭接长度 l 的无因次系数, 连接效率
ν	泊松比
ρ	密度, 曲率半径
σ	正应力
$[\sigma]$	许用正应力
σ_b	拉伸强度
σ_c	压缩强度
σ_{bru}	挤压强度
σ_{br}	挤压应力
σ_{by}	旁路应力
$[\sigma_{br}]$	许用挤压强度
τ	剪应力
$[\tau]$	许用剪应力
τ_b	剪切强度
φ	角度
ψ	由搭接长度决定的塑性应力状态程度
σ_r	极坐标系中的径向正应力
σ_θ	极坐标系中的周向正应力

$\tau_{r\theta}$ 极坐标系中的剪应力

角标

1	沿纤维方向
2	垂直于纤维方向
t	拉伸
c	压缩,胶层
s	剪切
e	弹性
p	塑性
pe	剥离
y	屈服
o	外被胶接件
i	内被胶接件
av	平均
max	最大
min	最小
ult	极限,破坏

1.3 材料和层压板代号

为简便起见,本手册采用统一的复合材料代号和层压板代号。材料代号用字母表示,见表 1.1;层压板代号用数字表示,见表 1.2。

表 1.1 复合材料代号

代 号	A	B	C	L
材 料	T300/QY891	T300/4211	T300/5222	AS 3501-6

表 1.2 层压板代号

层压板 代 号	铺层比例	铺 层 顺 序
	0°/±45°/90	
2	70/20/10	[45/0/0/-45/0/0/0/90/0/0] _s
3	58.3/33.3/8.3	[45/0/0/-45/0/0/90/0/0/45/0/-45] _s
4	50/40/10	[45/0/-45/0/90/0/45/0/-45/0] _s

续表 1.2

层压板 代 号	铺层比例	铺 层 顺 序
	$0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$	
4-1	50/40/10	$[45/0/-45/0/90/0/45/0/-45/0]_{2s}$
4-2	50/40/10	$[45/0/-45/0/90/0/45/0/-45/0]_{ss}$
5	40/50/10	$[45/0/-45/0/45/90/0/-45/0/\pm 45]_s$
6	30/60/10	$[45/0/-45/0/45/90/-45/0/45/-45]_{ss}$
7	18/73/9	$[45/-45/0/45/-45/90/45/0/-45/45/-45]_s$
8	0/100/0	$[\pm 45]_{ss}$
9	50/0/50	$[0/90]_{ss}$
10	25/50/25	$[45/0/-45/90]_{ss}$

如 A4 表示 T300/QY8911 $[45/0/-45/0/90/0/45/0/-45/0]_s$ 层压板。

还约定 (50/40/10) 表示 (50% 0° , 40% $\pm 45^\circ$, 10% 90°) 的层压板, 其他类推。

参 考 文 献

- [1-1] 航空航天工业部科学技术研究院编。复合材料设计手册。北京, 航空工业出版社, 1990, 3~10

第二章 胶 接

胶接是复合材料结构主要连接方法之一,它是借助胶粘剂将零件连接成不可拆卸的整体。

胶接的优点是:无钻孔引起的应力集中,连接效率高,结构轻;抗疲劳、密封、减振及绝缘性能好;有阻止裂纹扩展作用,破损安全性好;能获得光滑气动外形;不同材料连接无电偶腐蚀问题。

胶接的缺点是:胶接性能受环境(湿、热、腐蚀介质)影响大,存在一定老化问题;胶接强度分散性大,剥离强度低,不能传递大的载荷;胶接表面在胶接前需作特殊的表面处理;被胶接件间配合公差要求严,需加温加压固化设备,修补较困难,质量控制比较困难;胶接后不可拆卸。

由于胶接具有连接效率较高的优点,在国内外航空结构上得到了愈来愈广泛的应用:

(a) Boeing 737 平尾大梁

Boeing 737 平尾是双梁式结构,大梁是最主要的承力件,采用的是 T300/5208 材料,腹板由两个预固化的槽形件背靠背的胶接在一起(图 2.1)。

b) Lear Fan 2100 机身

Lear Fan 2100 是一架全复合材料小飞机,它的机身蒙皮与骨架、蒙皮与蒙皮之间采用胶接,蒙皮与蒙皮之间采用单搭接,边缘斜削以减轻剥离应力(图 2.2)。

(c) MPC-75 预研究机翼

德国 DA 公司在 MPC-75 机翼预研究中,机翼翼盒为全复合材料结构。为此他们加工了一系列子结构,壁板尺寸达 1700×650 ,长桁为“T”形,蒙皮与长桁二次胶接(图 2.3)。

(d) Y7-200B 腹鳍

Y7-200B 腹鳍蒙皮和隔板是用 T300/HD-03 制成的全复合材料构件,它的蒙皮与隔板是单独制造的,用 J-47A 胶粘剂胶接在一起,目前已通过静力试验并已装机试飞(图 2.4)。

(e) Y7-200A 进气道

研制中的 Y7-200A 进气道采用碳-玻璃纤维混杂复合材料结构。唇口与进气道本体及上、下部之间,采用 AF163-2L.03 胶膜胶接(图 2.5)。

(f) Y7FC 垂尾壁板

Y7FC 垂尾壁板蒙皮与“T”形长桁之间,采用 AF163-2L.03 胶膜,用二次胶接法,将它们胶接起来(图 2.6)。

(g) DAC10 垂尾

DAC10 垂尾墙的 π 加筋与蒙皮用 J116B 胶膜胶接在一起,墙的 π 加筋与腹板采用 EC-3448 胶液胶接(图 2.7)。

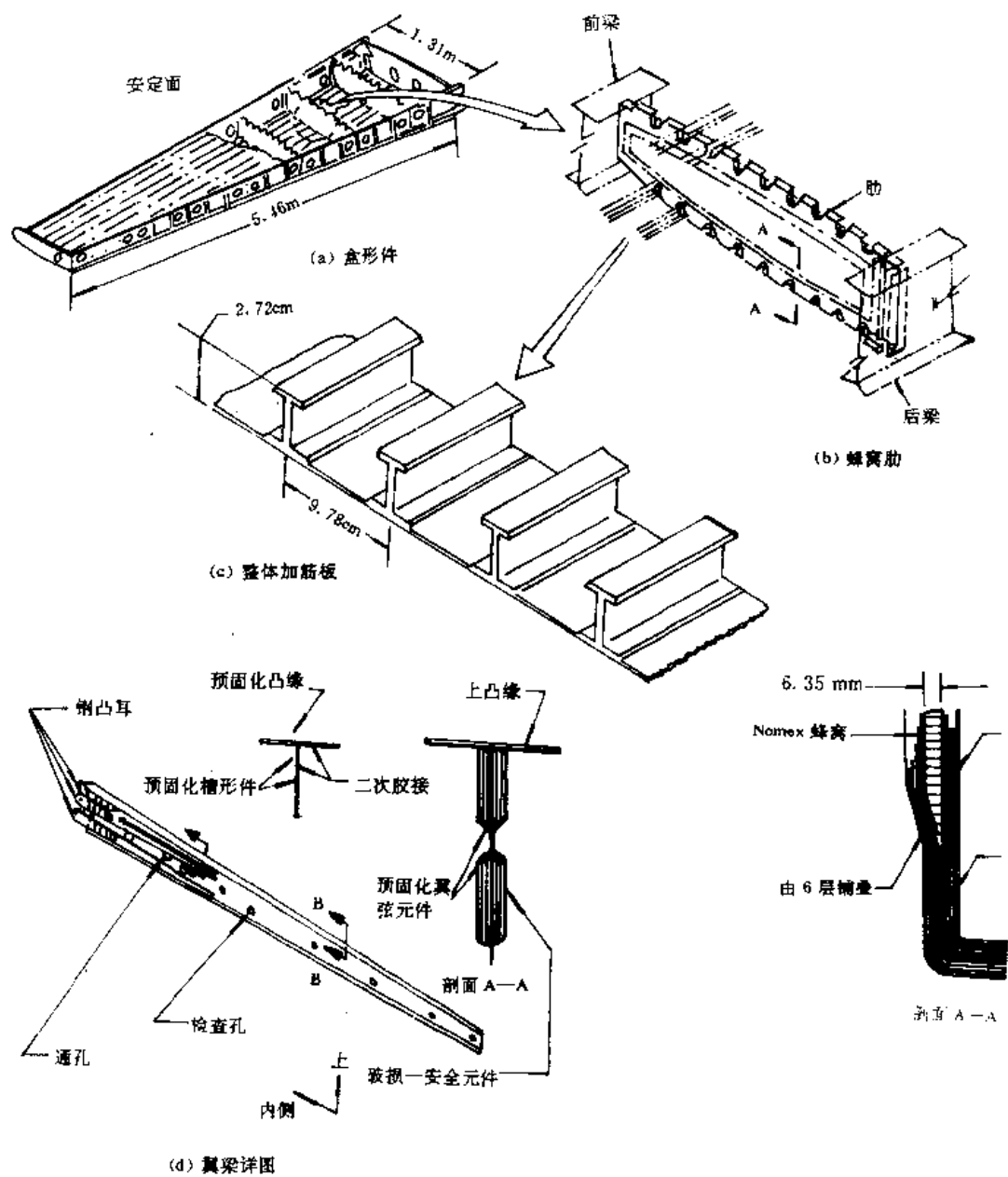


图 2.1 Boeing 737 复合材料水平安定面

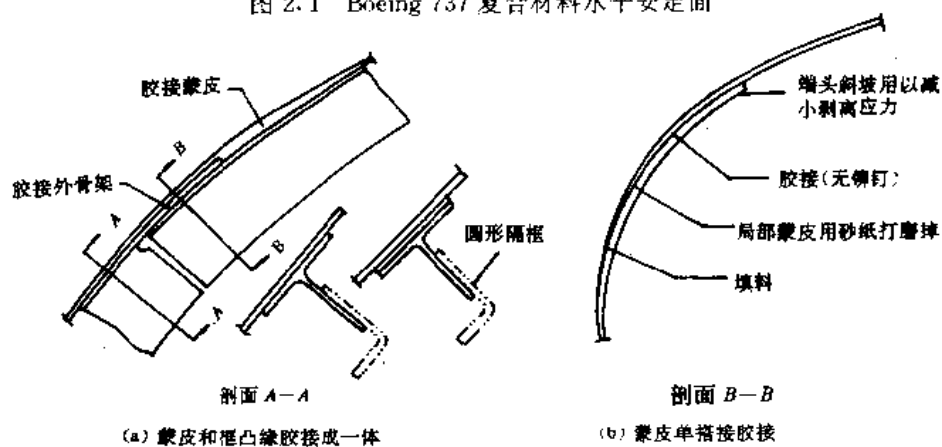
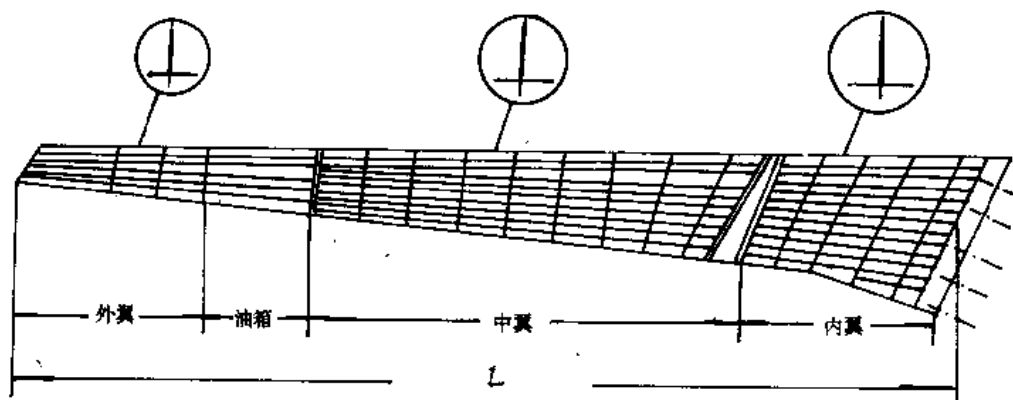


图 2.2 Lear Fan 2100 机身胶接



注:所有桁条用双搭接形式胶接在蒙皮上

图 2.3 MPC-75 机翼胶接壁板

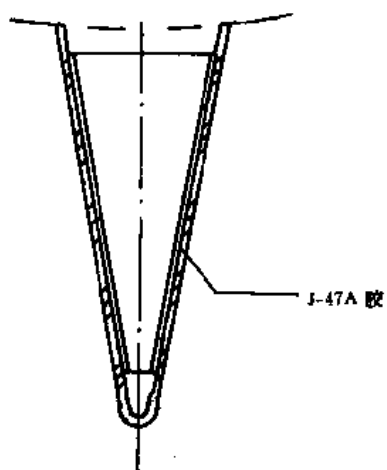


图 2.4 Y7-200B 腹鳍

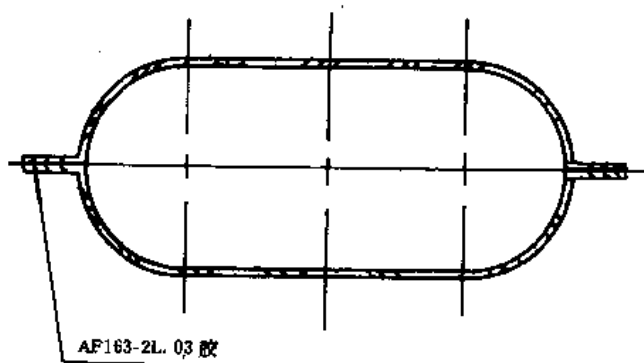


图 2.5 Y7-200A 进气道

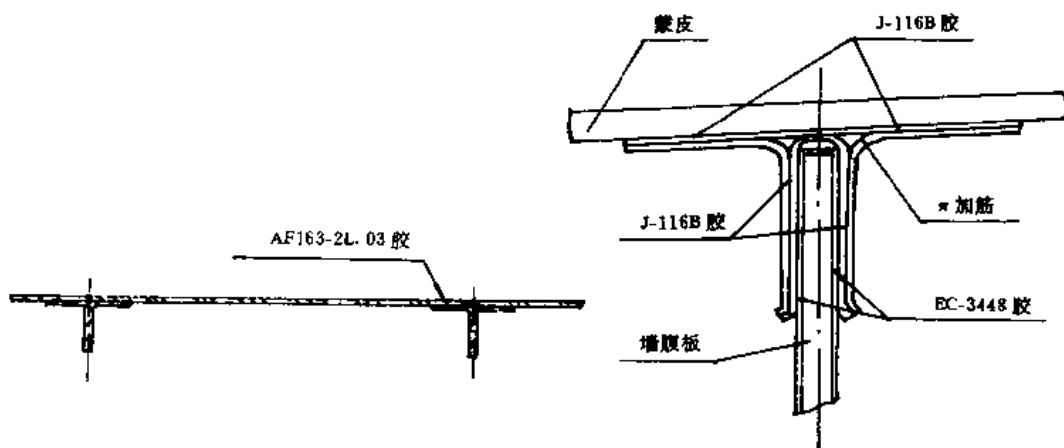


图 2.6 Y7FC 垂尾壁板

图 2.7 DAC10 垂尾

2.1 胶接连接特点

与金属材料胶接相比,复合材料结构胶接具有如下特点:

a. 碳纤维复合材料沿纤维方向的线膨胀系数很小($0.60 \sim 4.30 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$),它与金属胶接时,由于热膨胀系数差别较大,在高温固化后会产生较大内应力和变形。因此,胶接连接设计时应尽量避开与金属件胶接(尤其是铝合金),必要时可采用热膨胀系数小的钛合金零件。

b. 由于碳纤维复合材料层间拉伸强度低,它不像金属连接在胶层产生剥离破坏,而易在连接端部层压板的层间产生剥离破坏(见图 2.13),因此,对较厚胶接件,不宜采用简单的单搭接连接形式。

c. 湿、热、腐蚀介质等环境效应对连接强度有显著影响。

2.2 胶粘剂

2.2.1 胶粘剂应具有的性能

- a. 与被胶接件的相容性好,即粘接强度要高,不致在胶接件界面发生破坏。
- b. 在尽量低的温度下固化。
- c. 与被胶接件的热膨胀系数要接近。
- d. 湿度影响应尽可能小。
- e. 有较好综合力学性能。
- f. 工艺性好,使用方便。
- g. 胶接的耐久性应高于结构所预期的寿命。

2.2.2 常用的胶粘剂类型

胶粘剂按应力-应变特性分为韧性及脆性两种(图 2.8)。当胶层厚度为 $0.1 \sim 0.2\text{mm}$ 时,韧性胶粘剂的剪应变极限在 0.05 以上,而脆性胶粘剂则远小于这一数值。

由图可见,脆性胶粘剂的剪切强度高于韧性胶粘剂,但在胶层剥离应力可忽略的情况下,胶接连接静剪切强度并不只取决于某个特征参数,而是由剪切应变能(曲线下的面积)所决定的,因此,韧性胶粘剂的连接静强度较高。从疲劳特性来看,脆性胶粘剂在拐点附近即断裂,疲劳寿命较短。韧性胶极限应变较大,因而降低了胶层的应力峰值,即应力集中小,可承受较高的疲劳极限应力,疲劳寿命较长。所以,当环境温度不超过 70°C 的情况下,应尽量选用韧性胶粘剂。而在发动机附近或超音速飞机上,为适应高温工作,即使要损失很多强度,也不得不选用脆性胶粘剂。

选择胶粘剂需考虑温度效应,但事实上,只要低于胶粘剂玻璃化转变温度一定数值,胶接连接强度对温度不是非常敏感的。但在低温,强度却显著下降。

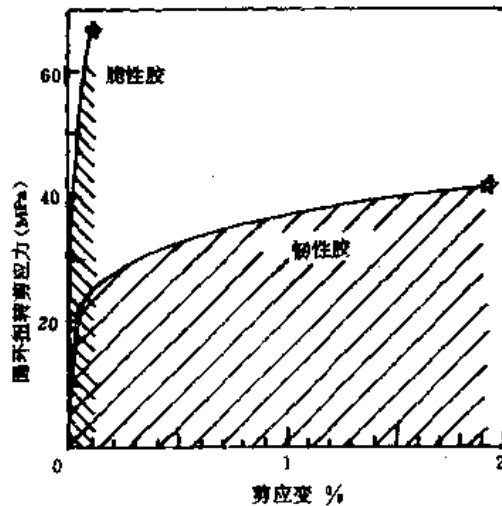


图 2.8 韧性及脆性胶粘剂

胶粘剂按成份分类主要有如下几类：

(a) 环氧树脂

环氧树脂胶粘剂由于吸湿率低、粘附力强、化学稳定性和机械特性好，是航空结构最常用的胶粘剂。其供应方式通常是树脂和固化剂分别包装，使用时再把它们混合，通常加热固化，有的也可在室温 20℃ 下固化。

对于不用固化剂的环氧树脂，只要将胶接件置于固化所需的温度、保持规定的时间，而无需加压就可实现固化。在这种情况下，固化温度大约为 180℃，且固化时间很长。

利用固化剂加催化剂，不仅可以使胶接结构在高温应用时具有较高的强度，而且可以使胶粘剂在较低温度、较短时间内固化。例如在 145℃ 和 0.7MPa 的压力下 20 分钟内即可固化。

另外一种类型的环氧树脂是“改性环氧树脂”，即环氧酚醛和环氧聚酰亚胺。这类胶粘剂在 130℃ 和 175℃ 约 60 分钟即可固化。

(b) 聚酰亚胺

聚酰亚胺树脂胶粘剂在大约 250℃ 至 400℃ 固化，并要求后固化，以便得到最大强度特性。其最高使用温度约在 290℃ 至 400℃ 之间。

(c) 酚醛树脂

酚醛树脂常与其他树脂组成混合树脂胶粘剂。常用的有：

- 酚醛——聚酰胺胶粘剂

可获得 36MPa 的剪切强度和出色的高温强度。

- 酚醛——乙烯胶粘剂

剪切强度达 30MPa，但使用温度很低。在 100℃ 以上时性能迅速退化。

(d) 有机硅树脂

有机硅树脂具有出色的高温特性，但强度相当低。因此，将这种树脂与其他树脂混合以得到高温稳定性且具有高的机械强度。例如，环氧有机硅胶粘剂最高的连续使用温度可以达到 340℃、间断使用可到 510℃。

表 2.1 对上述几类胶粘剂进行了比较。

表 2.1 各类胶粘剂的比较

种 类	优 点	缺 点
环氧树脂	工艺性能好;固化收缩性小;化学稳定性好;机械强度高	硬度一般;热强度低;耐磨性差
环氧酚醛	耐热性好;强度高;超低温性能好	需热固化;多孔性;电性能不良
酚醛树脂	热强度高,耐酸性好;价格低电气性能好	需高温高压固化;造价贵;有腐蚀性;收缩率较大
有机硅树脂	耐热、耐寒、耐辐射,绝缘性好	强度低
聚酰亚胺	耐热、耐水、耐火、耐腐蚀	需高温固化、造价高;有腐蚀性、多孔性
聚酯树脂	机械和电气特性好、价格低、耐沸水、耐热、耐酸、耐环境	仅用于次要构件

2.2.3 被胶接件的表面制备

利用胶粘剂进行胶接,是被胶接件与胶层之间复杂的作用过程,被胶接件的表面制备质量对胶接质量(静强度和耐久性)有重大影响。

对碳/环氧复合材料件间的胶接,可采用有机溶剂清洗和表面机械打磨。对复合材料与金属件间的胶接,除表面制备外,还需对金属进行表面处理。德国 DA 公司在 Airbus 系列飞机生产中采用的表面处理方法是:不锈钢:不处理;

钛合金:阳极化或不处理;

铝合金:铬酸阳极化。

国内对铝合金通常采用磷酸阳极化进行表面处理。为防止电偶腐蚀,铝合金与碳纤维复合材料构件间还应加一层由玻璃纤维构成的隔离层。

2.2.4 适宜于粘接不同材料的胶粘剂

表 2.2 为粘接不同材料应选用的胶粘剂。表中没有注明胶粘剂的空格表示很难胶接的相应材料。

表 2.2 适宜于胶接不同材料的胶粘剂

	金属和合金	聚酰胺	有机硅树脂	陶瓷和玻璃	聚四氟乙烯	聚亚胺脂	酚醛	环氧
金属和合金	E/T	E	S					
聚酰胺	E	P	—	—				
有机硅树脂	S	—	S	—	—			
陶瓷和玻璃	E	—	—	—	—	—		
聚四氟乙烯	E/T	—	—	—	E/T	—	—	
聚亚胺脂	E	—	S	—	—	E	—	—
酚醛	E		—	E	—	—	E	
环氧	E	—	—	—	E/T	—	E/T	E、T

注: E:环氧树脂, P:聚酰胺, S:有机硅树脂, T:聚硫橡胶

适用于航空结构的胶粘剂列于表 2.3 中。表中国产胶粘剂剪切强度是按 GB7124-86 测得的。“碳”指 T300/QY8911 单向板。“铝”指经磷酸阳极化处理的铝合金板。

表 2.3 常用结构胶粘剂

牌 号	外 观	主 要 成 分	固化工艺	使用温度	室温剪切强度(MPa)			生产厂家
					铝-铝	碳-碳	碳-铝	
J-47A	浅黄色胶膜	环氧树脂, 丁腈橡胶、固体羧基丁腈橡胶、双氰胺、催化剂	125±5℃ 2~3h 0.1~0.5MPa	-60~100℃	37.1	25.5	27.5	黑龙江省石化所
SY-14	米黄色或绿色胶膜	环氧树脂、聚砜树脂、潜伏性固化剂	175±5℃ 2±0.5h 0.1~0.3MPa	-55~175℃	34.0	31.7	32	北京航空材料研究所
SJ-2	草绿色胶膜	环氧改性	180±5℃ 2.5~3h 0.3±0.02MPa	-55~150℃	30.0	21.9	20.0	黑龙江省石化所
J-116B	灰色胶膜	环氧改性	180±5℃ 2.5~3h 0.3±0.02MPa	-55~150℃	24.5	24.1	24.0	黑龙江省石化所
EC-3448	淡棕黄色胶液	环氧改性	120℃ 1.5h 0.07MPa	-55~107℃	41.4	63.7		美国 3M 公司
AF163-2L03-2KD6	粉红色胶膜	环氧改性	125±5℃ >1h 0.1~1MPa	-55~80℃	32.0			美国 3M 公司
EA93093·3N/A	粉红胶液	环氧树脂, 二氧化硅(5.3%) 填料	(1)23℃下7天; (2)23℃下2h, 再在80±5℃下1h以下	-55℃~100℃	≥20			HYSOL U.S.A
85L312.4.06	白色胶膜	改性环氧	120℃±5℃下 1h±5min	55℃~100℃	35			Ciba Geigy GB
Redux319A	灰色胶膜	改性环氧	175℃±5℃下 0.3MPa	55℃~100℃	≥26.5			Ciba Geigy GB

* 用 T300/QY8311 测得的典型值

2.2.5 胶层力学特性的测定

在分析胶层应力分布与进行胶接连接静强度设计时,需用胶层剪切应力-应变曲线及有关力学特性数据。由于胶层较薄,受界面影响较大,测定时必须采用与实际结构构件相同的试样进行。在目前尚无国标的情况下,建议采用参考文献[6]和[7]的方法,利用圆环扭转(图 2.9)或厚板剪切(图 2.10)的方法进行。

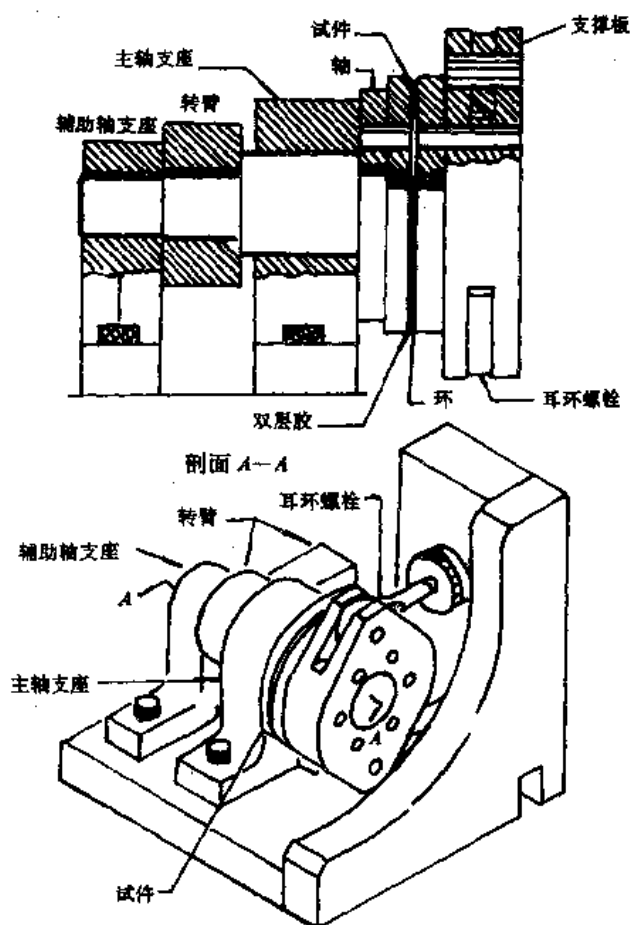


图 2.9 圆环扭转试验装置

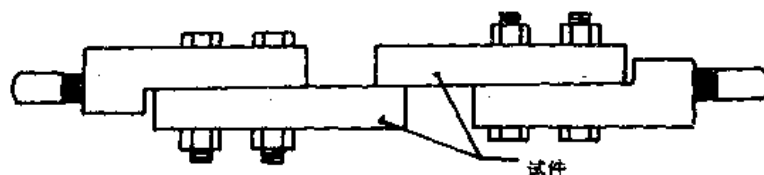


图 2.10 厚板剪切试验装置

测试结果表明,实际胶层剪切应力-应变曲线(图 2.11)较复杂,难于直接用到连接分析中去,等效弹-塑性曲线及等效双线性曲线是常用的两种简化模型。特别是弹-塑性曲线是最常用

的,这样简化,有可能获得显函数形式的解析解。建立等效简化曲线的主要原则是使曲线下面积相等。考虑到试验室与实际生产条件之间的差异及胶层缺陷的影响,应将最大剪应力乘以 0.8 的系数。设计中所需剥离强度等数据可参考 GB4944-85 所给方法近似测定。

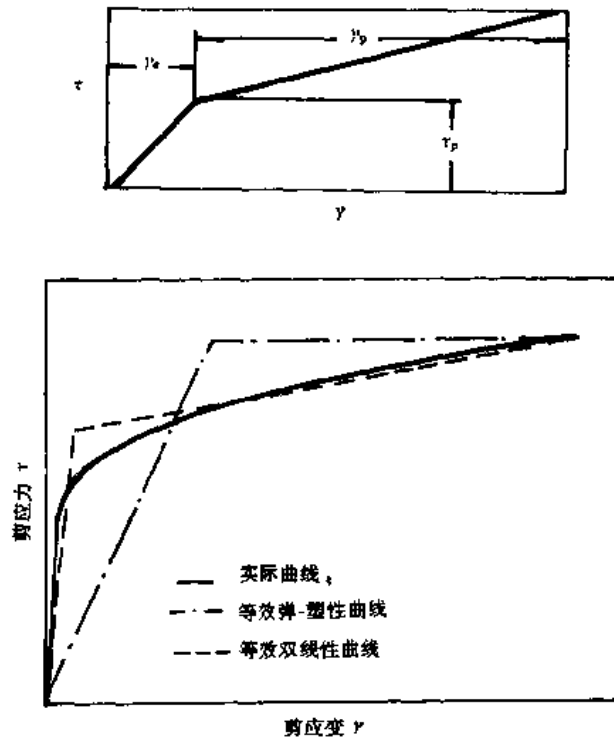


图 2.11 胶层剪切应力-应变曲线

2.3 胶接连接设计

2.3.1 胶接设计一般原则

从强度观点考虑,胶接连接设计的基本原则是:

- 选择合理连接形式,使胶层在最大强度方向受剪力;尽可能避免胶层受到法向力,以防止发生剥离破坏。
- 尽可能减小应力集中。
- 力求避免连接端部层压板发生层间剥离破坏。
- 在高温工作时,所选胶粘剂的热膨胀系数应与被胶接件相近。
- 承受动载荷时,应选低模量韧性胶粘剂。

这些原则总的目的是尽可能使胶接连接强度高于被胶接件强度或与之相近。为此,需从连接形式、几何参数选择等诸方面着手,来满足上述要求。

2.3.2 胶接基本破坏模式

实验表明,胶接连接在拉伸载荷作用下,有三种基本破坏模式(图 2.12 及图 2.13):

- 被胶接件拉伸(或拉弯)破坏。

- b. 胶层剪切破坏。
- c. 剥离破坏(包括胶层剥离破坏与被胶接件剥离破坏)。

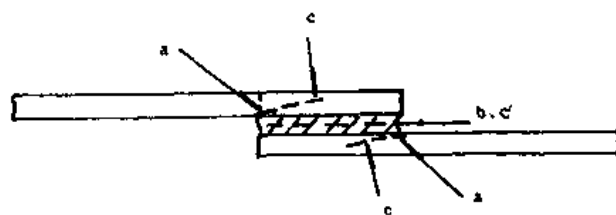


图 2.12 不同破坏模式产生的部位

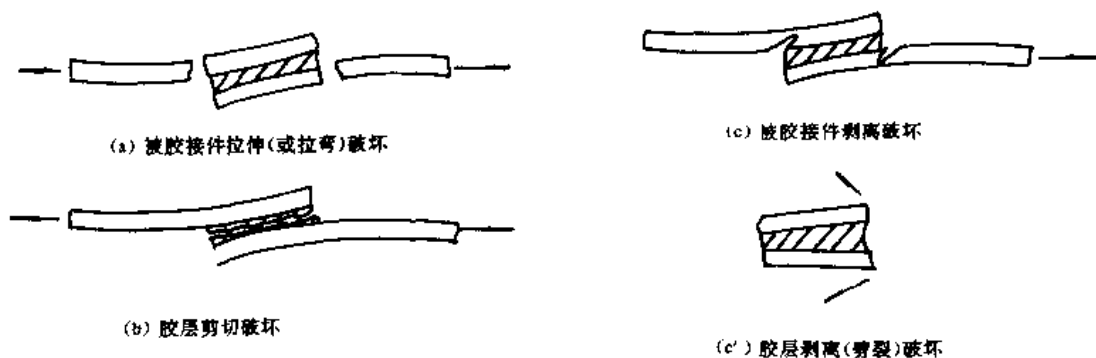


图 2.13 胶接基本破坏模式

除这三种基本破坏模式外,还会发生组合破坏。胶接连接发生何种模式破坏,与连接形式、连接几何参数、邻近胶层的纤维方向及载荷性质有关。在连接几何参数中,被胶接件厚度起着极为重要的作用。当被胶接件很薄,连接强度足够时,被胶接件发生拉伸(或拉弯)破坏;当被胶接件较厚,但偏心力矩尚小时,易在胶层发生剪切破坏;当被胶接件厚到一定程度,胶接连接长度不够大时,在偏心力矩作用下,将发生剥离破坏。对于碳纤维复合材料层压板,由于层间拉伸强度低,剥离破坏通常发生在层间(双搭接亦如此)。

剥离破坏将使胶接连接的承载能力显著下降,应力求避免。

2.3.3 胶接基本连接形式

对于飞行器上的板类构件,图 2.14 给出了四种基本连接形式,图 2.15 还给出了其它几种板与板及板与型材的连接形式。

当被胶接件比较薄(小于 1.8mm),可采用单搭接,对中等厚度板($l/t \approx 30$),采用双搭接比较适宜。但是,对于无支撑单搭接连接,由于载荷偏心产生的附加弯矩,胶接连接的两端出现很高的剥离应力而使连接强度降低,因此需要增大搭接长度与厚度之比,使 $l/t = 50 \sim 100$,以减轻这种偏心效应。当两个被胶接件刚度不等时,偏心效应更大。应尽量避免选用单搭接。倘若单搭接有支撑(如梁、框、肋等),变形受到了限制,偏心效应减轻,可将其视作双搭接来分析。当被胶接件很厚时,按照上图,宜选用斜面搭接,其搭接角度在 $6^\circ \sim 8^\circ$ 范围可获得很高的连接效率。但是,由于所需角度非常小,工艺上很难实现。因此,对厚的被胶接件,通常采用阶梯形搭接。阶梯形搭接具有双搭接和斜面搭接两种连接的特性,通过增加台阶数,使之接近于斜面搭

接角(一般 $6^{\circ} \sim 8^{\circ}$), 每一阶梯胶层接近纯剪状态, 同样可获得较高连接效率。

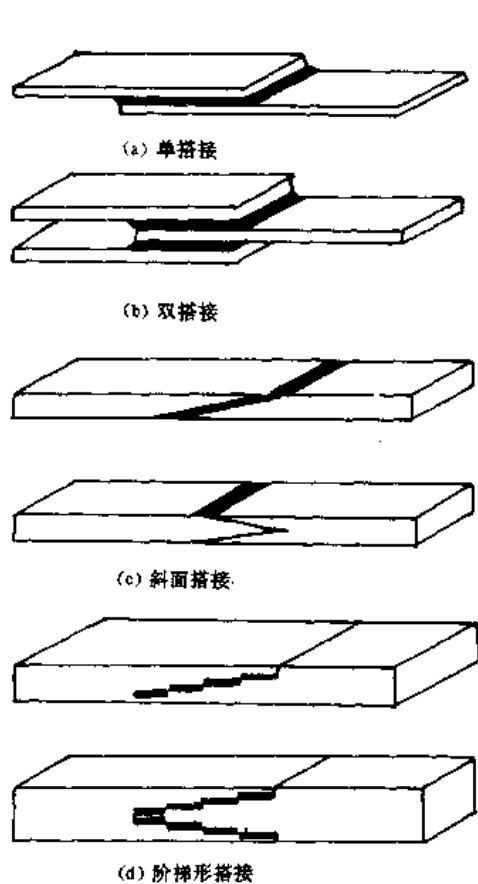


图 2.14 胶接连接的四种基本形式

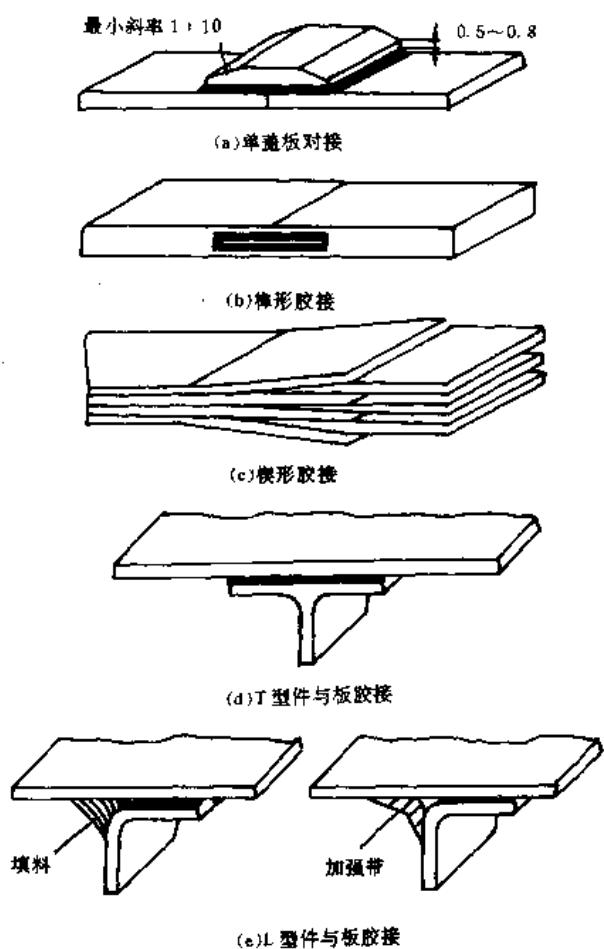


图 2.15 其他胶接连接形式

2.3.4 胶接连接几何参数选择

以图 2.16 承受拉伸载荷 P 的等厚度单搭接连接为例, 其连接几何参数是: 被胶接件厚度 t 、胶层厚度 h 、搭接长度 l 。

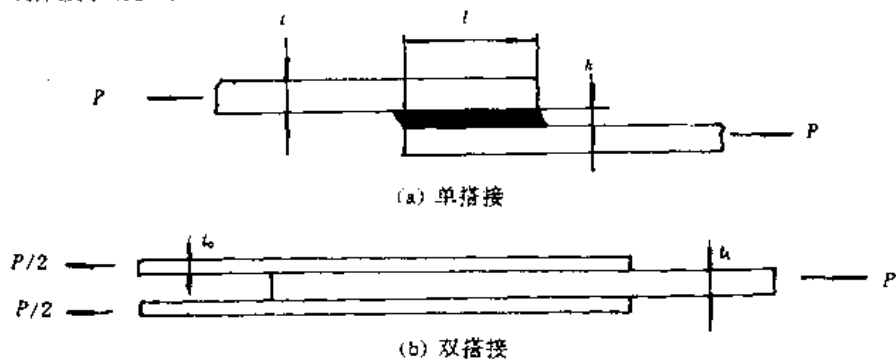


图 2.16 连接几何参数

被胶接件厚度 t 通常由需传递的载荷 P 来确定。

胶层厚度 h 对连接强度有一定影响。增加胶层厚度,可以减小应力集中,提高连接强度,但厚度过大易产生气泡等缺陷,反使强度下降,胶层薄则要求被胶接件间贴合度高,因而也不宜过薄,一般以 $0.10 \sim 0.25\text{mm}$ 为宜。

分析及试验结果表明,在载荷作用下,胶层中剪应力沿搭接长度方向的分布是不均匀的,主要集中在两端,中间是低应力弹性槽(图 2.17)。

由于弹性槽的存在,开始,随着搭接长度的增加,胶接件承载能力逐渐提高,但当搭接长度达到一定值时,只是弹性槽的宽度和深度继续增加,而承载能力无明显提高。从静强度观点分析,继续增加搭接长度似无必要,但从使用寿命,结构耐久性考虑,在可能范围内,仍希望将搭接长度(或搭接长度与厚度之比 l/t)取得尽可能大些。因为,搭接长度很短而又传递较大载荷时,搭接长度中间部分最小剪应力和剪应变几乎与两端的值相等,整个胶层进入塑性状态,卸去载荷后,中间没有可能恢复到原来状态,接头会很快破坏。当搭接长度足够大时,弹性槽最小剪应力和剪应变可低到所希望的程度。卸载后,由于被胶接件的作用,将使胶层恢复到原来状态,蠕变不会积累。胶层具有的这种储能器或弹簧片功能是胶接结构耐久性的关键。分析结果表明:弹性槽最小应力为最大应力的 10%即可使胶层恢复到原来状态。这可通过调整弹性槽宽(即搭接长度)来实现。对双搭接胶接连接,当弹性槽宽为 $6/\lambda$ (λ 是搭接长度 l 的无因次化系数,表达式见 2.8 式)时,最小应力即为最大应力的 10%。

2.3.5 胶接面纤维取向

复合材料层压板待胶接表面纤维最好与载荷方向一致(或者纤维方向与载荷方向成 45° 角),不得与载荷方向垂直,以免被胶接件过早产生层间剥离破坏。图 2.18 示出了按照载荷方向选定待胶接表面纤维取向的一些例子。

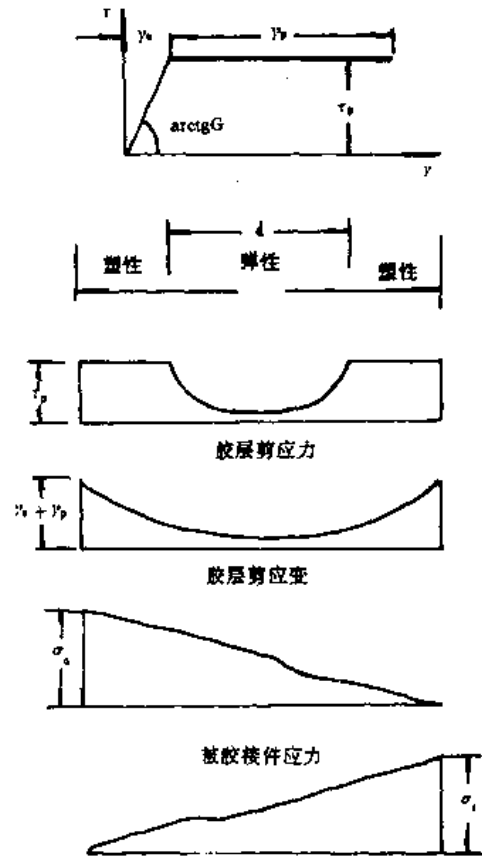


图 2.17 等刚度双搭连接中的应力和应变分布

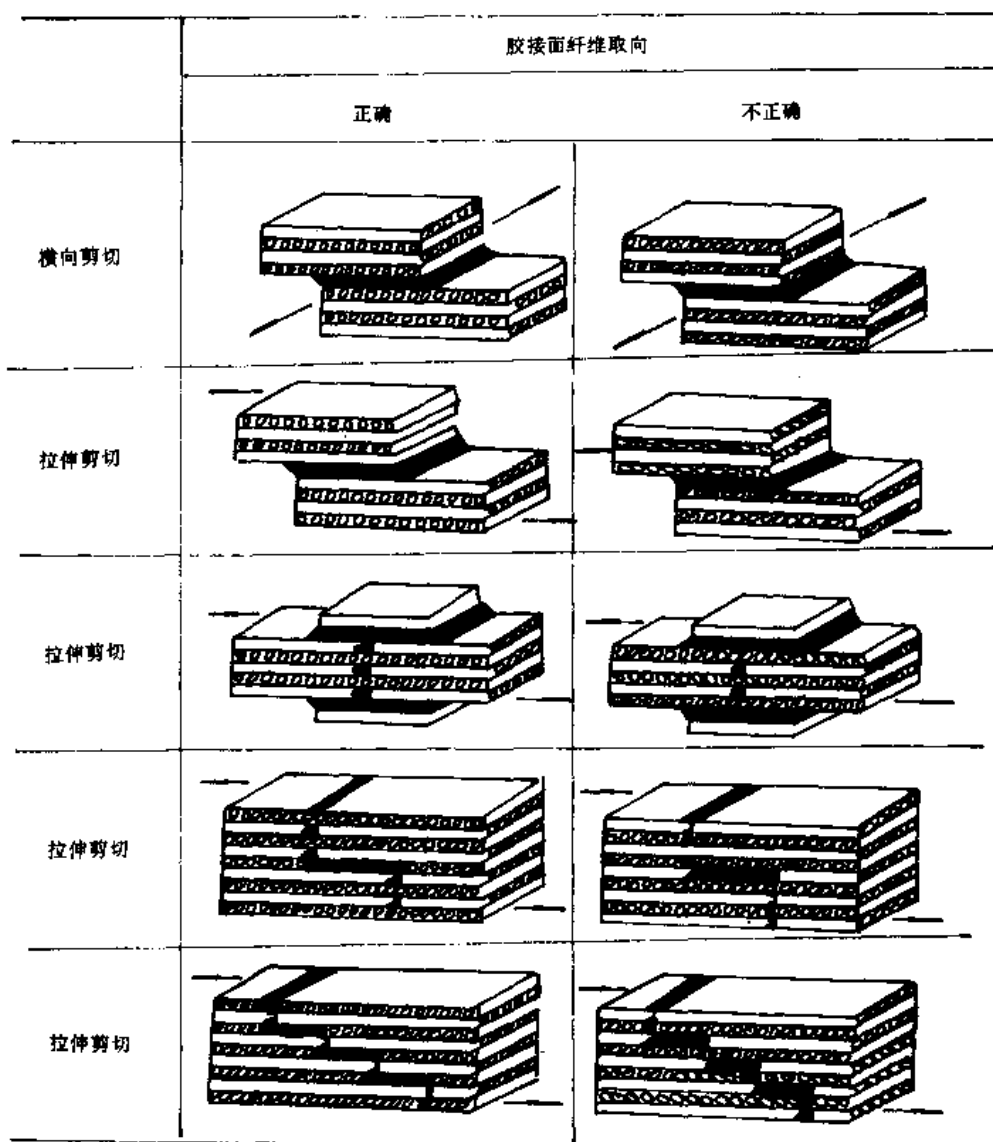


图 2.18 胶接面纤维取向

2.3.6 温度和湿度影响

温度和湿度对复合材料构件性能有影响,设计中必须考虑这两个环境变量。

吸收的湿气靠毛细管作用传到胶层树脂中,逐渐引起树脂的组织软化,使它们膨胀,并降低了它们的玻璃化转变温度。

如果胶粘剂在其工作温度范围内使用,温度影响不重要。如果温度与湿度共同作用,高温将增加湿气的吸收和扩散能力,影响就极为严重。长期的环境影响将明显降低胶接强度,在工程设计与分析中应充分注意到这一点。

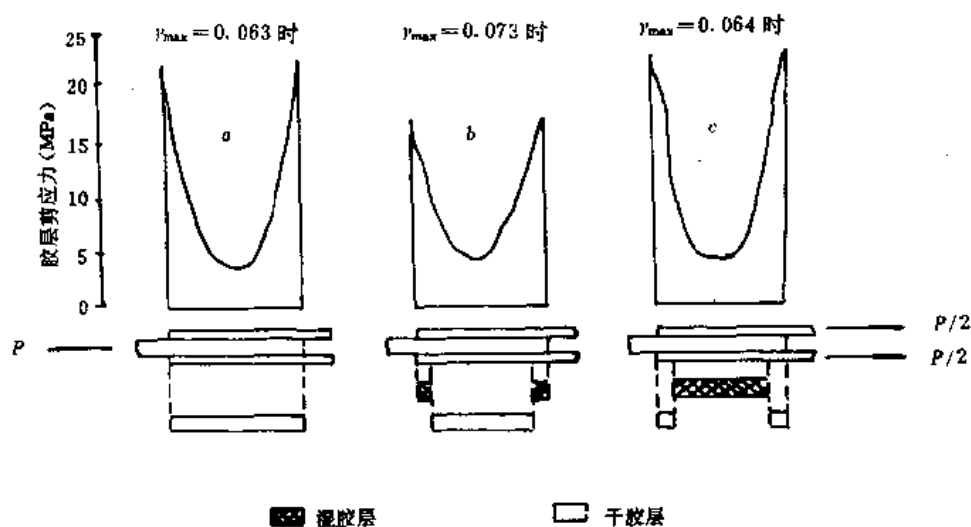
避免湿度和温度有害影响的最好办法是:

- 用密封胶将胶层密封起来,是工程上行之有效的防湿措施。
- 精确地给定胶接接头所承受的最恶劣的环境条件。

- c. 精确地给定使用温度范围。
- d. 考虑上述两点,选择最合适的胶粘剂。

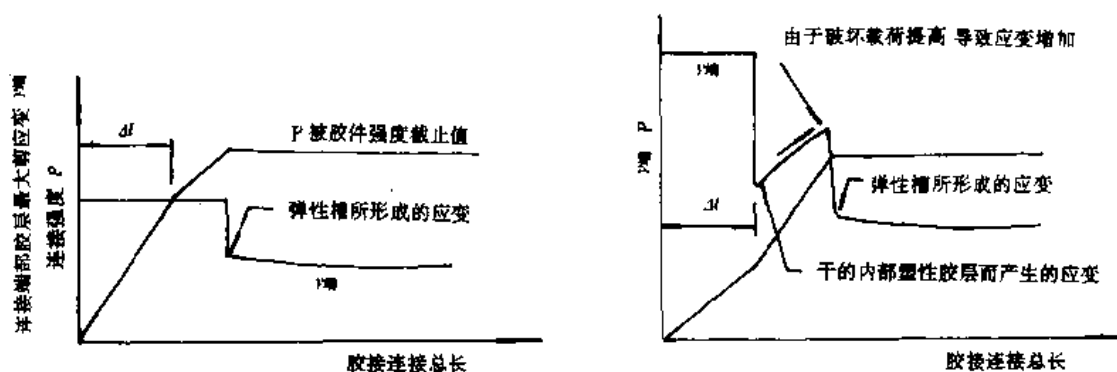
图 2.19 的三个图,比较了胶接连接两端载荷不变时,由于吸湿的作用,胶层剪应力沿连接长度方向的变化^[1]。

图 2.20 的两个图,比较了等刚度双搭接连接吸湿对胶层剪应变的影响^[1]。可以看出,端部为干胶层的剪应变只有一次突变(图 2.20(a)),而端部为湿胶层的剪应变有两个阶梯形的变化(图 2.20(b))。



- (a) 胶层都是干燥的
- (b) 由于边缘的吸湿,胶层已经变软
- (c) 由于外部环境条件的变化,胶层已部分干燥。

图 2.19 湿度对胶层剪应力分析的影响(γ_{max} 是胶层的最大剪应变)



(a) 离两端各 $\Delta l/2$ 的胶层是干的,内部是湿的

(b) 离两端各 $\Delta l/2$ 的胶层是湿的,内部是干的

图 2.20 吸湿和退湿对胶层剪应变峰值的影响

2.3.7 胶接结构的细节设计

复合材料胶接结构细节设计,不仅影响胶接结构的静强度,而且直接关系到胶接结构的耐久性、胶接工艺及成本。下面讨论胶接结构细节设计的一些问题。

a. 基本要求

设计复合材料胶接结构应使胶层在剪切状态下工作,尽量避免胶层受拉力和剥离力。

胶接强度必须高于被胶接件本身的强度。否则,胶接连接将成为薄弱环节,使胶接结构过早破坏。

b. 应力水平

在极限载荷下,对AF163-2L03胶粘剂,胶层中最大平均剪应力控制在 $10.34 \sim 13.79\text{MPa}$ 之间。

c. 胶接连接形式选择

胶接连接形式选择,是胶接连接设计的关键。设计的目标应使制造工艺尽可能简单、成本尽可能低,同时连接强度不低于连接区外边被胶接件的强度。胶接连接承剪能力很强,但抗剥离能力很差。因此,优秀的设计应根据最大载荷的作用方向,使所设计的连接以剪切的方式传递最大载荷,而其他方向载荷很小,就不致引起较大的剥离应力。图2.21说明了几种连接形式的强度与被胶接件厚度之间的关系,图中每根曲线代表了一种连接形式可能达到的最大强度。并且标明了破坏形式。

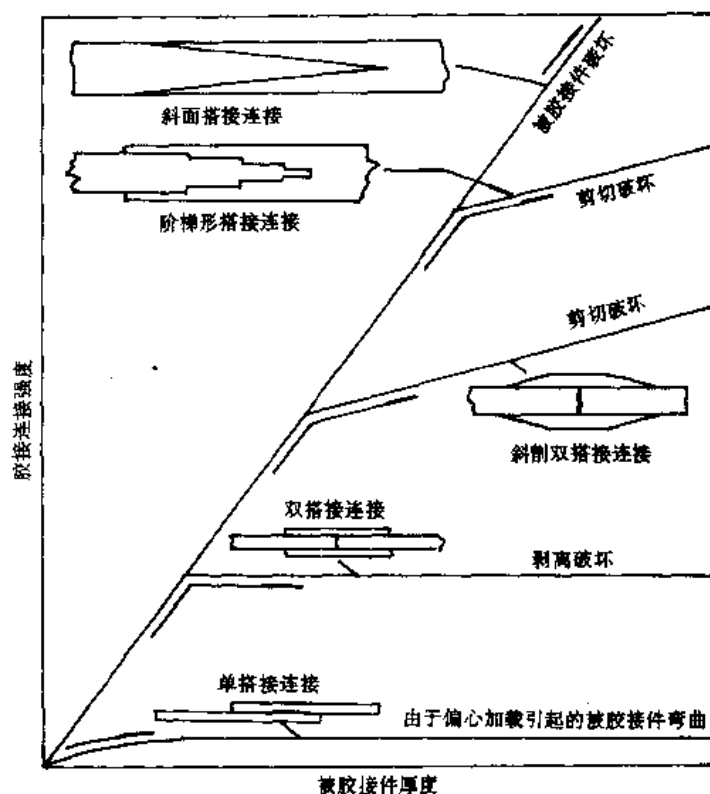


图 2.21 胶接件厚度对连接型式选择的影响

阶梯形搭接常应用于蒙皮壁板与钛合金机加件的连接,见图 2.22、图 2.23、图 2.24。

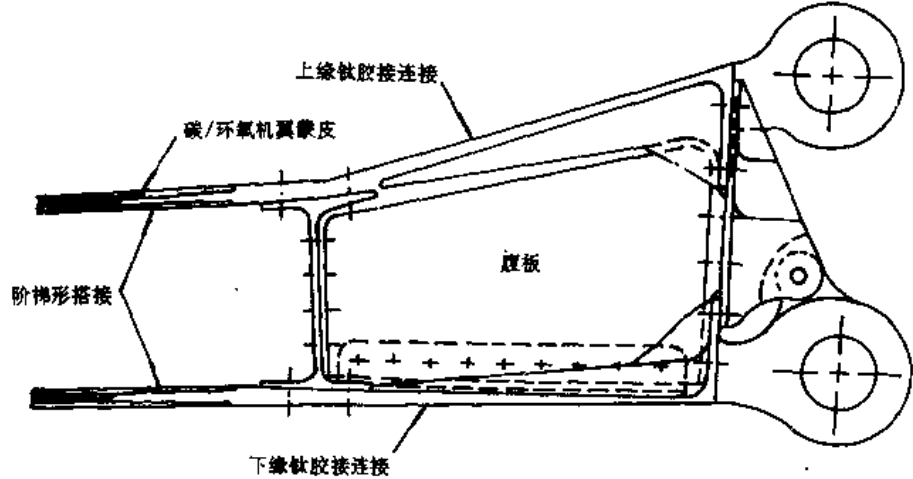


图 2.22 F18 机翼根部的胶接连接

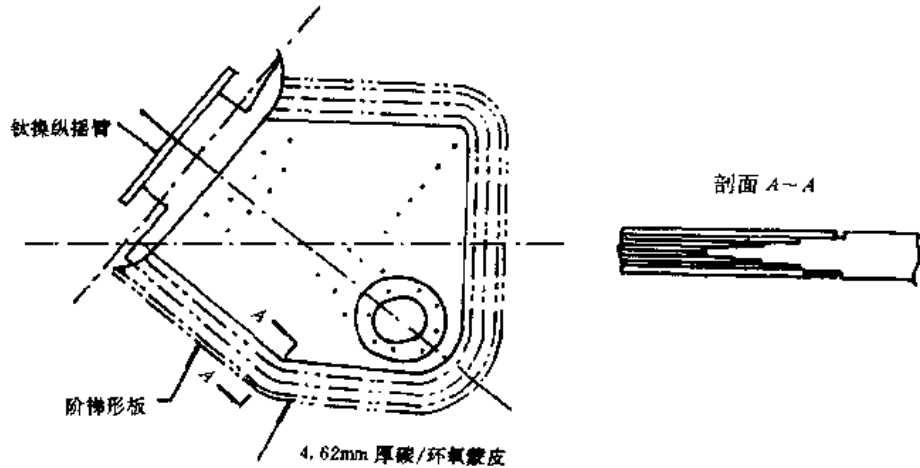


图 2.23 全动平尾摇臂与蒙皮的阶梯形搭接

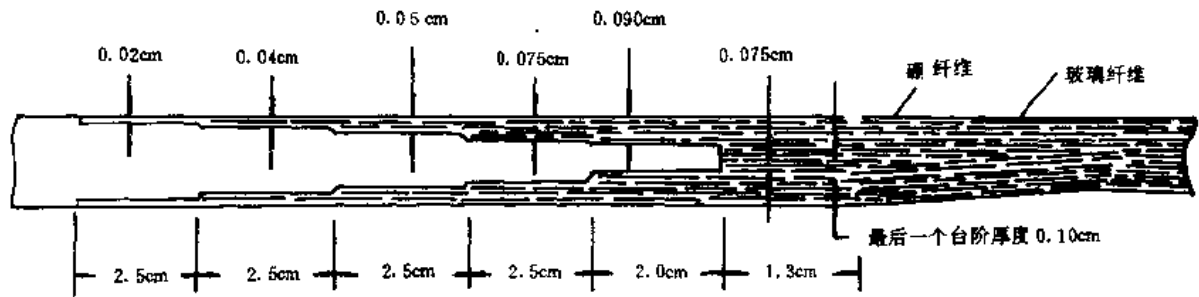


图 2.24 F-14 全动平尾根部的阶梯形搭接

d. 降低胶接连接应力集中和剥离应力的措施

胶接连接设计应尽量减少由于偏心和不对称在结构中产生的剥离应力,如采用对称双搭接形式,在双搭接中增加外搭接板的弯曲刚度,在单搭接中边缘斜削或制倒角等。图 2.25 以单

搭接为例给出了降低应力集中的三种措施。

单搭接由于偏心,在连接的两端存在很高的应力集中,胶层剥离应力使胶接件过早破坏。如在单搭接连接处布置一个充分刚硬的横向元件作支持,则可大大改善单搭接的受力状态(图 2.26)。采用斜面搭接和阶梯形搭接也是降低剥离应力的有效方法,与斜面搭接相比,阶梯形搭接不仅有较好的工艺性,而且通过调整结构参数,可以获得较高的结构效率。Hart-Smith 通过深入研究指出,阶梯形搭接连接中末端台阶既不能太厚,也不能太长,合适的搭接长度为 9.5mm,钛连接末端厚度为 0.76mm,否则可能发生早期疲劳破坏,其他台阶长度 12.7~19.1mm,台阶高度不大于 0.5mm(图 2.24)。

e. 蒙皮(腹板)的加强方法

当蒙皮(腹板)需加强时,推荐采用“T”形件,不用角形件。因为若有拉力存在,极易在角形加强件的转角处产生剥离,在转角处加填料有助于防止过早剥离(图 2.27)。当采用“T”形件加强时,如有拉力作用,也要注意防止剥离,型材边缘斜削及型材与腹板的合理匹配可以改善边缘剥离情况。图 2.28 给出了 T 形加强件的应力分布。

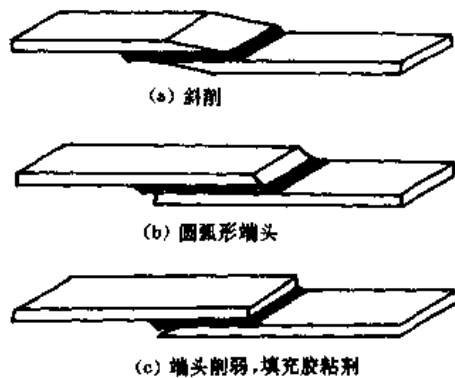


图 2.25 降低应力集中的设计措施

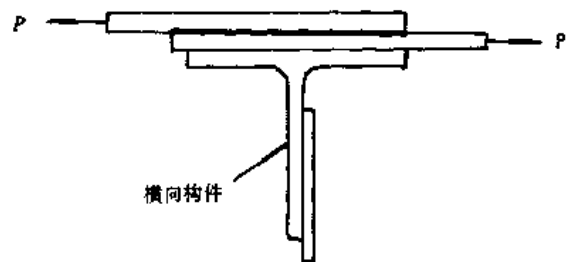


图 2.26 有横向支撑的单搭接连接

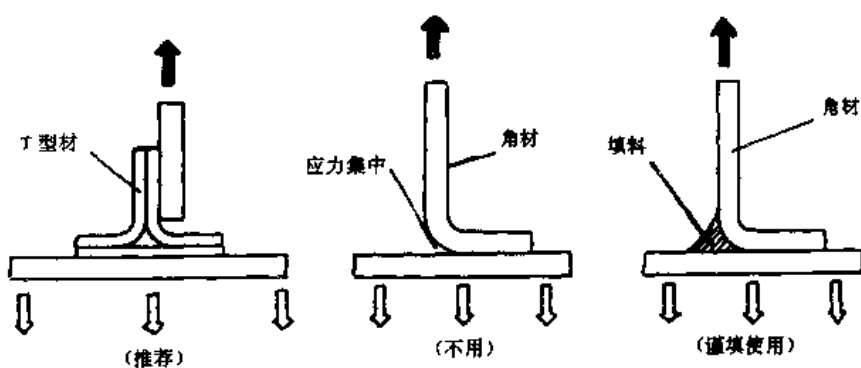


图 2.27 角形加强件与蒙皮的胶接

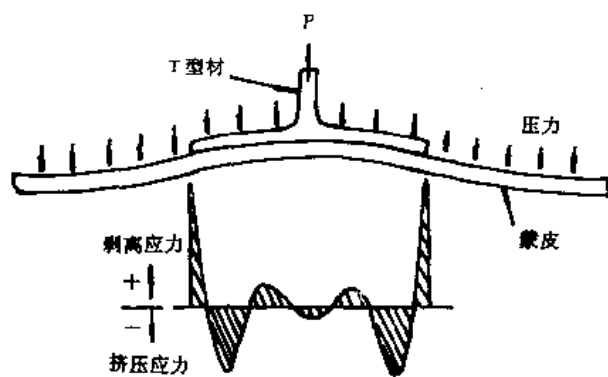


图 2.28 “T”形加强件的应力分布

f. 注意胶接结构中的热应力

碳/环氧、硼/环氧与金属(如钛、不锈钢)胶接时,应注意由于热膨胀不同在结构中产生的热应力(如固化时因膨胀系数不同产生的残余应力),特别是在高的工作温度下,因为热应力与使用温度和固化温度差成正比。合理的选择层压板的铺层形式,可使热应力减少。

g. 避免产生电偶腐蚀

复合材料与金属胶接,由于它们之间的电极电位不同,应注意防止电偶腐蚀。金属件表面应经适当的表面处理,尽量避免碳纤维复合材料与铝合金直接胶接,它们之间应设置隔离层。

h. 防止水气进入胶层

由于胶层吸湿,即使吸收少量水气也会危害胶接结构,采用适当的密封是防止水气进入的有效措施(参见 2.6.3 节)。

i. 工装设计与加工

胶接连接的质量受工装影响较大,所以胶接使用的工装应是精心设计和加工的,以使热变形和残余应力最小,并能均匀地对被胶接件加压。

j. 质量控制

胶接质量应严格按图 2.29 和图 2.30 对不同部位所规定的缺陷允许值进行控制。

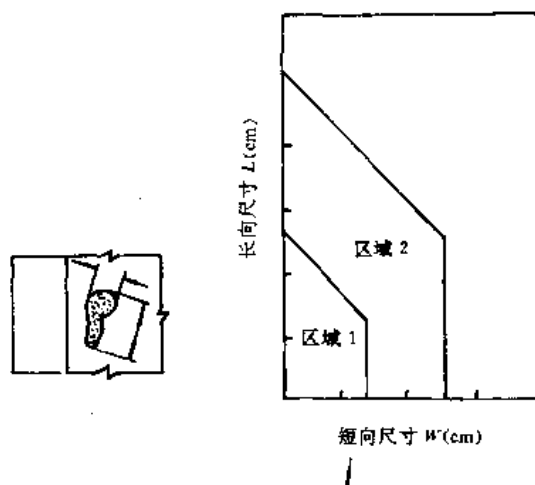


图 2.29 可以接受的胶接缺陷尺寸

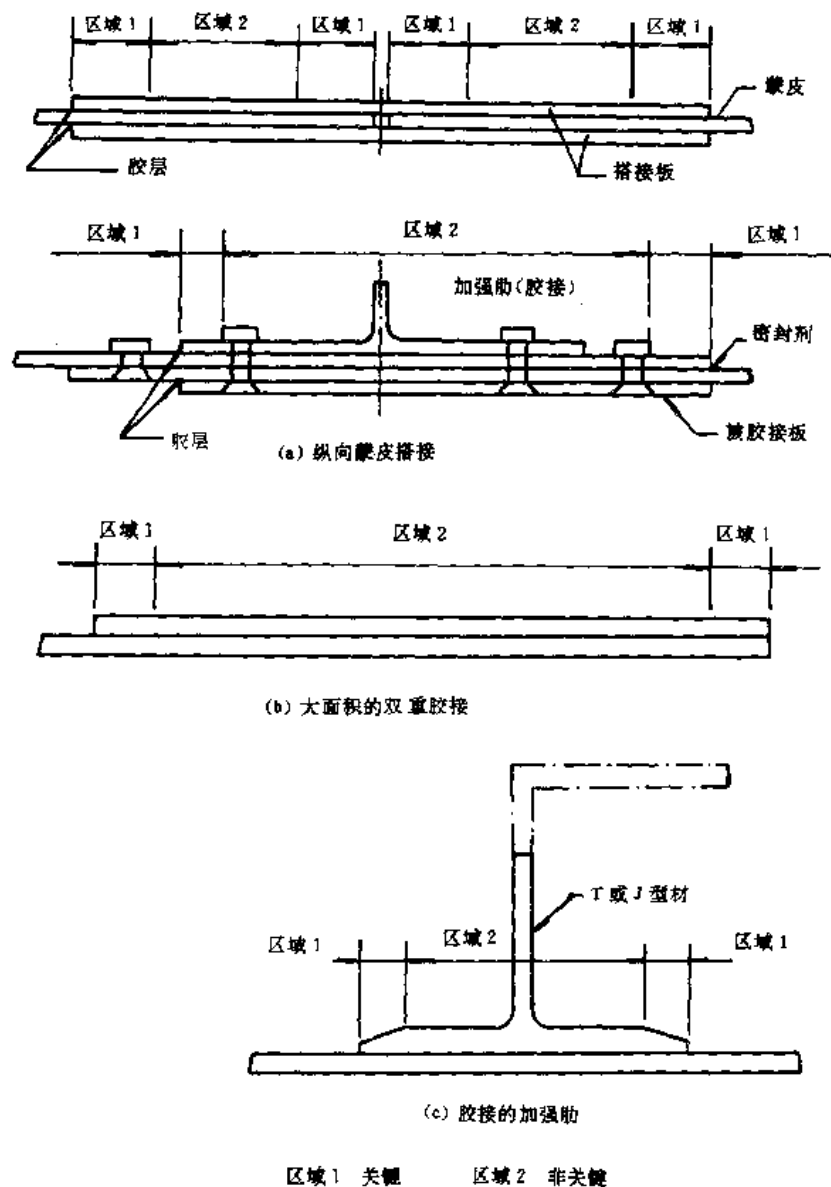


图 2.30 胶接连接典型的质量控制区域划分

2.4 胶接缺陷及其检测

2.4.1 缺陷类型及允许值

胶接连接常见的缺陷是脱胶、裂缝、空隙、胶层厚度变异、固化不完全等。其中,脱胶、裂缝是主要的。

任何胶接缺陷都将导致载荷在整个胶层上的重新分布而使胶层不连续处应力增加。当脱胶或裂缝尺寸相对胶层长度来说比较小时,应力增加得并不明显。缺陷尺寸增大,应力显著增加,但达到多大而不被允许?这就需制定质量标准。在目前我国尚未建立胶接质量标准的情况下,建议参考 ASTM STP749 的规定,对胶接进行质量控制。图 2.29 及图 2.30 给出了三个不同结构在区域 1(关键区域)和区域 2(非关键区)可以接受的缺陷尺寸。由图可以看出,允许值

与所在区域的关键程度有关。图 2.31 至图 2.34 示出的是无缺陷胶接连接正常的胶层应力分布及不同部位存在缺陷时胶层应力分布情形。

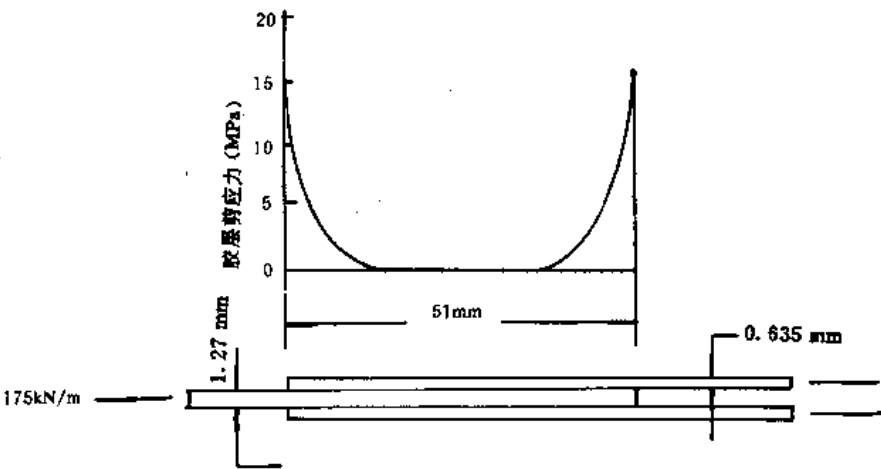


图 2.31 无缺陷胶接连接的胶层剪应力

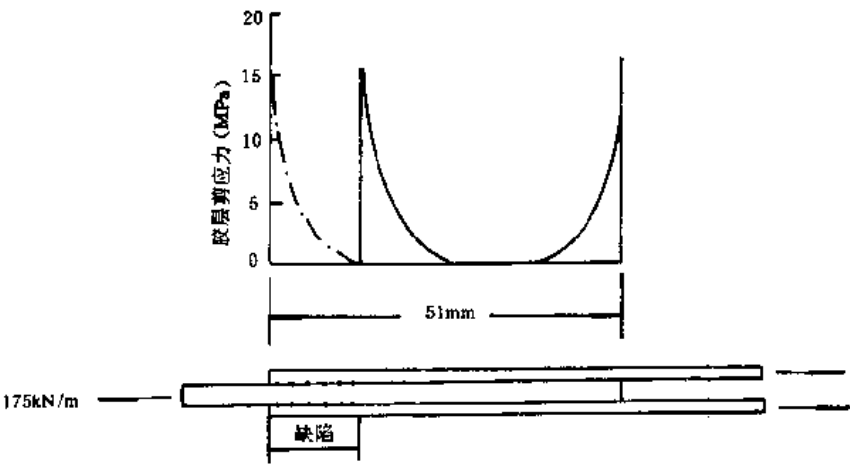


图 2.32 含缺陷胶接连接的胶层剪应力

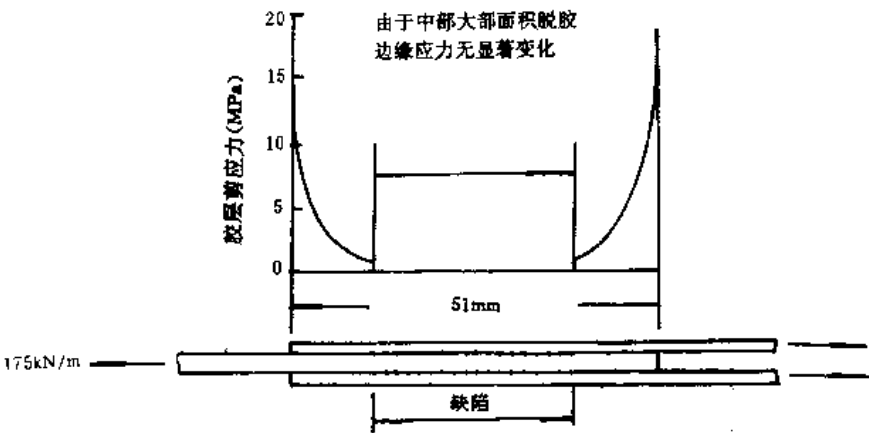


图 2.33 含缺陷胶接连接的胶层剪应力

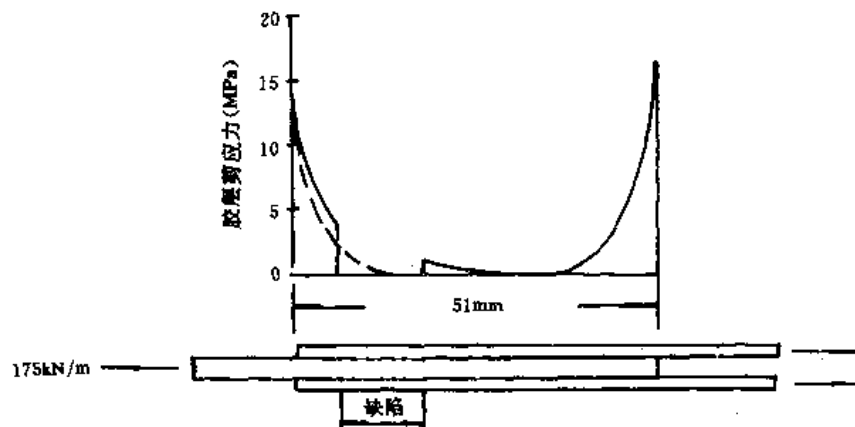


图 2.34 含缺陷胶接连接的胶层剪应力

2.4.2 缺陷的检测

胶接连接缺陷,可以采用各种无损检测方法来探明。表 2.4 摘要给出了各种方法的适用范围。

表 2.4 检测胶接连接缺陷的方法

	射线		γ 射线	热象	超声	声发射	红外	液体渗透	感应电流
	X	中子							
脱 胶	0			0	0	0	0		
欠固化				0	0	0			0
含量变异		0							
密 度	0		0		0	0			
厚 度	0		0		0	0			0
空隙率	0		0		0	0		0	0
裂 缝	0		0		0	0		0	
分 层	0			0	0	0	0	0	0

* 用 X 射线检查分层,分层需与 X 射线束方向相同

虽然上表列出了九种检测方法,但在我国研究和应用得比较广泛的是超声检测法。新近研制的 FCC-A-1 型复合材料检测仪,对三种结构(复合材料与金属胶接、复合材料与复合材料胶接及复合材料板与蜂窝芯胶接)胶层质量均可进行检测。

a. 检测原理

FCC-A-1 型复合材料检测仪是一种射频超声检测仪。与普通视频超声检测仪不同,对换能器接收到的回波信号,能不失真地进行放大处理,保持了回波信号的相位、幅度、频度等信息。人们可以依据这些信息量对缺陷的类型进行定性、定量的无损检测。

b. 缺陷波形分析

当一束射频超声入射到复合材料与金属胶接的胶层界面时,呈图 2.35 所示的波形。图 2.35a 所示的 u_f 是复合材料的上表面波, u_c 是胶层反射波, u_b 是金属底面波。该图是胶接质量良好的波形。如果胶层有脱胶等缺陷,其波形如图 2.35b 所示,这时胶层反射波幅度远大于

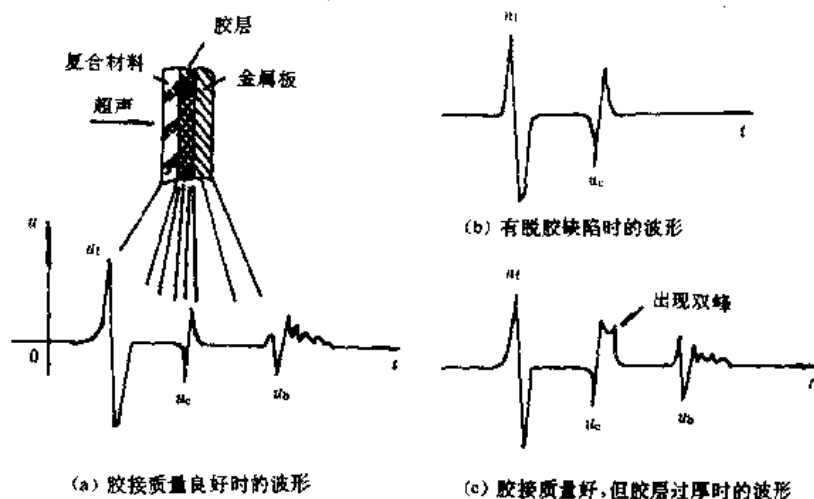


图 2.35 复合材料与金属胶接的胶层质量检测

良好状态的 u_c 波,同时金属件底面波 u_b 消失。如果胶接质量良好,但胶层较厚,这时 u_c 波会出现双峰,如图 2.35c 所示。

当一束射频超声波入射到复合材料与复合材料胶接的胶层时,呈图 2.36 所示的波形。图 2.36a 中的 u_f 、 u_c 物理意义与图 2.35a 相同,而 u_b 代表复合材料板底波。图 2.35a 是胶接质量良好的波形,满足 $u_c \leq u_b$, $u_b \neq 0$ 的条件。如有缺陷,其波形如图 2.36b 所示。这时胶层界面反射波的幅度 u_c 远大于胶接质量良好的 u_c ,且 u_b 消失。

对复合材料与蜂窝夹芯胶接时胶层缺陷的检测,与上述两种结构的检测方法相同,不再重复。

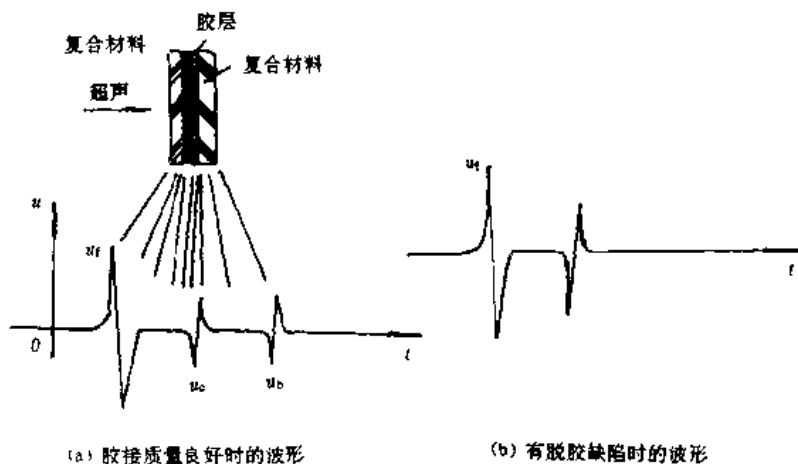


图 2.36 复合材料与复合材料胶接质量检测

2.5 胶接连接的静强度分析

实践表明,胶接连接的线弹性分析是比较保守的。为此,本节根据弹-塑性分析法^[8-10],将给出四种胶接连接的静强度分析方法。相应计算程序 A4EI 见参考资料[11]。用这些方法进行分析前,需针对实际被胶接件和所选胶粘剂,事先测出类似于图 2.11 的胶层剪应力-应变曲线

及其他特性参数。

应指出的是,下述各方法给出的设计参数是仅考虑静强度的结果,工程应用时,应综合考虑其他因素,特别是环境的长期影响。应通过必要的试验最后确定设计参数。

2.5.1 单搭接连接

由于存在几何非线性,单搭接连接分析是极困难的。这里,根据资料[8]所作的工作,给出了等刚度单搭接($E_1 t_1 = E_2 t_2 = Et$)的设计方法,并讨论了刚度不等及热不匹配的影响。

2.5.1.1 等刚度连接的分析方法

a. 给出连接尺寸及被胶接件与胶层的特性(图 2.37):

被胶接件特性:

$E, t, \nu, [\sigma_{pe}], [\sigma]$

σ_{max} = 被胶接件最大设计应力,应不大于

被胶接件许用应力 $[\sigma]$ 。

胶层特性:

$\tau_p, h, E_c, [\sigma_{pe}],$

$C = l/2$ = 搭接长度的一半。

b. 确定单搭接偏心系数 K (许用载荷 P 的函数):

$$K = 1 / (1 + \xi c + \xi^2 c^2 / 6) \equiv f(P) \quad (2.1)$$

而搭接板弯曲应力分布系数:

$$\xi^2 = \frac{12P(1-\nu^2)}{Et^3} = \frac{P}{D} \quad (2.2)$$

D = 被胶接件弯曲刚度

c. 通过迭代解 P :

$$P = \frac{t[\sigma]}{1 + 3K(1+h/t)} = \frac{t[\sigma]}{1 + 3f(P)(1+h/t)} \quad (2.3)$$

注:上述方程(2.3)是从下述(2.4)式求得的:

$$\sigma_{max} = \sigma_{av} + 3K\sigma_{av}(1+h/t) \leq [\sigma] \quad (2.4)$$

其中: $\sigma_{av} = \frac{P}{t}$, 即被胶接件由于轴向载荷引起的平均应力;

$3K\sigma_{av}(1+h/t)$ = 被胶接件由于载荷偏心引起的最大弯曲应力。

d. 连接效率 η :

$$\eta = \frac{P}{t[\sigma]} \quad (2.5)$$

e. 胶层应力校核:

$$\tau_{av} = P/l \leq \tau_p \quad (2.6)$$

f. 确定最大剥离应力:

$$\sigma_{pe} = \sigma_{av} K(1+h/t) \left[\frac{3E_c(1-\nu^2)t}{2Eh} \right]^{1/2} \quad (2.7)$$

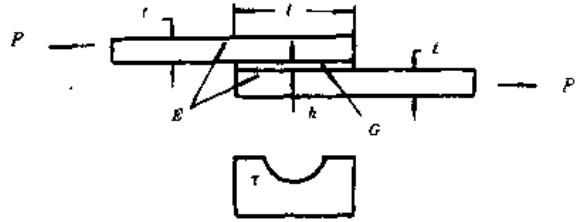


图 2.37 单搭接胶接连接

等刚度单搭接连接的解如图 2.38 所示。

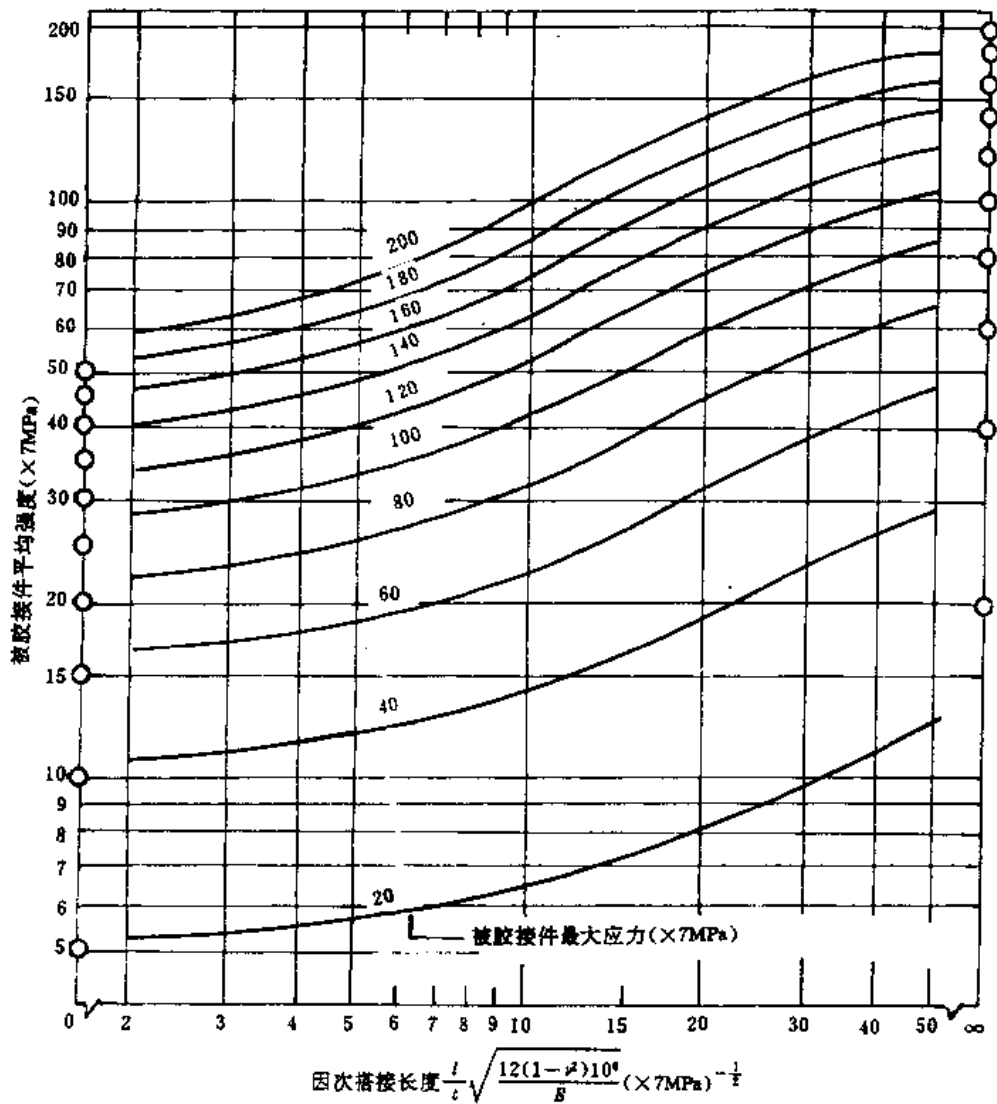


图 2.38 等刚度单搭接连接被胶接件的极限载荷

2.5.1.2 等刚度单搭接连接的设计举例

a. 已知被胶接件的特性和尺寸为：

$$E=71410 \text{ MPa}; \quad [\sigma_{pe}]=48.28 \text{ MPa};$$

$$t=0.0016\text{m}; \quad [\sigma]=275.9\text{MPa}$$

$$\nu=0.33$$

所选胶粘剂特性为：

$$\tau_p=38.48 \text{ MPa}; \quad E_c=3448 \text{ MPa}$$

$$h=0.000127 \text{ m};$$

$$\text{令 } l/t=50. \quad \therefore l=0.08 \text{ m}$$

$$c=0.04\text{m}$$

b. 确定 K 值:

$$\xi^2 = 12P(1-\nu^2)/(Et^3) = 0.03656P;$$

$$\xi = 0.1912\sqrt{P};$$

$$K = 1/(1 + \xi C + \xi^2 C^2/6) = \frac{1}{1 + 0.007648\sqrt{P} + 9.749 \times 10^{-6}P}.$$

c. 通过迭代求 P 值:

$$P = \frac{t[\sigma]}{1 + 3K(1 + h/t)} = \frac{(0.0016)(275.90 \times 10^6)}{1 + \left(\frac{3.238}{1 + 0.007648\sqrt{P} + 9.749 \times 10^{-6}P}\right)},$$

经计算 $P = 0.3191 \times 10^6 \text{ N/m}$

d. 连接效率 $\eta = P/t[\sigma] = 72.26\%$ 。

e. 胶层平均剪应力:

$$\tau_{av} = P/t = 3.989 \text{ MPa};$$

$$\tau_{max} = \tau_p = 34.48 \text{ MPa};$$

胶层平均剪应力比最大应力小得多:

$$\tau_{av}/\tau_p = 0.1036 \ll 1.$$

f. 确定最大剥离应力:

$$K = 0.1186;$$

$$\sigma_{pe} = \frac{PK(1 + h/t)}{t} \left[\frac{3E_c(1 - \nu^2)t}{2Eh} \right]^{1/2} = 23.03 \text{ MPa}$$

可见最大剥离应力 σ_{pe} 小于 $[\sigma_{pe}]$ 。

2.5.1.3 刚度不等和热不匹配问题

由于刚度不等,单搭接连接两端弯矩不等,因此,需对不等刚度连接作更加深入的分析。由于定量给出显函数形式的解析解很困难,资料[2-8]利用计算机迭代,求出了隐函数方程的解。

图 2.39 用无因次化形式描述了同一种各向同性材料的两个被胶接件由于刚度不等所引起的强度下降情形。结果表明,两个薄的被胶接件要比一薄、一厚的强。原因是:在载荷作用下,前者两个被胶接件变形量相同,后者变形主要集中在薄的被胶接件一端。同样,图 2.40 描述了由于刚度不等而使剥离应力增加的情形。需要注意的是,由于计算机程序中采用了许多简化,不能将图中结果外推到薄的被胶接件、短搭接或不同材料被胶接件的情形中去。无论如何,从不等刚度单搭接连接分析中可以得出这样一个重要结论:不等刚度单搭接连接效率比等刚度的要低得多,应力求避免采用。

两个被胶接件热不匹配将引起单搭接连接的初始弯曲。弯曲变形将影响载荷偏心,进而改变连接区两端弯矩,反过来又影响胶层剪切和剥离应力的分布。这样,一端变得比另一端更加危险,所以,胶接件承载能力往往要下降。这个问题,这里不作定量分析。

从理论上说,载荷偏心程度是受被胶接件长度影响的。由于无法获得连接区两端弯矩的显函数表达式,必须针对具体情况采用迭代法求解。

如前所述,对带支撑(如梁、框)单搭接接头,由于变形受到限制,可以用双搭接的计算方法来分析。

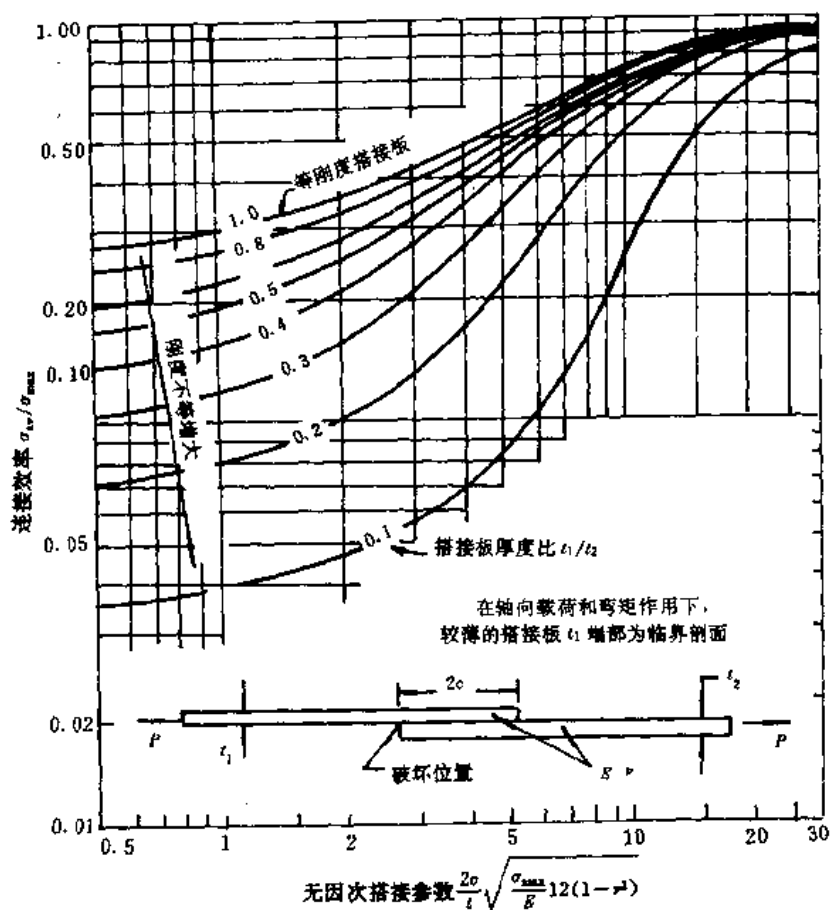


图 2.39 被胶接件刚度不等对单搭接胶接连接被胶接件弯曲强度的影响

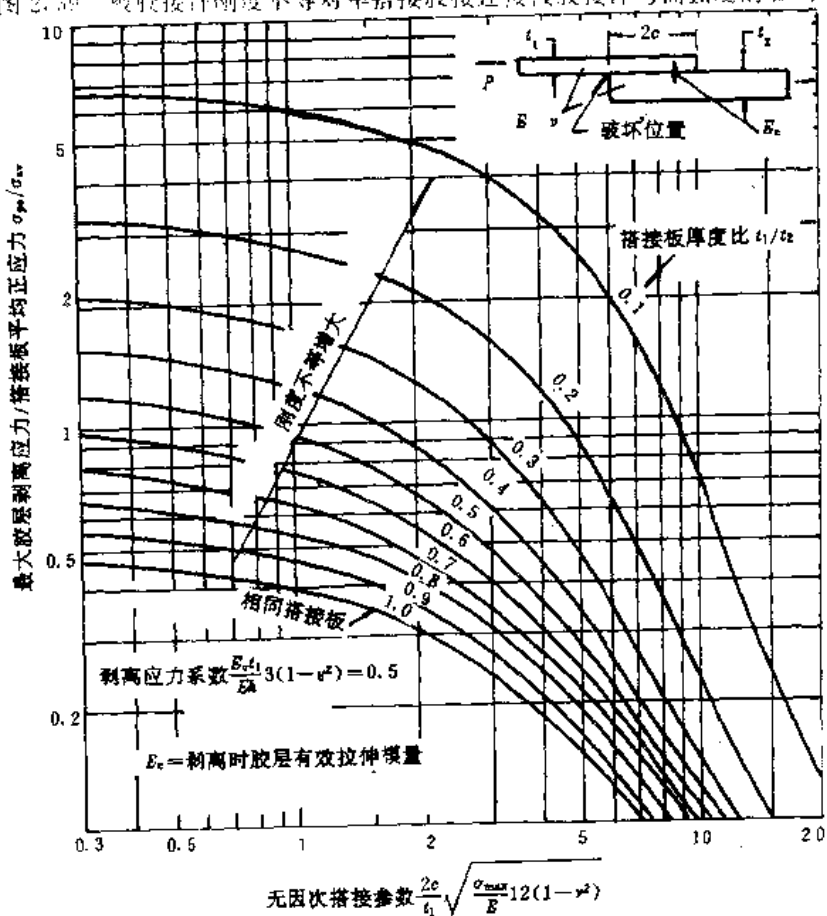


图 2.40 被胶接件刚度不等对单搭接胶接连接剥离强度的影响

2.5.2 双搭接连接

双搭接连接设计方法是根据资料[9]给出的。所用符号在图 2.41 中作了说明。

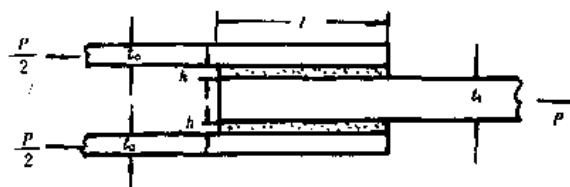


图 2.41 双搭接胶接连接

2.5.2.1 设计方法

a. 给定被胶接件和胶层特性：

- 根据最恶劣的环境条件选择胶粘剂；
- 若仅知道一个被胶接件特性，初步选定与之匹配的另一被胶接件刚度：

$$E_o(t_{o1} + t_{o2}) = E_i t_i$$

内被胶接件参数：

$$t_i, E_i, \nu_i, [\sigma]_i, \alpha_i, [\sigma_{pe}]_i;$$

外被胶接件参数：

$$t_o, t_{o2}, E_o, \nu_o, [\sigma]_o, \alpha_o, [\sigma_{pe}]_o;$$

胶层参数：

$$G, \tau_p, \gamma_e, \gamma_p, h, E_c.$$

b. 由下式决定搭接长度 l ：

$$\lambda^2 = \frac{G}{h} \left[\frac{2}{E_o(t_{o1} + t_{o2})} + \frac{2}{E_i t_i} \right] \quad (2.8)$$

$$l_i = \frac{2}{\lambda} \sqrt{\frac{2\gamma_p}{\gamma_e}} \quad (2.9)$$

$$l = l_i + \frac{6}{\lambda} \quad (2.10)$$

其中, l_i 是胶层剪应力的弹性槽宽度为零, 即胶层全部进入塑性时的搭接长度, $6/\lambda$ 是为了充分保证胶层槽形分布的剪应力最小值不大于最大剪应力的 10%。若不考虑耐久性, 只保证连接强度不变, 可取短的搭接长度 $l = l_i + 2/\lambda$ 。

制造公差应附加到搭接长度中去。

c. 确定拉伸加载条件下的胶层破坏载荷：

$P =$ 下述二式中的较小值：

$$(\alpha_o - \alpha_i) \Delta T E_i t_i + \left[2\tau_p h \left(\frac{\gamma_e}{2} + \gamma_p \right) 2E_i t_i \left(1 + \frac{E_i t_i}{E_o(t_{o1} + t_{o2})} \right) \right]^{1/2} \quad (2.11)$$

和

$$(\alpha_i - \alpha_o) \Delta T E_o(t_{o1} + t_{o2}) + \left[2\tau_p h \left(\frac{\gamma_e}{2} + \gamma_p \right) 2E_o(t_{o1} + t_{o2}) \left(1 + \frac{E_o(t_{o1} + t_{o2})}{E_i t_i} \right) \right]^{1/2} \quad (2.12)$$

值得指出的是：

- 需要上述两个方程来决定连接的危险端；
- 对压缩加载，需改变上述方程中带温度项的符号；
- 对剪切加载（见图 2.42）， E_i 和 E_o 用 G_i 和 G_o 代替， λ 用 λ_s 代替，其中，不计热不匹配效应时：

$$\lambda_s^2 = \frac{G}{h} \left(\frac{2}{G_o(t_{o1} + t_{o2})} + \frac{2}{G_i t_i} \right) \quad (2.13)$$

d. 确定剥离应力：

$$\sigma_p = \tau_p \left[\frac{3E_c(1-\nu_o^2)t_o}{E_o h} \right]^{1/4} \quad (2.14)$$

- 根据剥离应力许用值可获得安全储备；
 - 根据剥离应力许用值，可获得厚度范围。
- e. 确定被胶接件的破坏载荷：
- 对轴向加载， P 是 $[\sigma]_o(t_{o1} + t_{o2})$ 和 $F_i t_i$ 中的小者；
 - 对剪切加载（参见图 2.42）， P 是 $[\tau]_o(t_{o1} + t_{o2})$ 和 $[\tau]_i t_i$ 中的小者。

f. 如果必要，用迭代法求出最小载荷，以决定连接强度和破坏模式。

2.5.2.2 等刚度双搭接设计举例

等刚度双搭接指 $E_o(t_{o1} + t_{o2}) = E_i t_i$ 的情况。本例考虑的是不计及热效应的等刚度双搭接问题。已知内被胶接件特性，确定双搭接连接几何尺寸和拉伸强度。

内被胶接件数据：

$$\begin{aligned} t_i &= 0.00267 \text{ m;} \\ E_i &= 64830 \text{ MPa;} \\ G_i &= 19310 \text{ MPa;} \\ \nu_i &= 0.44; \\ \alpha_i &= 1.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}; \\ [\sigma]_i &= 586.21 \text{ MPa;} \\ [\tau]_i &= 186.21 \text{ MPa;} \\ [\sigma_{pe}] &= 48.28 \text{ MPa;} \\ (E t)_i &= 6483 \times 10^3 \times 0.00267 \text{ N/m.} \end{aligned}$$

a. 选铝为外被胶接件。

与内被胶接件刚度匹配的是：

$$\begin{aligned} E_o &= 72410 \text{ MPa,} & \nu_o &= 0.33; \\ [\sigma]_o &= 448.3 \text{ MPa;} & \alpha_o &= 23.4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C.} \end{aligned}$$

令：

$$t_{o1} = t_{o2} = t_o$$

由

$$2E_o t_o = E_i t_i$$

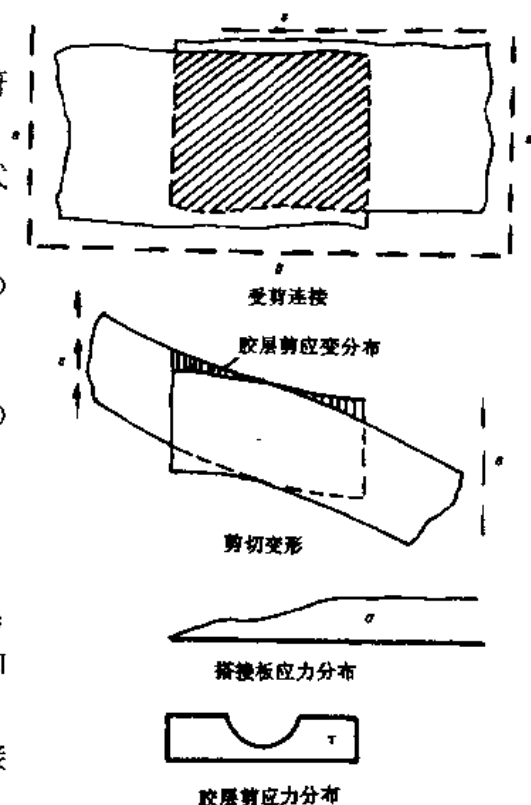


图 2.42 承剪双搭接接头

$$\therefore t_0 = 0.001194 \text{ m}$$

选定的韧性胶粘剂特性为:

$$\begin{aligned} \tau_p &= 34.48 \text{ MPa}; & \gamma_e &= 0.1; \\ G &= 344.8 \text{ MPa}; & \gamma_p &= 1.0; \\ h &= 0.000127 \text{ m}; & E_c &= 3448 \text{ MPa}; \\ [\sigma_{pe}] &= 68.97 \text{ MPa (胶接界面处)}. \end{aligned}$$

b. 确定搭接长度:

$$\lambda^2 = \frac{344.8}{0.000127} \left[\frac{2}{72410(2)(0.001194)} + \frac{2}{64830 \times 0.00267} \right] = 6.28 \times 10^4 \left(\frac{1}{\text{m}^2} \right)$$

$$\lambda = 2.506 \times 10^2 \left(\frac{1}{\text{m}} \right)$$

$$l = \frac{2}{250.6} \sqrt{\frac{2 \times 1}{0.1}} + \frac{6}{250.6} = 0.05963 \text{ m}$$

取: $l = 0.06 \text{ m}$

c. 确定胶层强度(不计热效应):

$$\begin{aligned} P &= [2(34.48 \times 10^6)(0.000127)(1.05)(2)(6483 \times 10^7)(0.00267)(2)]^{1/2} \\ &= 2.52 \text{ N/m} \end{aligned}$$

d. 确定剥离应力:

$$\sigma_{pe} = 34.48 \left[\frac{3(3448)(1-0.33^2)(0.1194)}{72410(0.000127)} \right]^{1/4} = 36.07 \text{ MPa}$$

这个值小于许用值 48.28 MPa (M. S = 33.8%), 所以不会发生剥离破坏。

e. 确定被胶接件破坏载荷:

对内被胶接件:

$$P_i = [\sigma]_i t_i = 586.2 \times 10^6 (0.00267) = 1565 \times 10^3 \text{ N/m}$$

对外被胶接件:

$$P_o = [\sigma]_o 2t_o = 2(448.3 \times 10^6)(0.001194) = 1070 \times 10^3 \text{ N/m}$$

f. 检查热不匹配效应

$$(\alpha_o - \alpha_i) \Delta T E t = 21.6 \times 10^{-6} (64830 \times 10^6 \times 0.00267) \Delta T = 3739 \Delta T (\text{N/m}^\circ \text{C})$$

对于温度变化大的 ΔT 值, 热强度将显著下降。

g. 不计热效应后, 由步骤 e 求得的最小强度是 $1070 \times 10^3 \text{ N/m}$ (即铝质被胶接件位伸破坏)。

一般, 在不考虑热效应的情况下, 等刚度双搭接连接的解如图 2.43 所示。

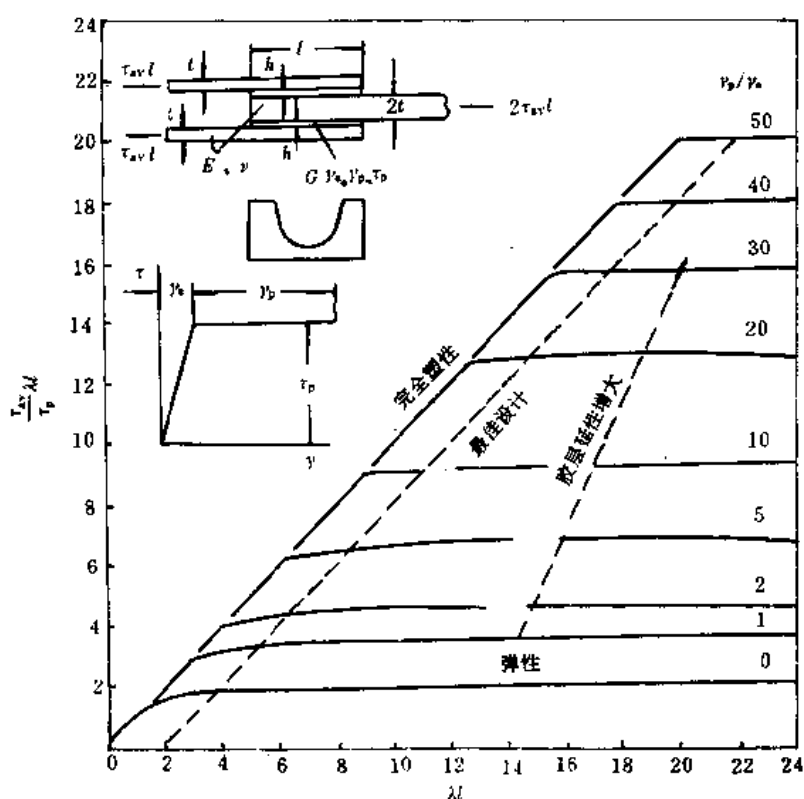


图 2.43 等刚度双搭接胶接连接剪切强度

2.5.2.3 不等刚度双搭接设计举例

本例允许被胶接件不等刚度(即 $E_s(t_{o1} + t_{o2}) \neq E_s t_i$), 并在计及热效应的情况下来确定连接尺寸和强度。

内被胶接件数据:

$$\begin{aligned} t_i &= 0.00747 \text{ cm}; & \alpha_i &= 1.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}; \\ E_i &= 64830 \text{ MPa}; & [\sigma_{pe}] &= 48.28 \text{ MPa}; \\ [\sigma]_i &= 586.2 \text{ MPa}; & \nu_i &= 0.44 \\ (E t)_i &= 4.843 \times 10^8 \text{ N/m} \end{aligned}$$

胶层数据:

$$\begin{aligned} \tau_p &= 34.48 \text{ MPa}; & \gamma_p &= 1.0 \\ G &= 344.8 \text{ MPa}; & h &= 0.000127 \text{ m}; \\ \gamma_e &= 0.1; & E_c &= 3448 \text{ MPa} \end{aligned}$$

a. 确定外被胶接件:

$$\begin{aligned} E_o &= 72410 \text{ MPa}; & \nu_o &= 0.33; \\ [\sigma]_o &= 448.3 \text{ MPa}; & \alpha_o &= 23.4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

对本例, 取 $t_{o1} = t_{o2} = 0.00396 \text{ m}$

$$(E t)_o = E_o(t_{o1} + t_{o2}) = 72410 \times 10^3 \times 2 \times 0.00396 = 573.8 \times 10^6 \text{ N/m}$$

b. 确定搭接长度:

$$\lambda^2 = \frac{344.8 \times 10^6}{0.000127} \left[\frac{2}{2(286.8 \times 10^6)} + \frac{2}{484.3 \times 10^6} \right] = 20660 \left(\frac{1}{\text{m}^2} \right)$$

$$\lambda = 143.6 \left(\frac{1}{\text{m}} \right)$$

$$l = \frac{2}{143.6} \sqrt{\frac{2 \times 1}{0.1}} + \frac{6}{143.6} = 0.104 \text{ m}$$

c. 确定胶层强度

$$P_1 = \left[2(34.48 \times 10^6)(0.000127)(1.05)(2)(4.843 \times 10^8) \left(1 + \frac{1.844 \times 10^7}{2 \times 286.8 \times 10^6} \right) \right]^{1/2}$$

$$= 4051 \times 10^3 \text{ N/m}$$

$$P_2 = \left[2(34.48 \times 10^6)(0.000127)(1.05)(2)(2 \times 2.868 \times 10^6) \left(1 + \frac{2 \times 286.8 \times 10^6}{4.843 \times 10^8} \right) \right]^{1/2}$$

$$= 4.8 \times 10^6 \text{ N/m}$$

d. 确定热不匹配系数:

$$C_1 = (\alpha_a - \alpha_i) \Delta T (E t)_i = 21.6 \times 4.843 \times 10^2 \Delta T = 10460 \Delta T \text{ (N/m}^\circ\text{C)}$$

$$C_2 = (\alpha_i - \alpha_a) \Delta T (E t)_a = -21.6 \times 573.8 \Delta T = -12390 \Delta T \text{ (N/m}^\circ\text{C)}$$

e. 对拉伸加载:

• 连接端部内被胶接件胶接强度:

$$P_i = C_1 + P_1 = 4051 \times 10^3 + 10460 \Delta T \text{ (N/m)}$$

• 外被胶接件胶接强度:

$$P_a = C_2 + P_2 = 4.8 \times 10^6 - 12390 \Delta T \text{ (N/m)}$$

注:不计热效应,连接端部内被胶接件是危险的,但当 $\Delta T \geq 15^\circ\text{C}$ 时,外被胶接件是危险的。

• 对压缩加载:

$$P_i = 4051 \times 10^3 - 10460 \Delta T \text{ (N/m)}$$

$$P_a = 4.8 \times 10^6 + 12390 \Delta T \text{ (N/m)}$$

• 结论:热效应能影响危险端面的位置及破坏载荷值。

注:还应记住,温度也影响被胶接件的特性和许用值。

f. 确定剥离应力:

$$\sigma_{pe} = 34.48 \left[\frac{3(34.48)(1 - 0.33^2)(0.00396)}{7241 \times 10^7(0.000127)} \right]^{1/4} = 48.68 \text{ MPa}$$

这个值稍微超过内被胶接件许用值 48.28 MPa。将端部加工成斜削形状,就能保证强度略有富裕。

g. 求被胶接件破坏载荷:

$$P_i = [\sigma]_i t_i = (586.2 \times 10^6)(0.00747) = 4.379 \times 10^6 \text{ N/m}$$

$$P_a = 2[\sigma]_a t_a = 2(448.3 \times 10^6)(0.00396) = 3.551 \times 10^6 \text{ N/m}$$

h. 对剥离应力来说,胶层和被胶接件破坏模式完全一致。热效应将影响破坏模式、位置和载荷值。端头斜削能提高抗剥离强度,但进一步提高,需采用阶梯形搭接或斜面搭接连接。

一般,被胶接件刚度不等而使连接强度下降的情况如图 2.44 和图 2.45 所示。

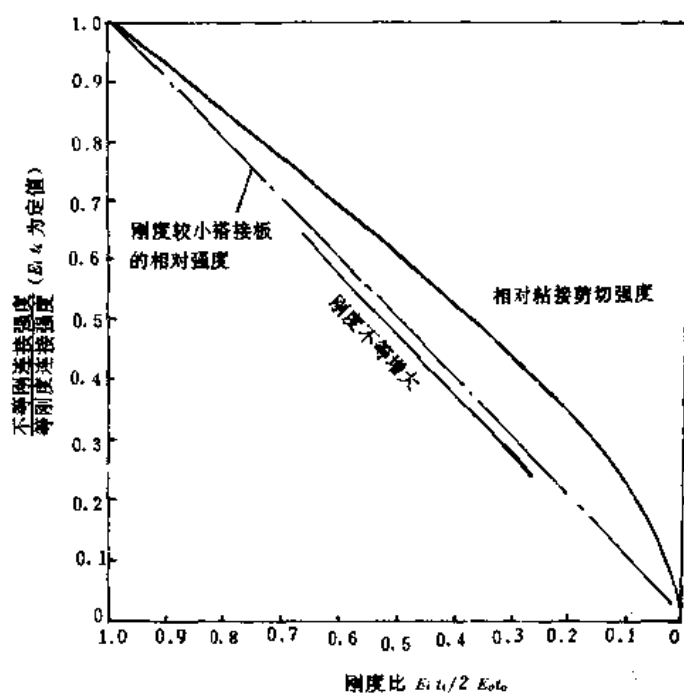


图 2.44 不等刚度双搭接连接的强度下降
(以外边的被胶接件为基准)

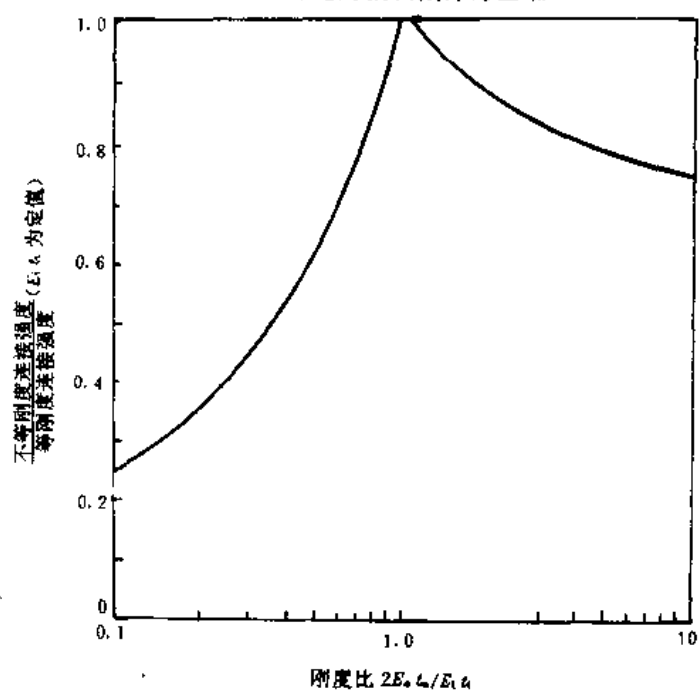


图 2.45 不等刚度双搭接连接的强度下降
(以内被胶接件为基准)

2.5.3 阶梯形搭接连接

阶梯形连接有单面和双面两种(见图 2.14)。对称双面阶梯形搭接连接的每个阶梯可用双搭接的方法来分析。单面阶梯形搭接连接,若因加载偏心而存在较大附加弯矩时,没有可用的理论方法来分析。然而,试验结果表明,对这种连接,可用以下方法来处理:

a. 对两个或三个阶梯的单面阶梯形搭接连接,每个阶梯当作一个单搭接连接来分析(见图 2.46)。

b. 对阶梯数大于 4 的单面阶梯形搭接连接,每个阶梯可当作对称双搭接连接的一半来分析。

不论何种阶梯形搭接形式,均需借助计算机程序,用迭代法先求得载荷在各阶梯中的分配,而后按单搭接或双搭接方法对每个阶梯进行计算。阶梯数愈多、阶梯厚度越小,剥离应力就愈接近于零,计算精度就愈高。详尽分析和计算程序见资料[10]、[11]和[12]。

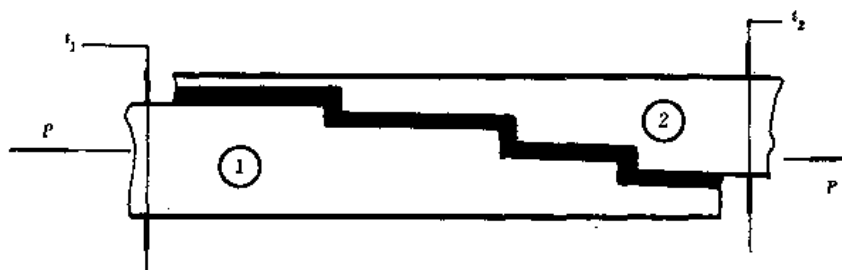


图 2.46 单面梯形搭接接头

2.5.4 斜面搭接连接

由于斜面搭接连接所建立的变系数平衡微分方程无解析解,用弹-塑性数学模型进行分析时^[10],作了若干假设,得到的是一近似解(下限)。本方法就是根据该近似解给出的。这种连接的受力情况如图 2.47 所示。

2.5.4.1 设计方法

a. 给定胶层和被胶接件特性

被胶接件特性:

$$E, t, \alpha, [\sigma]$$

胶层特性:

$$G, h, \tau_p, \gamma_p, \gamma_e$$

注:近似分析要求

$$\gamma_p/\gamma_e > 0.5$$

b. 根据靠近被胶接件薄的一端发生破坏这一情况确定最大搭接长度:

$$Q_{\min} = \arctan \tau_p / [\sigma] \quad (2.15)$$

$$l_{\max} = t / \tan \theta = [\sigma] t / \tau_p \quad (2.16)$$

c. 确定 l^* :

$$\lambda^2 = \frac{G}{h} \left(\frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right) \quad (2.17)$$

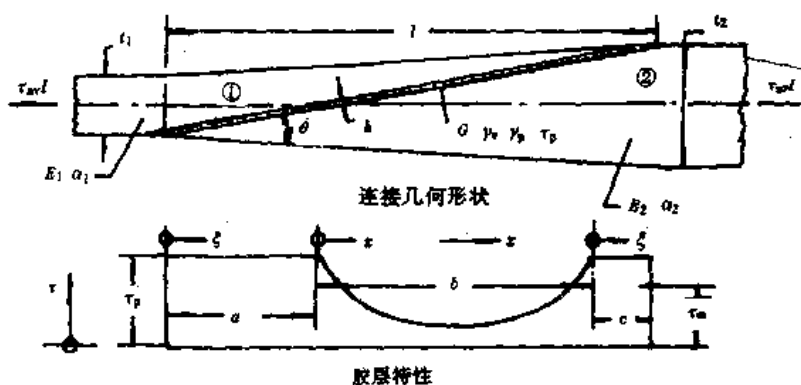


图 2.47 斜面搭接胶接连接

$$E^* \equiv E_1 t_1 / E_2 t_2 \quad 0.2 < E^* < 1.0 \quad (2.18)$$

$$C \equiv \frac{\lambda(\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T}{\tau_p \left(\frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right)} \quad |C| < 2.0 \quad (2.19)$$

$$l^* = \frac{(1+E^*)C}{(1-E^*)\lambda} \pm \sqrt{\left(\frac{(1+E^*)C}{(1-E^*)\lambda} \right)^2 + \frac{4(1+E^*)\gamma_p}{(1-E^*)\gamma_e \lambda^2}} \quad (2.20)$$

d. l^* 代表斜面搭接连接“过渡”搭接长度。

当 $l \leq l^*$, 连接强度可按胶层全部进入塑性来分析 (即 $\tau_{av}/\tau_p = 1.0$)。

当 $l \leq l^*$ 时, 胶层最大承载能力为:

$$P = \tau_p l \quad (2.21)$$

e. 当 $l_{max} \geq l \geq l^*$:

• 用下列方程迭代求解 Ψ

$$\Psi + (1-\Psi) \ln(1-\Psi) = \frac{(1+E^*)\gamma_p/\gamma_e(\lambda l)^2}{(1-E^*) - (1+E^*)C/\lambda l} \quad (2.22)$$

• 利用 Ψ 由下列方程求 τ_{av}/τ_p :

$$\tau_{av}/\tau_p = E^* + \frac{(1+E^*)C}{\lambda l} + \Psi[(1-E^*) - (1+E^*)C/\lambda l] \quad (2.23)$$

• 由下式求胶层最大承载能力:

$$P = (\tau_{av}/\tau_p) \tau_p l \quad (2.24)$$

f. 连接效率 $\eta = P/[\sigma]t$ 。

g. 校核连接的另一端:

• 用 $1/E^*$ 代替 E^* ;

• 用 $-C$ 代替 $+C$ 。

h. 在压缩载荷情况下, 用 $-C$ 代替 $+C$;

i. 在剪切载荷情况下, 用 G_1 和 G_2 代替 E_1 和 E_2 , $C=0$ 。

2.5.4.2 斜面搭接连接特点

在斜面搭接胶接连接分析中, 存在下列一些值得指出的特点:

a. 实际连接中剥离应力很小, 分析时略去。

b. 为了分析需要, 作了如下简化:

$$\gamma_p/\gamma_c > 0.5$$

$$0.2 \leq E^* \leq 1.0$$

$$|c| < 2.0$$

采用这些参数,分析得到的解是下限。

c. 当刚度不等时,“软”的被胶接件端部更危险(对校核胶层强度)。

d. 为检查连接的另一端,分析中交换一下角标 1 和 2。

e. 当 $l \leq l^*$, $p = \tau_p l$;

当 $l > l^*$, $P \rightarrow E^* \tau_p l$, (见图 2.48)

f. 分析中主要的是不等刚度参数。它决定了胶层塑性区的大小,因此,对实际胶接长度而言,胶接强度总也达不到被胶接件的强度。

g. 当两被胶接件刚度不等且无热效应时,可采用弹性分析方法,在整个搭接长度上胶层剪应力分布是均匀的。

h. 设计推荐 $l^* < l < l_{\max}$

i. 图 2.48 和图 2.49 说明了刚度不等及热不匹配所产生的影响。

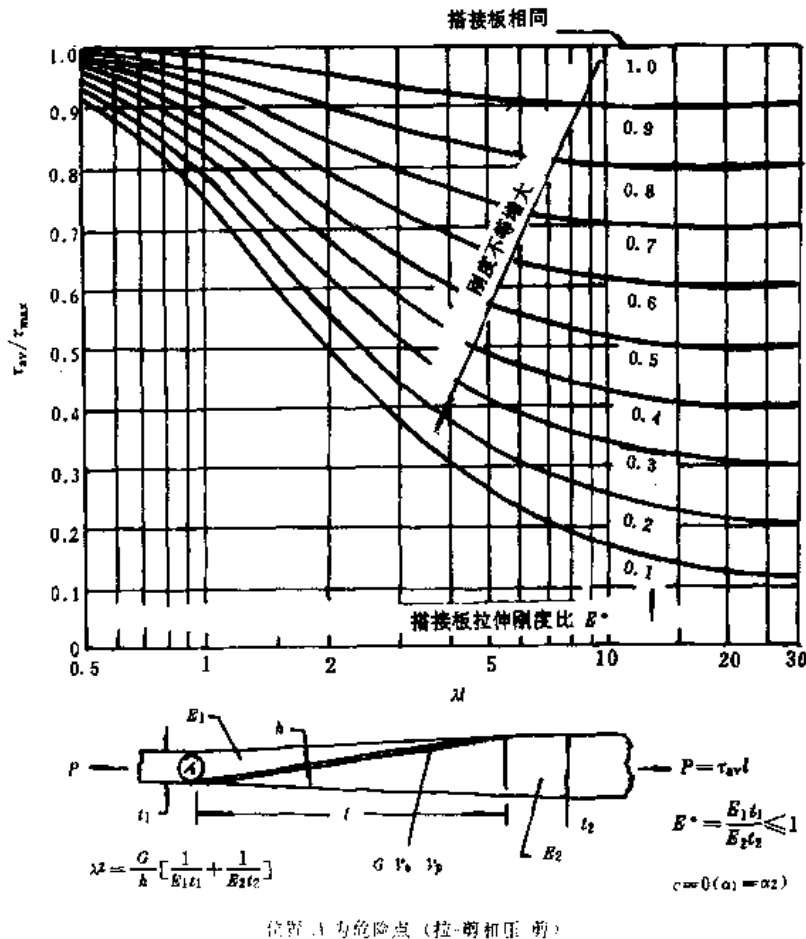
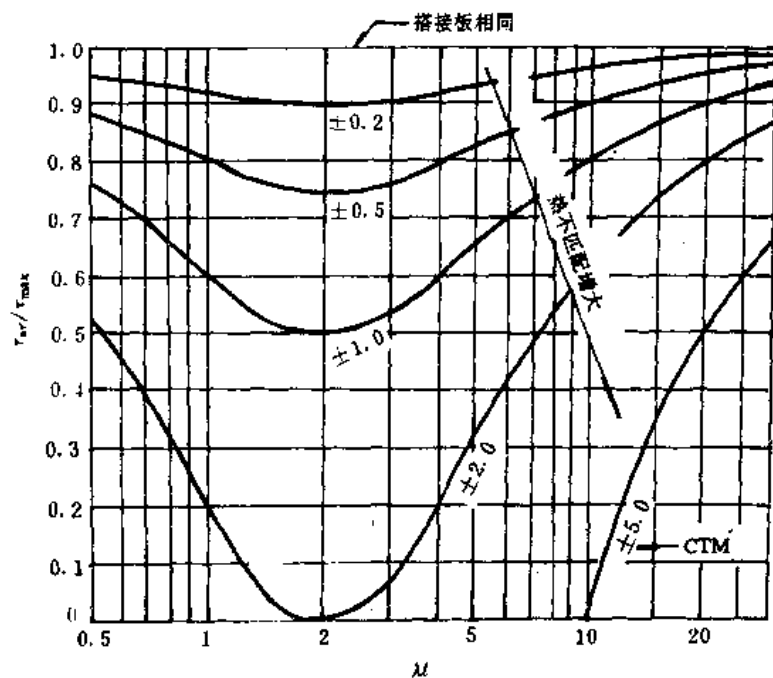


图 2.48 刚度不等对斜面搭接连接强度的影响



$$\lambda^2 = \frac{G}{h} \left[\frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right] \quad C = \frac{(\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T \lambda}{\tau_p \left(\frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right)}$$

当 \$C < 0\$ 和 \$P > 0\$, A 为危险区
 当 \$C > 0\$ 和 \$P < 0\$, A 为危险区
 当 \$C < 0\$ 和 \$P < 0\$, B 为危险区
 当 \$C > 0\$ 和 \$P > 0\$, B 为危险区

图 2.49 热不匹配对斜面搭接连接强度的影响

2.5.4.3 设计举例

例 1: 两被胶接件刚度相差较大(不计热效应)的情况

a. 已知:

$$E_1 = 68970 \text{ MPa}; \quad E_2 = 110350 \text{ MPa};$$

$$t_1 = 0.01905 \text{ m}; \quad t_2 = 0.01905 \text{ m};$$

$$[\sigma]_1 = 634.5 \text{ MPa}; \quad [\sigma]_2 = 862 \text{ MPa}$$

所选胶粘剂的胶层特性为:

$$G = 344.8 \text{ MPa}; \quad h = 0.000127 \text{ m};$$

$$\gamma_p/\gamma_c = 10; \quad \tau_p = 34.48 \text{ MPa}$$

b. 根据被胶接件端部破坏, 求最大搭接长度:

$$\alpha_{\min} = \arctan(34.48/634.5) = 3.11^\circ$$

$$l_{\max} = 634.5 \times 0.01905 / 34.48 = 0.3606 \text{ m}$$

c. 确定 \$l\$:

$$\lambda^2 = \frac{344.8}{0.000127} \left(\frac{1}{68970 \times 0.01905} + \frac{1}{110350 \times 0.01905} \right) = 3358 \left(\frac{1}{\text{m}^2} \right)$$

$$\lambda = 58 \left(\frac{1}{\text{m}} \right)$$

$$E^* = 68970 \times 0.01905 / (110350 \times 0.01905) = 0.625$$

在没有热不匹配效应时 ($c=0$)

$$l^* = \sqrt{(1+E^*)\gamma_p / (1-E^*)\gamma_c \lambda^2}$$

$$= \sqrt{(1.625)(10) / (0.375 \times 3360)} = 0.1136(\text{m})$$

下一步,将根据搭接长度来决定连接强度。

d. 当 $l \leq l^* = 0.1136 \text{ m}$:

$$P = \tau_p l = 34.48 \times 10^6 l$$

e. 当 $l > 0.1136 \text{ m}$

$$\Psi + (1-\Psi)\ln(1-\Psi) = \frac{(1+E^*)\gamma_p/\gamma_c}{(1-E^*)(\lambda l)^2} = 0.0129/l^2$$

f. 一旦假定了 l , 通过迭代即可求得 Ψ 。

g. 将 Ψ 代入方程 (2.23), 可求得 τ_{av}/τ_p :

$$\tau_{av}/\tau_p = E^* + \frac{(1+E^*)C}{\lambda l} + \Psi[(1-E^*) - (1+E^*)C/\lambda l]$$

$$E^* < \tau_{av}/\tau_p < 1.0$$

对这个问题:

$$\tau_{av}/\tau_p = 0.625 + 0.375\Psi = E^* + (1-E^*)\Psi$$

h. 一旦求得 τ_{av}/τ_p , 即可用下式计算连接许用载荷 P :

$$P = (\tau_{av}/\tau_p)\tau_p l$$

i. 由步骤 f, g, 和 h, 可列出表 2.5, 并进而绘成如图 2.50 所示的曲线。对任一给定的设计载荷, 利用曲线可查得所需搭接长度。注意, 当材料或尺寸变化时, 必需重新绘制新曲线。

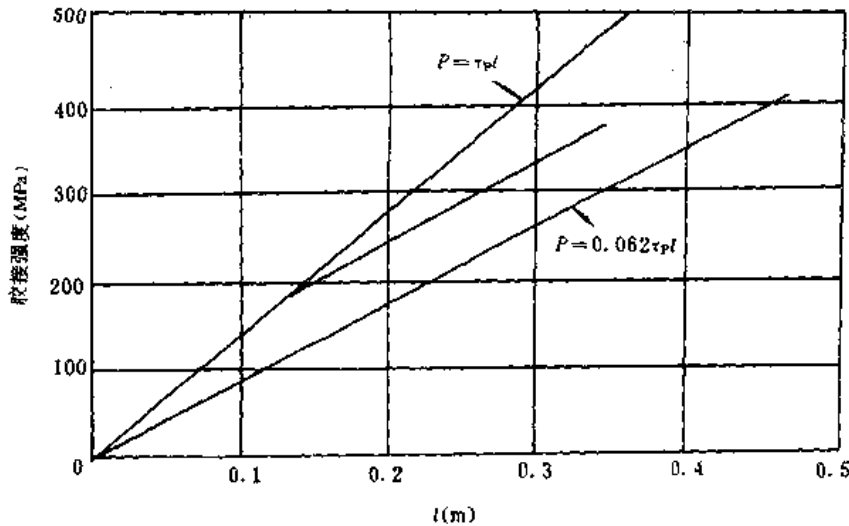


图 2.50 连接强度随搭接长度变化图(特殊设计举例)

表 2.5 连接强度随搭接长度的变化——两被胶接件刚度差别较大
(特殊设计举例)

$l(\text{m})$	Ψ	τ_{av}/τ_p	$P \quad (\text{kN} \cdot \text{m})$
0.1136	1.0	1.0	3.92
0.1143	0.998	0.999	3.94
0.1270	0.950	0.981	4.29
0.1397	0.896	0.961	4.62
0.1524	0.845	0.942	4.96
0.1651	0.797	0.924	5.26
0.1778	0.753	0.907	5.55
0.1905	0.714	0.893	5.87
0.2032	0.677	0.879	6.17
0.2286	0.614	0.855	6.74
0.2540	0.561	0.835	7.32
0.2794	0.516	0.819	7.88
0.3048	0.478	0.804	8.44
0.3302	0.445	0.792	9.02
0.3505	0.420	0.783	9.46

例 2: 两被胶接件刚度相差不大(不计热效应)的情况

a. 已知

$$\begin{aligned} E_1 &= 68970 \text{ MPa}; & E_2 &= 110350 \text{ MPa}; \\ t_1 &= 0.0254 \text{ m}; & t_2 &= 0.01905 \text{ m}; \\ [\sigma]_1 &= 634.5 \text{ MPa}; & [\sigma]_2 &= 862.1 \text{ MPa}; \\ G &= 344.8 \text{ MPa}; & h &= 0.000127 \text{ m}; \\ \gamma_p/\gamma_s &= 10; & \tau_p &= 34.48 \text{ MPa} \end{aligned}$$

b. $\lambda^2 = 2842 \left(\frac{1}{\text{m}^2} \right) \quad \lambda = 53.31 \left(\frac{1}{\text{m}} \right)$

c. $E^* = 0.8333$

d. $l^* = 0.1967 \text{ m}$

e. 当 $l \leq l^* = 0.1967 \text{ m}$

$$P = \tau_p l$$

f. 当 $l > l^*$: $\Psi + (1 - \Psi) \ln(1 - \Psi) = 0.0387/l^2$

g. $\tau_{av}/\tau_p = 0.8333 + 0.1667\Psi$

h. $P = (\tau_{av}/\tau_p) \tau_p l$

i. 由步骤 f, g 和 h, 可列出表 2.6, 并进而绘成如图 2.51 所示的曲线。注意, 对于给定的任何比 $l = 0.1136 \text{ m}$ 大的搭接长度, 由于被胶接件刚度相差不大, 连接强度得到改善。

j. 根据被胶接件最大强度, 假定设计载荷:

$$P = [\sigma]_2 l = 0.01905 \times 634.5 \times 10^6 = 12.09 \times 10^6 \text{ N/m}$$

k. 保留 15% 的富裕量, 则

$$P = 1.15 \times 12.09 \times 10^6 = 13.9 \times 10^6 \text{ N/m}$$

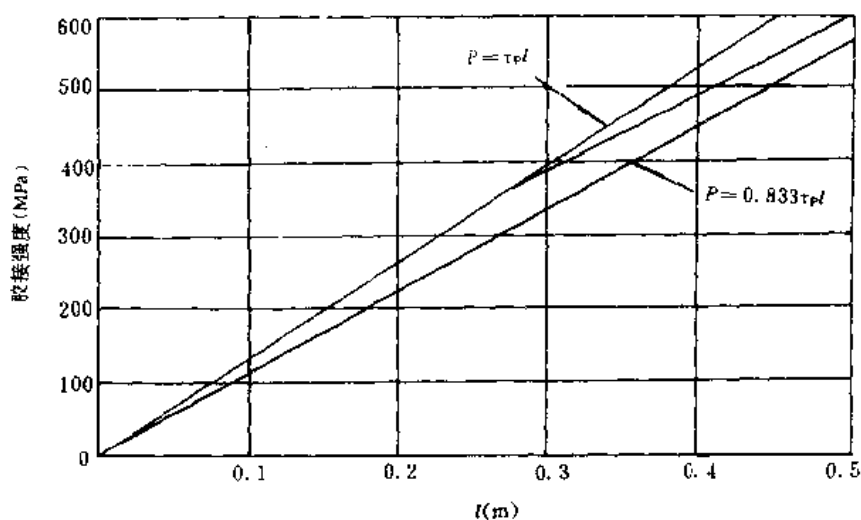


图 2.51 连接强度随搭接长度的变化图(特殊设计举例)

表 2.6 连接强度随搭接长度的变化——两被胶接件刚度差别较小
(特殊设计举例)

$l(\text{m})$	Ψ	τ_{ave}/τ_p	P (kN·m)
0.1969	1.0	1.0	6.79
0.2032	0.988	0.998	6.99
0.2159	0.960	0.993	7.39
0.2286	0.929	0.988	7.79
0.2413	0.898	0.983	8.18
0.2540	0.867	0.978	8.56
0.2794	0.811	0.968	9.32
0.3048	0.760	0.960	10.09
0.3302	0.713	0.952	10.84
0.3556	0.672	0.945	11.60
0.3810	0.635	0.939	12.33
0.4064	0.601	0.933	13.07
0.4318	0.571	0.92	13.82
0.4572	0.543	0.924	14.87
0.4674	0.532	0.922	14.85

例 3: 例 2 考虑热效应的情况

a. 给定:

$$\begin{aligned}
 E_1 &= 68970 \text{ MPa}; & E_2 &= 110350 \text{ MPa}; \\
 t_1 &= 0.0254 \text{ m}; & t_2 &= 0.01905 \text{ m}; \\
 [\sigma]_1 &= 634.5 \text{ MPa}; & [\sigma]_2 &= 862.1 \text{ MPa}; \\
 \alpha_1 &= 2.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}; & \alpha_2 &= 14.4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}; \\
 G &= 344.8 \text{ MPa}; & h &= 0.000127 \text{ m}; \\
 \gamma_p/\gamma_a &= 10; & \tau_p &= 34.48 \text{ MPa}.
 \end{aligned}$$

b. 对本例, 工作温度 = 51.67°C

$$\Delta T = T_n - T_{\text{固化}} = 51.67^\circ\text{C} - 107.2^\circ\text{C} = -55.53^\circ\text{C}$$

$$C = -0.960$$

c. 试取 $l = 0.4572 \text{ m}$

d. 对拉伸载荷(由方程 2.22 和 2.23):

$$C = 0.960; \quad l = 0.4572 \text{ m};$$

$$\lambda = 52.83;$$

$$\therefore \Psi = 0.46; \quad \therefore \tau_{av}/\tau_p = 0.9366$$

e. $P^t = (0.9366)(34.48 \times 10^6)(0.4572) = 14.76 \times 10^6 \text{ N/m}$

f. 对压缩载荷(仍用方程 2.22 和 2.23):

$$C = 0.960; \quad \lambda = 0.528; \quad l = 0.4572 \text{ m}$$

$$\Psi = 0.69$$

$$\tau_{av}/\tau_p = 0.9051$$

$$P^c = (0.9051)(34.48 \times 10^6)(0.4572) = 14.26 \times 10^6 \text{ N/m}$$

g. $M.S = \frac{14.26 - 13.9}{13.9} = +2.6\%$

h. 无热效应时:

当 $l = 0.4572 \text{ m}$, 由例 2 步骤 h 及表 2.6:

$$P_c = (\tau_{av}/\tau_p)\tau_p l = 0.924 \times 34.48 \times 10^6 \times 0.4572$$

$$= 14.57 \times 10^6 \text{ N/m}$$

i. $M.S = \frac{14.57 - 13.9}{13.9} = 4.8\%$

j. 结论:对本例,热效应不太严重。

2.6 耐久性设计

复合材料胶接结构耐久性系指在循环载荷和环境条件下结构的疲劳特性。如同金属胶接结构一样,现在还没有可靠的复合材料胶接结构寿命的估算方法,一般应通过试件或子结构在飞机环境条件下的等幅或寿命循环试验来评定。

胶接结构的耐久性取决于胶粘剂性能、被胶接件的表面制备、载荷及环境条件、被胶接件的结构特征和细节设计等因素。

国外根据胶接与螺接的对比试验研究的结果提出,在耐久性条件下,控制胶接设计的是耐久性而不是静强度。

2.6.1 胶粘剂

胶粘剂性能对复合材料胶接结构的耐久性影响很大。从耐久性观点出发,胶粘剂首先应有良好的韧性,其次应有耐介质、耐湿、热老化特性,与金属件胶接还需考虑胶层的腐蚀问题。

2.6.2 被胶接件的表面制备

被胶接件的表面制备和密封是胶接结构耐久性的关键,灰尘、脏物、油污及指印等,都会对胶接质量产生重大影响,严格控制胶接工艺过程及生产环境,对提高胶接结构耐久性至关重要。表面制备应按前面“2.2.3”节所述方法进行。

2.6.3 密封

湿、热和某些化学介质都可以大大降低胶接结构的耐久性,在胶层外面的接缝处涂密封胶,防止水气进入,可以改善胶接结构的耐久性。图 2.52 为铝合金零件与复合材料构件间表面保护与密封物的使用情况。

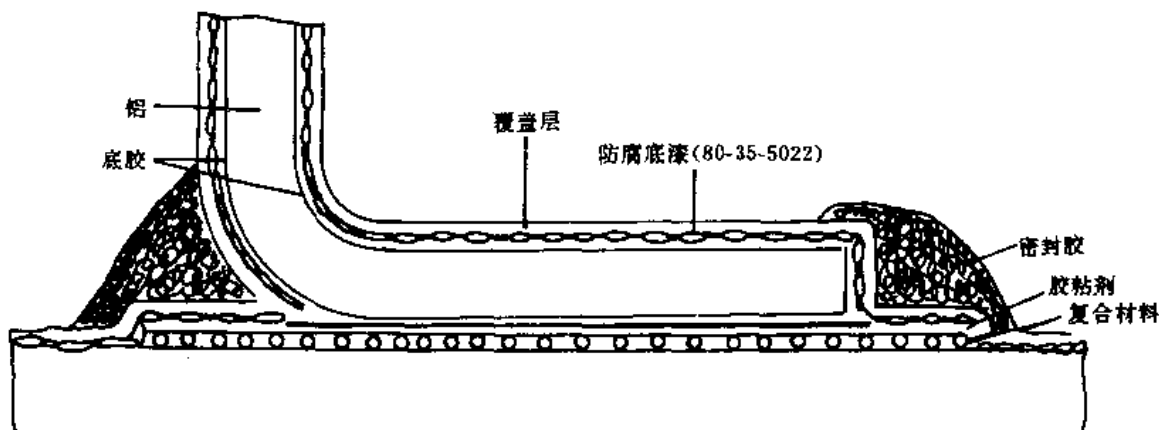


图 2.52 铝-复材胶接件的表面保护及密封

2.6.4 结构细节设计

复合材料胶接结构细节设计的好坏,也会直接影响到结构的耐久性,注意到结构设计的每一个细节,无疑是提高结构耐久性的重要方面(参见 2.3.7 节)。

2.6.5 复合材料胶接结构的耐久性试验

在复合材料层压板的胶接过程中,不可避免地会形成一些制造缺陷,如局部脱胶、胶层松孔、裂缝、褶皱、凹坑。层压板本身也会有分层、孔隙等制造缺陷及冲击损伤,在构件承受各种交变、振动载荷以及湿、热等不利的环境条件下,这些缺陷很可能扩大,导致胶接结构失效,胶粘剂也会由于吸湿而使强度大幅度下降。因此,除对胶接件进行精心地设计外,只进行静强度试验是远远不够的,还必须对胶接结构进行耐久性试验。

与金属胶接结构相似,复合材料胶接结构的耐久性试验,要考虑环境条件。疲劳载荷谱一般取自飞机飞续飞的真实载荷谱,而环境条件按飞机的空中使用温度和地面上的湿度确定,这些条件由飞机结构的完整性大纲规定。

按飞机真实载荷谱试验,周期很长,有时为缩短试验周期,采用加速的载荷谱和加速的温度、湿度环境进行试验。

战斗机耐久性试验,若采用加速试验,在最不利的环境条件下,试验至 4~5 倍寿命,才能模拟一倍的真实寿命。所以,用加速试验法试验,如不考虑环境条件,还要增加试验周期。

对于民用飞机,据德国研制空中客车系列飞机的经验,对安全寿命胶接结构,试验至 4 倍寿命。而对破损安全胶接结构,考虑环境,在加大谱载幅度 15% 条件下,试验至 2.5 倍寿命,不考虑环境,试验周期还要增加。

复合材料胶接结构的耐久性试验,一般分为标准试片、元件、子结构和全尺寸试验。标准试

片试验用于确定材料的许用值,元件和子结构试验主要用来证实结构满足完整性要求及获得结构可靠性和生存力方面的信息,一般从结构上有代表性的高载、危险区域中选择。全尺寸试验是证明结构满足设计要求的主要方法,但价格十分昂贵。

复合材料胶接结构耐久性试验项目的确定,一般从被胶接件的重要程度、受力特点、成本等因素考虑。试验件的设计应典型、有代表性,尽可能地模拟被胶接件的受力特征、边界条件及工作环境。

下面是复合材料胶接结构耐久性试验的两个实例:

例 1: F-5E 机翼壁板与根肋的连接(图 2.53)

F-5E 机翼壁板是用等代设计法由铝合金结构改为碳/环氧复合材料结构的。在研究复合材料壁板与钛/不锈钢根肋连接时,考虑了两种连接方案:全胶接和螺栓连接方案,其主要要求如下:

- a. 连接必需能承受 2 倍寿命的疲劳载荷;
- b. 前梁(15%弦长)处,极限负荷 1.58MN/m,中梁(39%弦长)处,极限负荷 3.15MN/m;
- c. 环境条件:低温-30℃,高温+120℃,潮湿环境。

为此,他们设计了全胶接试验件和螺栓试验件,图 2.54 为全胶接试件及其构成,钛合金板与碳/环氧蒙皮用 FM-400 胶膜胶接。试验结果,疲劳寿命为 1.28 倍寿命,图 2.55 为螺栓连接试件,试件主要尺寸和构成列于图旁。

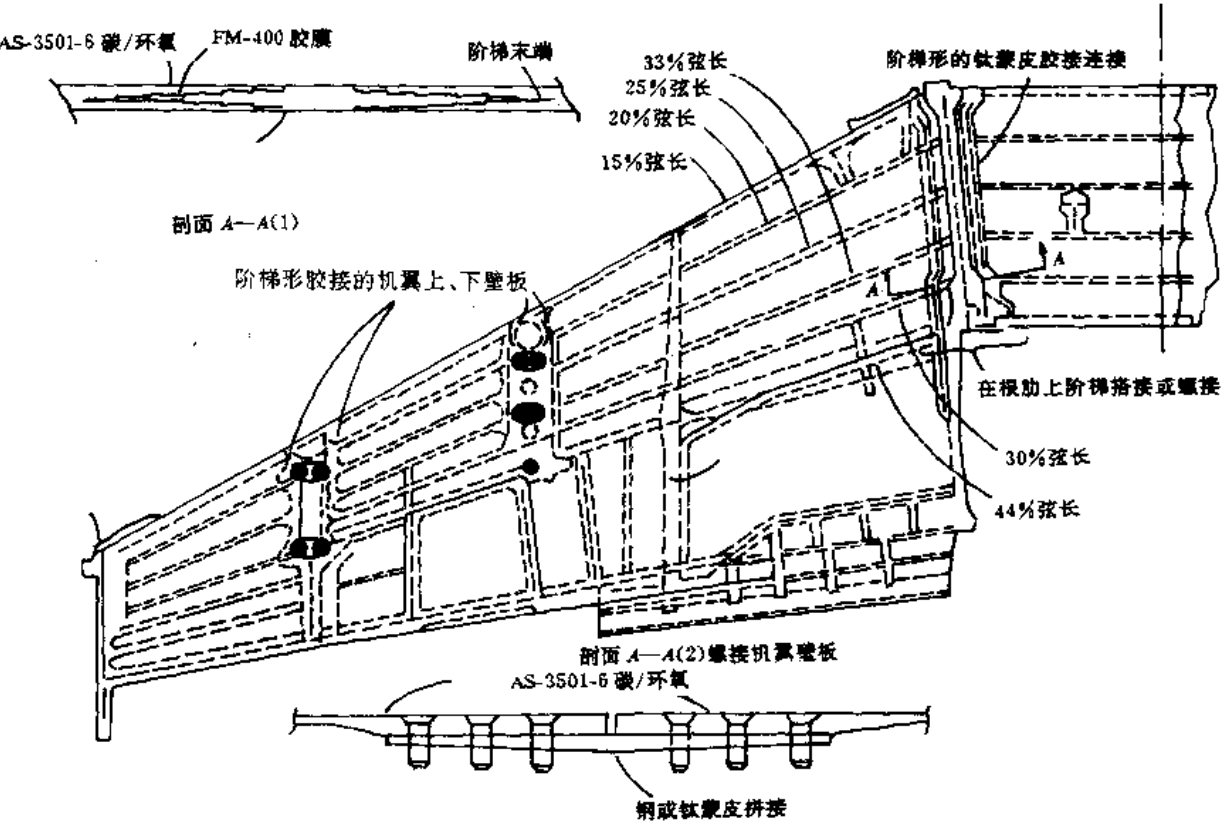


图 2.53 F-5E 机翼

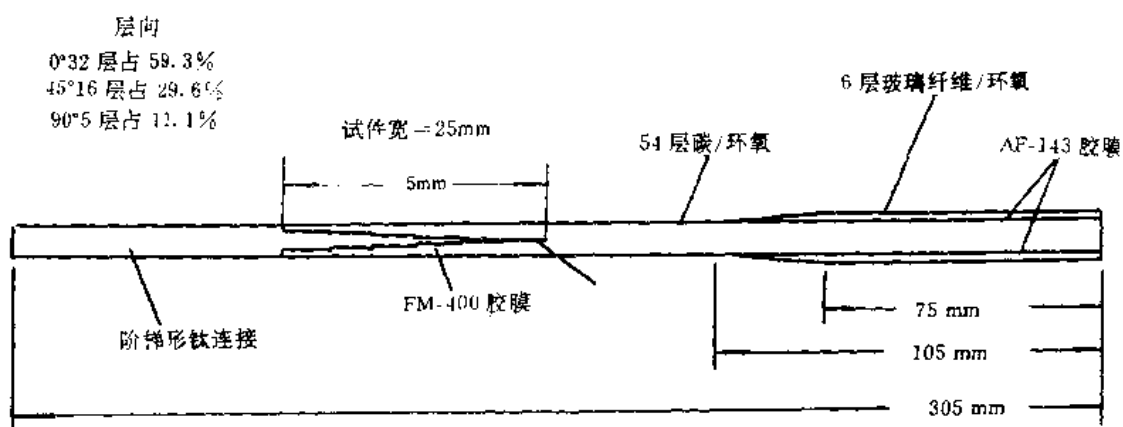


图 2.54 全胶接试件

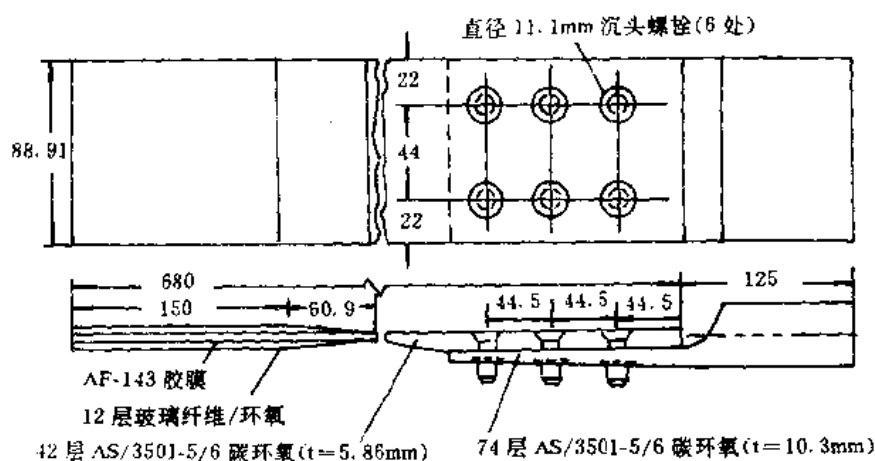


图 2.55 螺栓连接试件

例 2:A310 全复合材料垂尾主接头

A310 全复合材料垂尾主接头由三部分构成:外接头、内接头、蒙皮及加强层。其中,内、外接头是预固化件(干态),而蒙皮和加强铺层是湿态,它们一起固化,通过表面的富树脂层,胶接在一起(图 2.56、图 2.57)。

在发展阶段,主接头曾用图 2.58 所示的模拟件进行耐久性试验,试验按块谱施加拉、压载荷, $R=-1$,施加的最大载荷为破坏载荷的 37.5%,常温,试验至 900000 次。垂尾装配完毕后又在环境条件下(+70℃, -55℃, 70%相对湿度)完成了 3 倍寿命试验。

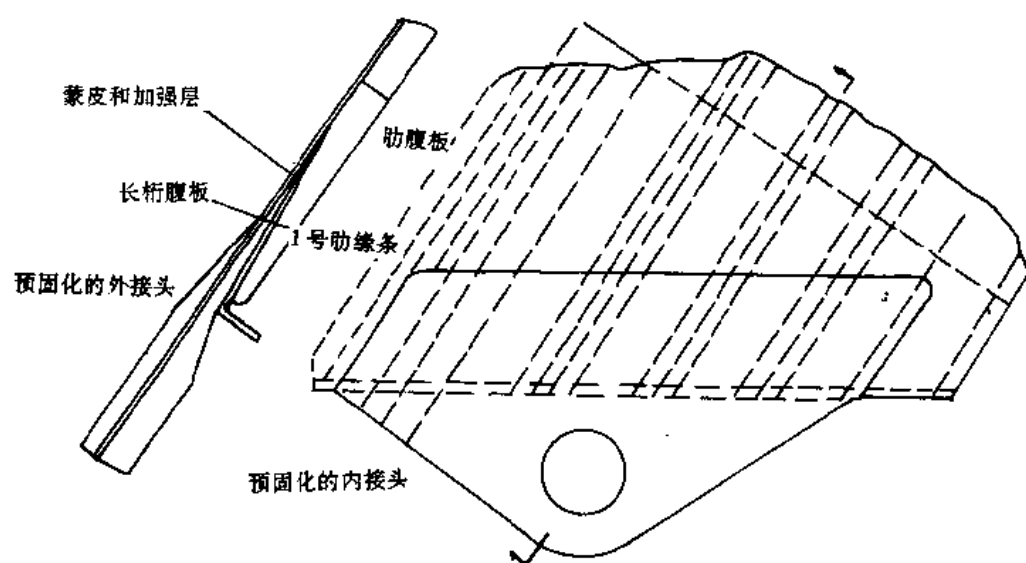


图 2-56 A310 垂尾主接头

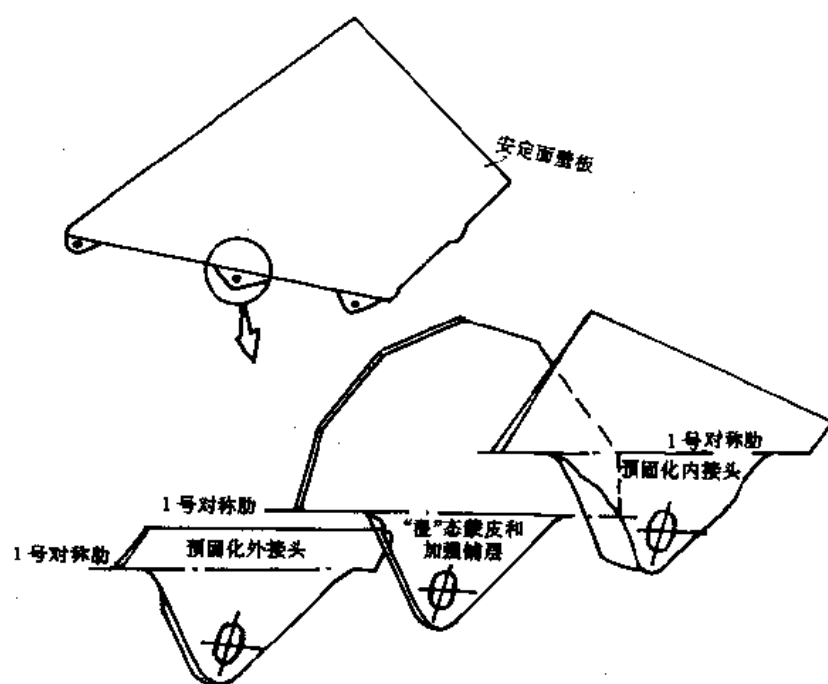


图 2.57 A310 垂尾主接头(续)

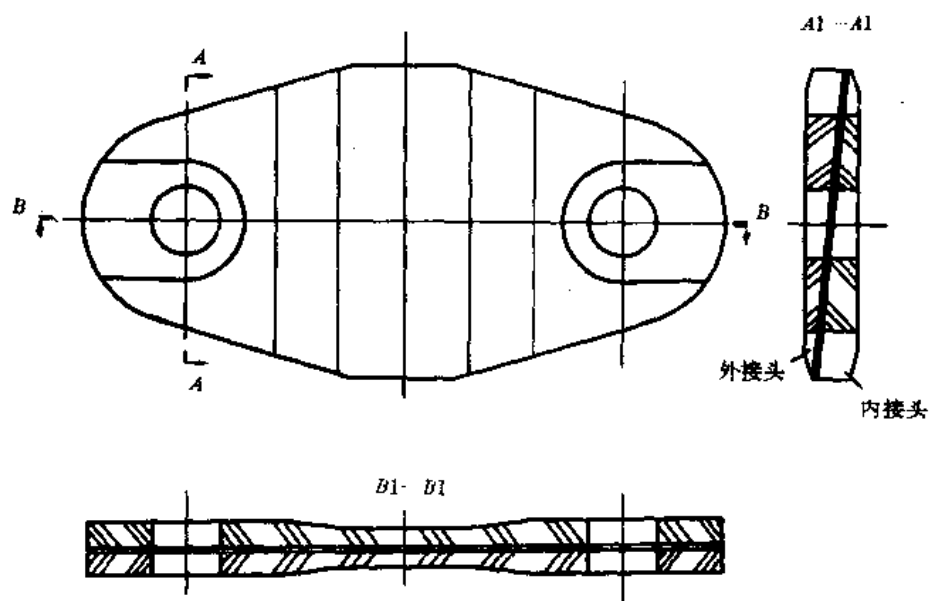


图 2.58 主接头试件

参 考 文 献

- [2-1] Hart-Smith L. J. Further Developments in the Design and Analysis of Adhesive-Bonded structural Joints In: Joining of Composite materials, ASTM STP 749
- [2-2] Hart-Smith L. J. Analysis and Design of Advanced Composite Bonded Joints
- [2-3] Deles F, Endogan F, Aydinoglu M N, Stress in Adhesively Bonded Joints; a Closed-form Solution. J. Composite Materials, 15, 249-271, 1981. 5
- [2-4] Endogan F, Ratwam M. Stress Distribution in Bonded Joints. J. Composite Materials, 5, 378-393, 1971. 7
- [2-5] Hart-Smith L. J. Adhesive-Bonded Scarf and Stepped-Lap Joints. NASA CR 112237
- [2-6] ASTM E229-70 Standard Test Method for Shear Strength and Modulus of Structural Adhesive
- [2-7] ASTM D3983-81 Standard Test Method for Shear Strength and Modulus of Nonrigid Adhesive by Thick Adherend Tensile Lap Specimen.
- [2-8] Hart-Smith, L. J. Adhesive-Bonded Single-Lap Joints. NASA CR112236, 1973
- [2-9] Hart-Smith, L. J. Adhesive-Bonded Double-Lap Joints, NASA CR-112235, 1973
- [2-10] Hart-Smith, L. J. Adhesive-Bonded Scarf and Stepped-Lap Joints. NASA CR 112237, 1973
- [2-11] Hart-Smith, L. J. Design Methodology for Bonded-Bolted Composite Joints. AFWAL TR 81-3154
- [2-12] ASM International Handbook Committee. Engineered Materials Handbook. Vol. 1. Composites

第三章 机械连接设计

机械连接主要包括螺栓连接和铆钉连接。铆钉连接一般用在受力较小层压板较薄的情况。螺栓连接广泛应用于承载能力较大和比较重要的受力构件上。

螺栓连接的优点：

- 在制造、更换和维修中可重复装配和拆卸；
- 便于检查质量、保证连接的可靠性；
- 对零件连接表面的准备及处理要求不高；
- 无胶接固化产生的残余应力；
- 受环境影响较小。

螺栓连接的缺点：

- 由于复合材料的脆性和层压板的各向异性，层压板制孔后导致孔周的局部应力集中，降低了连接效率。
- 为了弥补基本层压板制孔后强度下降的影响，层压板可能需局部加厚，使重量增加。
- 由于增加了制作的工作量，可能增加成本。
- 钢紧固件与复合材料接触会产生电偶腐蚀，故需选用与碳复合材料电位差小的材料制成的紧固件。

影响复合材料机械连接强度的因素很多，因此复合材料机械连接的设计与金属连接相比，不仅复杂得多，而且有许多不同之处。如果忽视这些差别，照搬金属的方法，将会造成严重的后果。有关铆接技术的特殊要求在第六章作详细介绍。

3.1 机械连接破坏模式

复合材料机械连接的破坏模式有单一型和组合型两类。单一型破坏模式有层压板的挤压破坏、拉伸破坏、剪切破坏、劈裂破坏、拉脱破坏以及紧固件的剪切和拉伸破坏等七种形式。某些单一型破坏模式及其防止措施见表 3.1。

组合型破坏为两种以上单一型破坏模式同时发生的情况，例如拉伸-剪切（或劈裂）、挤压-拉伸、挤压-剪切和挤压-拉伸-剪切等，见图 3.1。

机械连接的破坏模式主要与其几何参数和纤维铺叠方式有关。剪切和劈裂破坏是两种低强度破坏模式，应防止发生。等厚度等直径的多排钉连接一般为拉伸型破坏。挤压破坏是局部性质的，通常不会引起复合材料结构的灾难性破坏，是设计预期的可能破坏形式。从既要保证连接的安全性又要提高连接效率出发，应尽可能使机械连接设计产生与挤压型破坏有关的破坏模式。

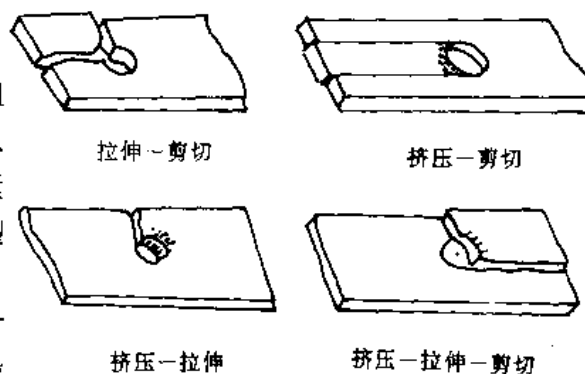
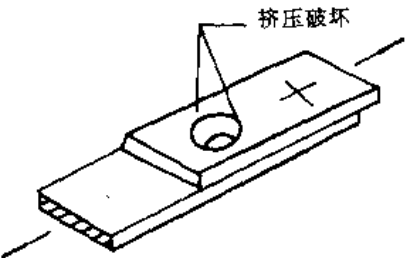
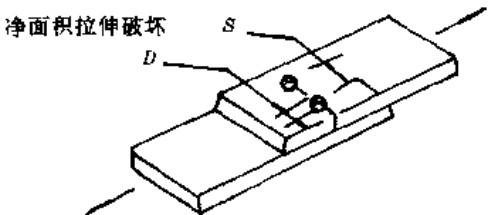
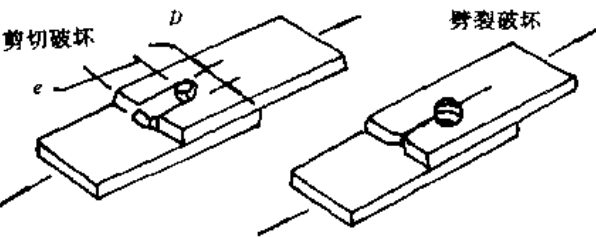
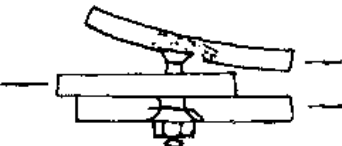
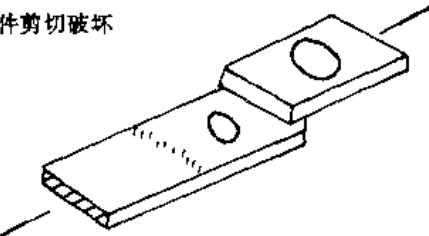


图 3.1 机械连接组合型破坏示意图

表 3.1 机械连接典型破坏模式及其预防措施

破坏模式	预防措施
 挤压破坏	(1) 连接设计以挤压强度为临界参数； (2) 至少采用 40% 的 $\pm 45^\circ$ 铺层； (3) 在螺母下面加垫圈； (4) 如有可能采用抗拉型凸头紧固件
 净面积拉伸破坏 S D	(1) 采用比铝结构更大的紧固件间距： 铝的 S/D (间距/孔径) ≥ 4，碳纤维/环氧树脂的 S/D (间距/孔径) ≥ 5； (2) 连接板加厚，以减少净应力
 剪切破坏 D e 劈裂破坏	(1) 采用比铝结构更大的端距，铝的 e/D (端距/孔径) $\approx 1.7 \sim 2$；碳纤维/环氧树脂的 e/D (端距/孔径) $\approx 3 \sim 4$； (2) 至少采用 40% 的 $\pm 45^\circ$ 铺层； (3) 至少采用 10% 的 90° 铺层
 拉脱破坏	(1) 沉头孔深度不应大于层压板厚度的 0.6 倍； (2) 增加层压板厚度
 紧固件剪切破坏	(1) 采用直径更大的紧固件； (2) 采用高抗剪紧固件

3.2 机械连接设计的一般要求

由于复合材料的各向异性,非均匀性和脆性等特征,使得复合材料机械连接设计与金属材料的机械连接设计有较大区别。特别是在孔边出现高应力集中,在连接设计中必须给予应有的重视。

3.2.1 机械连接几何参数的定义及选择

图 3.2 示出了机械连接中几何参数的定义。

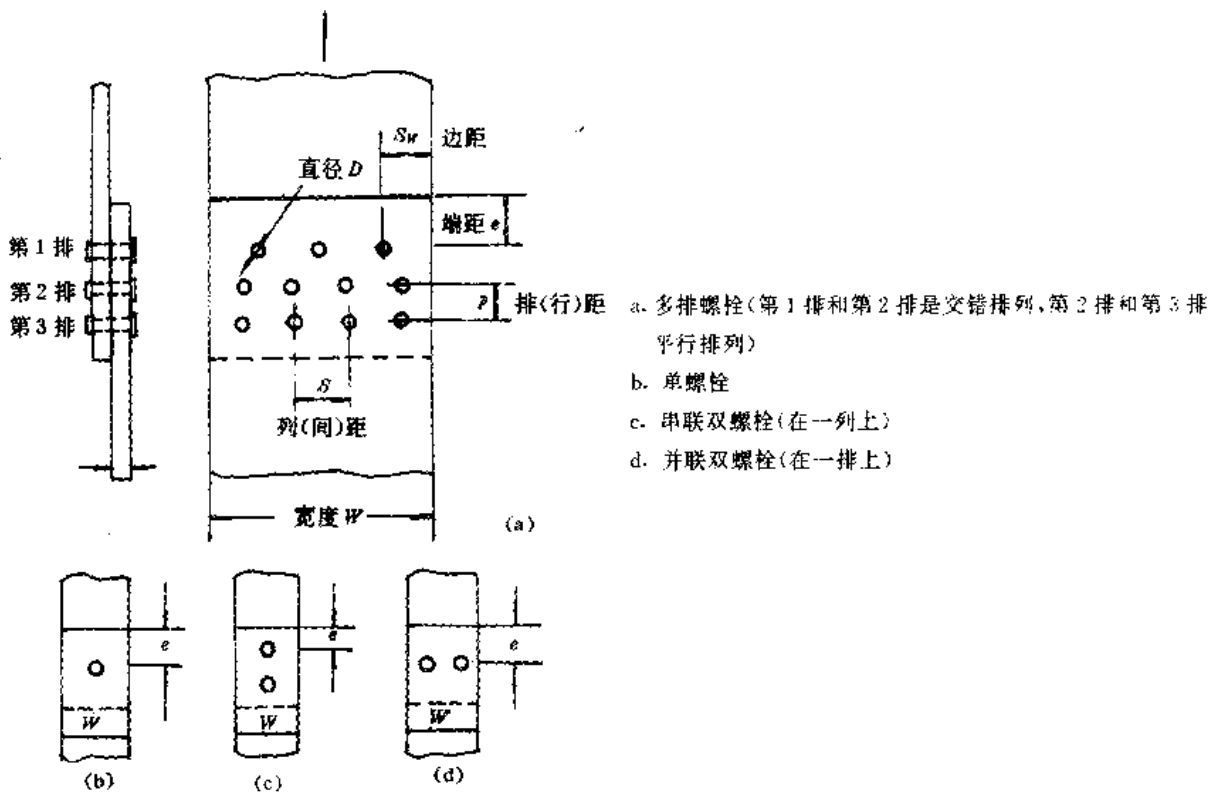


图 3.2 机械连接几何参数的定义

为防止复合材料机械连接出现低强度破坏模式,并具有较高的强度,被连接板的几何参数一般应按表 3.2 选取。

表 3.2 机械连接中几何参数的选择

列距/孔径 (S/D)	排距/孔径 p/D	边距/孔径 (S_w/D)	端距/孔径 (e/D)	孔径/板厚 (D/t)	沉头孔时的板厚 t
≥ 5	≥ 4	≥ 2.5	≥ 3	$1 \leq D/t \leq 2$	$t \geq 0.6D$

当受结构限制,不能按表 3.2 选择几何参数时,连接强度会有所下降,其修正方法见第四章。

3.2.2 机械连接形式及其选择

复合材料结构的机械连接形式,按有无起连接作用的搭接板来分,主要有对接和搭接两类,按受力形式分有单剪和双剪两类,其中每类又有等厚度和变厚度两种情况,见图 3.3。

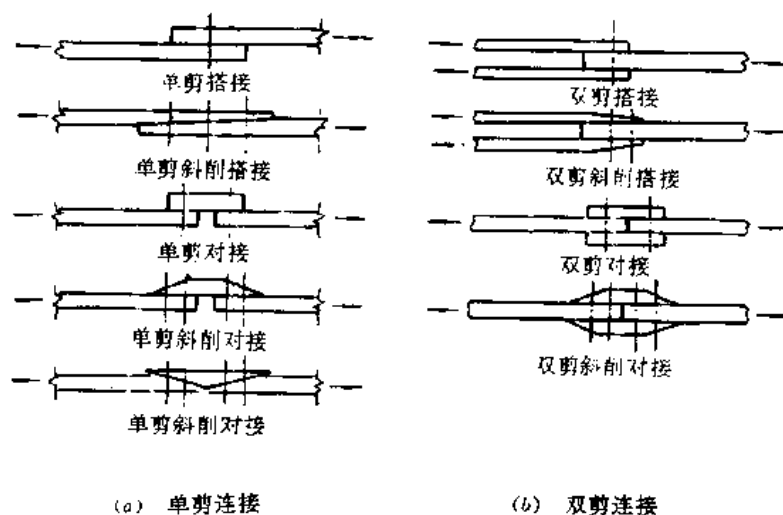


图 3.3 机械连接形式

单剪形式的连接会产生附加弯曲而造成接头承载能力的减小和连接效率的降低,一般应尽可能避免。连接设计宜采用双剪连接形式。斜削形式的连接可以改善多钉连接载荷分配的不均匀性,提高连接的承载能力。

复合材料机械连接形式的选择应注意以下几点:

a. 不对称连接形式,如单剪形式,推荐采用多排紧固件,紧固件的排距应尽可能大些,使偏心加载引起的弯曲应力降低到最小。

应注意到,当用增加层压板局部厚度的方法增强不对称连接时,随板厚的增加,由偏心导致的附加弯曲应力也更大,相当程度上抵消了材料厚度增加所起的作用。

b. 碳纤维树脂基复合材料的塑性很差,会造成多排紧固件连接载荷分配的严重不均,因此,如有可能尽量采用不多于两排紧固件的多钉连接形式。

多排紧固件连接钉孔的安排,应尽可能采用平行排列,避免交错排列,以提高连接强度,特别是疲劳强度。

c. 设计合理的斜削型连接可以提高连接强度。但是不合理的斜削形式的搭接连接的承载能力反而比等厚度连接形式的还要差。设计的关键是斜削搭接板厚度和紧固件直径的选择。对于复合材料多排螺栓双剪对接形式的连接,图 3.4 给出了一个经过试验验证的斜削连接设计范例。

优化的搭接结构包括等厚度蒙皮和带斜削的搭接板。如图中所示,紧固件直径在整个连接区是变化的,邻近蒙皮对接处的最内一排螺栓直径最大, $S/D=3$ 。在蒙皮上此处无旁路载荷,在蒙皮内端位置搭接板上,最大挤压载荷与旁路载荷同时作用在该处。故搭接板必须适当地加厚,试验表明,斜削板的板厚取基本板厚的 1.5 倍为最佳。基本板厚为 12.7mm,斜削板总厚应取 19.06mm,即上、下两块搭接板厚度各为 9.53mm。最外一排的紧固件直径最小, $S/D=5$ 。搭接板外端的厚度应防止螺栓承载较大,而使层压板发生剪切破坏。

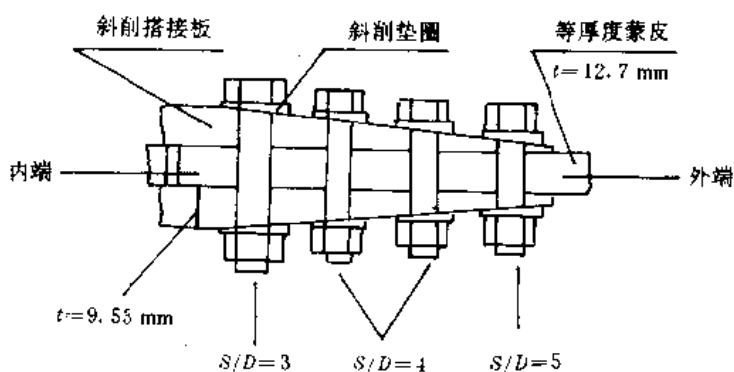


图 3.4 参数优选的复合材料多排螺栓接头^[3-3]

3.2.3 紧固件的选用及对拧紧力矩的要求

3.2.3.1 紧固件直径的选择

紧固件直径的最佳选择应使其本身的剪切破坏与复合材料层压板的挤压破坏同时发生。

即：

$$D/t = 4[\sigma_{br}]/\pi[\tau_b] \quad (3.1)$$

式中 D ——紧固件直径(mm)；

t ——层压板厚度(mm)；

$[\sigma_{br}]$ ——层压板的许用挤压强度(MPa)；

$[\tau_b]$ ——紧固件的许用剪切强度(MPa)；

3.2.3.2 紧固件种类的选用

a. 紧固件主要分螺栓、铆钉两大类，螺栓用于可拆卸的结构连接部位，而铆钉则用于不可拆卸的结构处，铆钉可应用的层压板厚度范围较小，一般为1~3mm，且强度较低。在复合材料结构中尽可能采用压铆，否则可能损伤复合材料构件。

b. 在复合材料结构中，紧固件或被连接的结构元件是铝合金(无涂层)、镀铝或镀锡的钢件时，它们直接与碳纤维复合材料相接触在金属中会产生电偶腐蚀。必须使用时，需加绝缘层，如在复合材料零件表面铺一层玻璃布。应采用钛合金或不锈钢紧固件，并进行湿装配。

碳纤维复合材料与不锈钢同时使用时，需采取防腐措施，钛合金可直接使用而不需任何防护。

c. 尽可能采用拉伸头紧固件。因为剪切头紧固件端头较小，容易转动，可能引起孔的损伤。

d. 推荐采用的螺栓与孔的配合精度为H8/h8。

3.2.3.3 螺栓拧紧力矩的要求

适当的拧紧力矩将明显地提高螺栓连接的强度。对不同直径的螺栓，推荐的拧紧力矩值在表3.3中给出，其他紧固件的拧紧力矩，可参照螺栓拧紧力矩的要求。

表 3.3 螺栓拧紧力矩(N·m)

螺 纹 直 径	螺 母 形 式 螺 栓 头 形 式	厚 型	薄 型	所有各型
		沉头拉伸型 六方头型	所有各型	沉头剪切型
M5		3~5	2.3~3.2	2.3~2.9
M6		5~8	2.9~4.9	3.1~3.9
M8		10~15	6.4~10.8	10.2~11.3
M10		18~25	12.3~19.1	10.8~11.9
M12		25~30		

3.2.4 连接区的铺层设计

连接区的孔周有较大的应力集中,这将明显降低机械连接的承载能力。为提高复合材料机械连接的强度和柔性,连接区的铺层设计一般应遵循以下原则:

a. 采用均衡对称铺层。采用均衡对称铺层可以消除由复合材料沿纤维方向和垂直纤维方向的热膨胀系数不同而在加温固化时所产生的内应力及由此而产生的翘曲。

b. $\pm 45^\circ$ 层比例不低于 40%, 0° 层比例不低于 25%, 90° 比例 10~25%。等厚度层压板等直径多排钉连接,在高应力区的主承力接头部位,当 $S/D \leq 5 \sim 6$ 的情况下,其破坏模式一般为拉伸型破坏。为提高接头的承载能力,在上述铺层范围内适当增加 0° 铺层,以利提高拉伸强度,有关试验结果详见第五章。

c. 相同方向的铺层,沿层压板厚度方向应尽可能地均匀散开,使相邻层纤维间夹角最小。

d. 连接区局部加厚,见图 3.5。特别是对非常薄的层压板(如 $t \leq 0.76\text{mm}$),为避免 $D/t > 4$,应这样处理。同时应遵循一般规则 $D/t \geq 1$,以避免紧固件破坏。

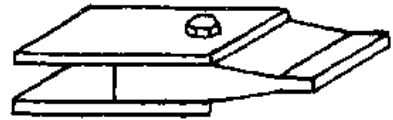


图 3.5 局部增强的机械连接

e. 连接区孔周附近增加局部软化条带。复合材料层压板上开孔引起的高应力集中会削弱层压板的连接强度,为降低应力集中,在连接区孔周附近增加局部软化条带,即铺设 $\pm 45^\circ$ 层或高强玻璃纤维。在高应力主承力连接区的设计中要谨慎,一般不宜采用。

f. 层压板表面铺设 $\pm 45^\circ$ 层,可以改善层压板的抗压和抗冲击性能。

3.3 影响复合材料机械连接强度的主要因素

影响复合材料机械连接接头强度的因素比金属多,了解这些因素,并在设计中加以考虑是很重要的。这些因素可以归纳为以下五类:

- 材料参数 纤维的类型、取向及形式(单向带、编织布等)、树脂类型、纤维体积含量及铺层顺序。

- 连接几何形状参数 连接形式(搭接或对接、单剪或双剪等)、几何尺寸(排距/孔径、列距/孔径、端距/孔径、边距/孔径、厚度/孔径等),孔排列方式。

- 紧固件参数 紧固件类型(螺栓或铆钉、凸头或沉头等)、紧固件尺寸、垫圈尺寸、拧紧力矩及紧固件与孔的配合精度。

- 载荷因素 载荷种类(静载荷、动载荷或疲劳载荷)、载荷方向、加载速率。
- 环境因素 温度、湿度、介质。

本节所列机械连接的强度数据全部由单钉螺栓连接试验得到。为了便于比较各种参数变化对连接承载能力的影响(即使破坏不是挤压破坏模式),连接强度通常用破坏时的挤压应力,即挤压强度表示:

$$\sigma_{\text{bru}} = P_{\text{ult}} / Dt \quad (3.2)$$

式中 P_{ult} ——破坏载荷(N);
 D ——孔径(mm);
 t ——层压板厚度(mm)。

如不特殊说明,连接形式为双剪,螺栓拧紧力矩符合表 3.3 的要求,环境条件为室温干态。文中所用层压板代号见 1.3 节。

3.3.1 铺层比例

航空航天飞行器结构上所采用的层压板一般均由 0° 、 $\pm 45^\circ$ 和 90° 四种铺向角的单向铺层组成,其中 $\pm 45^\circ$ 层所占的比例对层压板的挤压强度具有重要的影响。当 $\pm 45^\circ$ 层含量较少时,层压板主要由 0° 层组成时,极易引起剪切或劈裂破坏。不像金属材料只靠增加孔的端距就可以防止剪切破坏的发生,对于复合材料更重要的措施是保证一定量的 $\pm 45^\circ$ 层的比例。随着 $\pm 45^\circ$ 层含量的增加,挤压强度随之增大。在推荐的连接区铺层范围内($\pm 45^\circ$ 层 $\geq 40\%$, 0° 层 $\geq 25\%$, 90° 层 = $10 \sim 25\%$),挤压强度达到最大值。当 $\pm 45^\circ$ 层占绝大多数时,挤压强度又有所降低。

在上述铺层范围内, $\pm 45^\circ$ 层含量不少于 50% 的层压板的优点是:

- 在比表 3.2 要求的板宽和端距更小的情况下仍发生挤压型破坏,因此可减轻结构重量;
- 载荷方向的变化对其强度影响较小。

缺点:

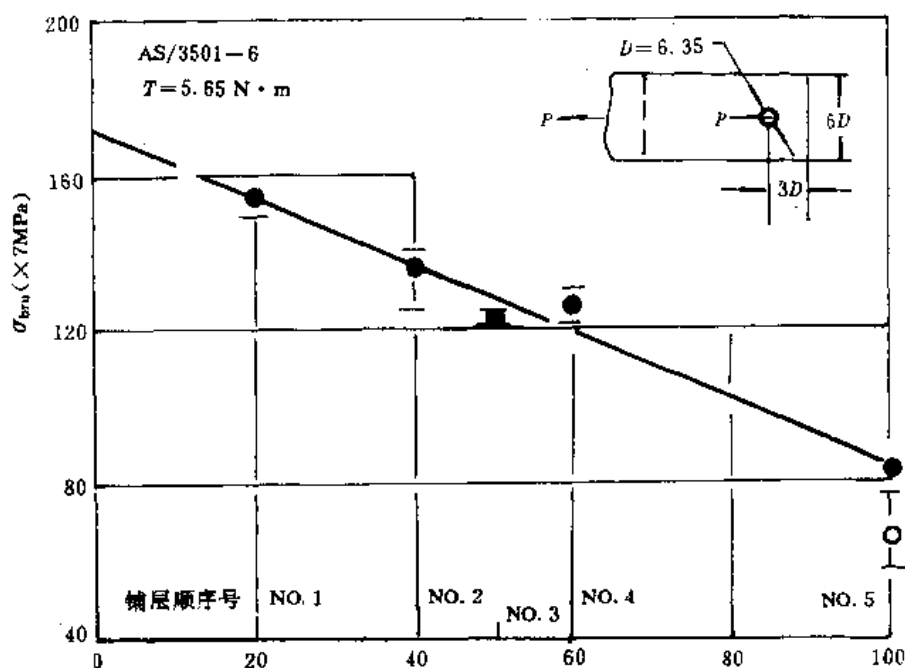
- 初始挤压破坏强度出现较早;
- 拉伸强度较低,在多排紧固件连接设计中应慎重。

在推荐的连接区铺层范围内,出现挤压型破坏时的挤压强度相差约 5%。从以下各节所提供的数据可以明显地看出铺层比例是影响挤压强度的最重要因素。

3.3.2 铺层顺序

铺层顺序是复合材料特有的影响复合材料力学性能的参数。铺层层数和比例相同的层压板,铺层顺序可以有多种,因此,层间应力会发生变化,对层压板的力学性能也会产生一定的影响。

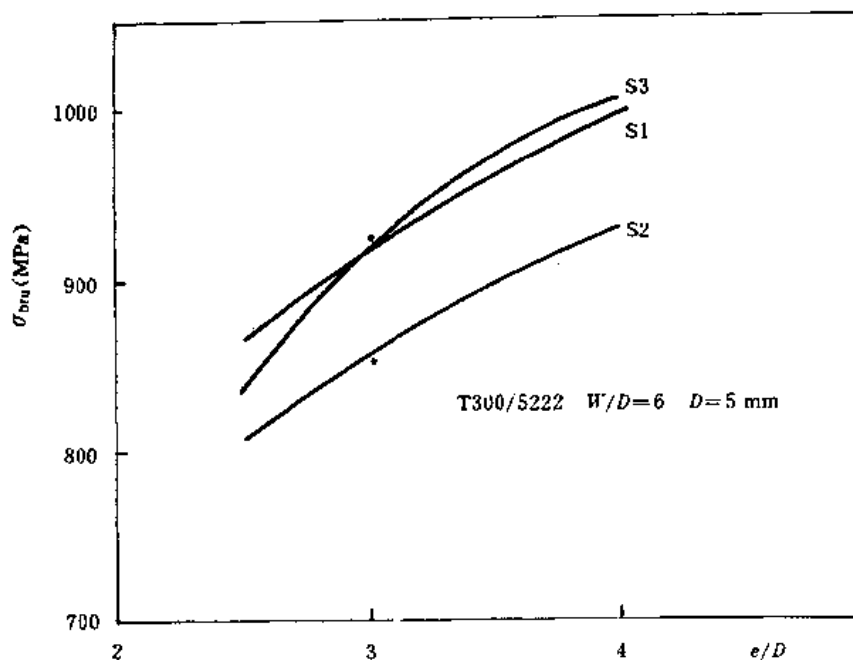
试验证明纤维铺叠顺序对复合材料层压板螺接接头的性能有较显著的影响,图 3.6a 示出了碳纤维 AS/3501-6 复合材料层压板($50\%0^\circ$ 、 $40\%\pm 45^\circ$ 、 $10\%90^\circ$)挤压强度与含 0° 层结合比例的关系。此层压板的铺层比例是连接区通常采用的铺层比例。由图可见,挤压强度随 0° 层结合比例的增加而明显地呈线性减小。



0°层结合百分比(0°层重叠层数/0°层总数)

- No. 1 [45/0/-45/0/90/0/45/0/-45/0]_s No. 2 [45/-45/0/0/90/0/45/-45/0/0]_s
 No. 3 [45/-45/0/0/0/0/0/45/-45/90]_s No. 4 [45/-45/0/0/45/90/-45/0/0/0]_s
 No. 5 [45/-45/45/-45/90/0/0/0/0/0]_s

图 3.6a 铺层顺序对 AS/3501-6 挤压强度的影响^[3-13]



- S1 [45/0/-45/0/90/0/45/0/-45/0]_s
 S2 [90/0/45/0/-45/0/45/0/-45/0]_s
 S3 [45/-45/0/0/90/0/0/45/-45/0]_s

图 3.6b 铺层顺序对 T300/5222 挤压强度的影响^[3-13]

采用上述同样的铺层比例,图 3.6b 给出了 T300/5222 碳纤维复合材料三种铺层顺序对层压板挤压强度的影响。试验结果证明 90° 层的顺序也影响挤压强度,将 90° 层置于外表面的铺层,承载能力最差; $\pm 45^\circ$ 层成对铺设的铺层 S3,在小端距时略小于分散铺设的层压板 S1,其挤压强度稍低,大端距时,二者的挤压强度几乎相同。

3.3.3 拧紧力矩

挤压强度对层压板厚度方向上的夹紧力较敏感,对机械连接施加拧紧力矩能提高层压板的承载能力。一个完全拧紧的螺栓连接的挤压强度,可能高达一个销钉连接挤压强度的四倍。用手拧紧螺母也能达到销钉连接强度的二倍。试验表明,在某一定拧紧力矩值之前,挤压强度随拧紧力矩的增大而增加,达到该值后,继续增大拧紧力矩,挤压强度不再增加或增加甚微。过分地拧紧螺母反而会造成层压板的损伤,这是不利的。

图 3.7a 给出了英国 HTS/RLA 4617 碳纤维复合材料层压板挤压强度随侧向约束的变化。当侧向约束达到 22MPa 时,曲线趋于平缓,继续增大侧向约束力,强度仅略有增加。

图 3.7b 给出了美国碳纤维复合材料 AS/3501-6 三种层压板的拧紧力矩对挤压强度的影响。当螺栓直径为 5、6 和 8mm 时,拧紧力矩对 T300/4211 碳纤维复合材料三种层压板的挤压破坏载荷的影响示于图 3.7c。螺栓直径为 10 和 12mm 时,T300/5222 碳纤维复合材料的挤压破坏载荷随拧紧力矩的变化情况见图 3.7d。

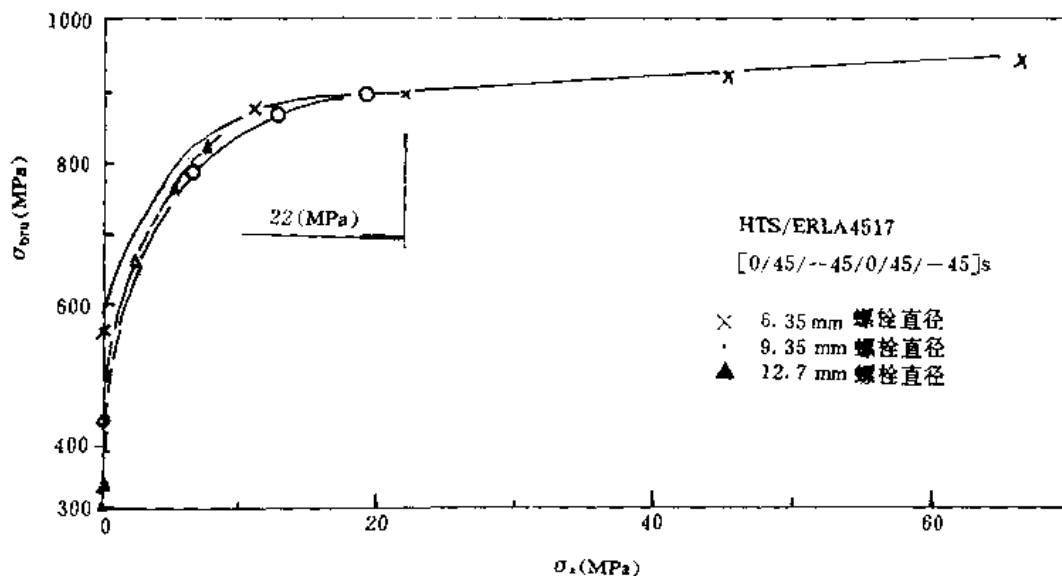


图 3.7a 挤压强度随侧向约束的变化

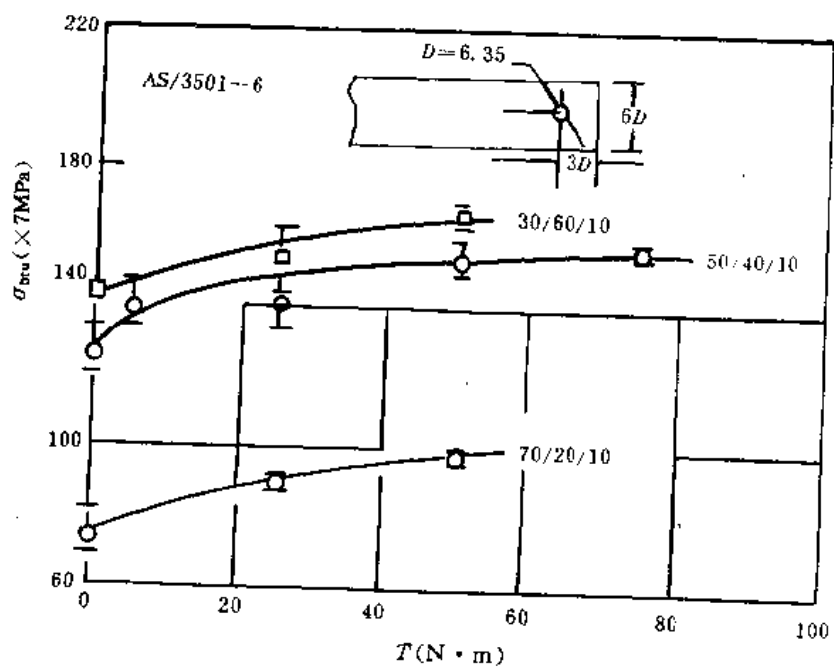
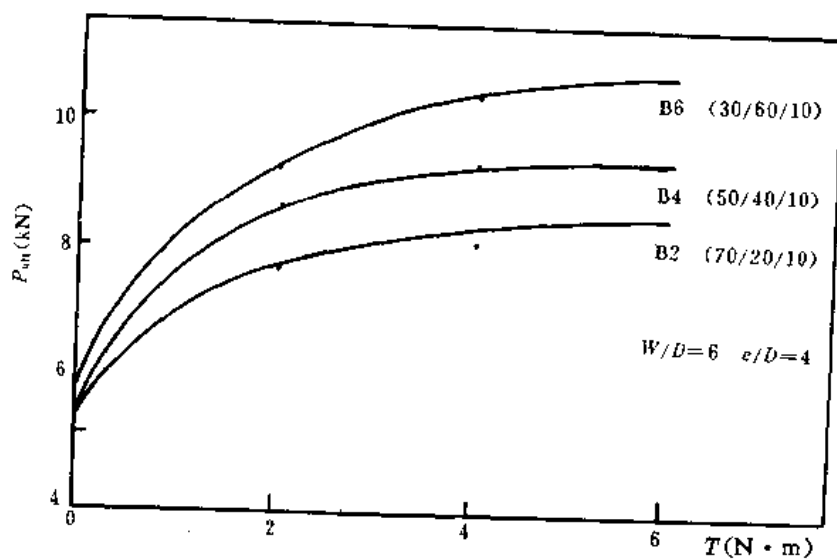
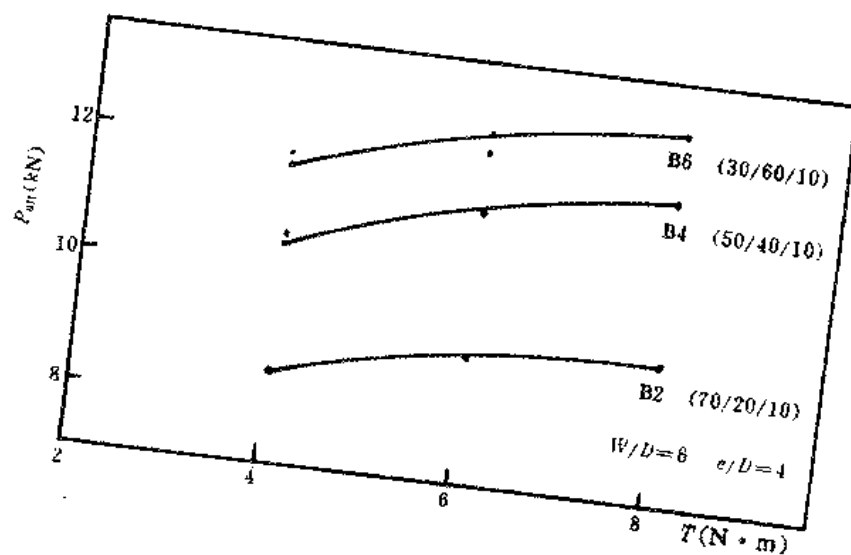


图 3.7b 拧紧力矩对 AS/3501-6 挤压强度的影响

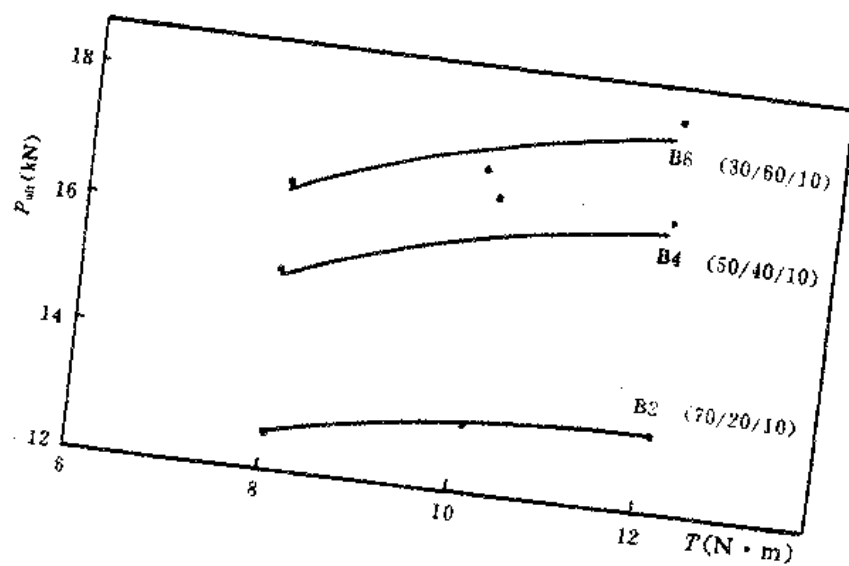


(1) $D=5 \text{ mm}$

图 3.7c 拧紧力矩对 T300/4211 螺栓连接破坏荷载的影响^[3-4]



(2) $D=6$ mm



(3) $D=8$ mm

图 3.7c 拧紧力矩对 T300/4211 螺栓连接破坏载荷的影响

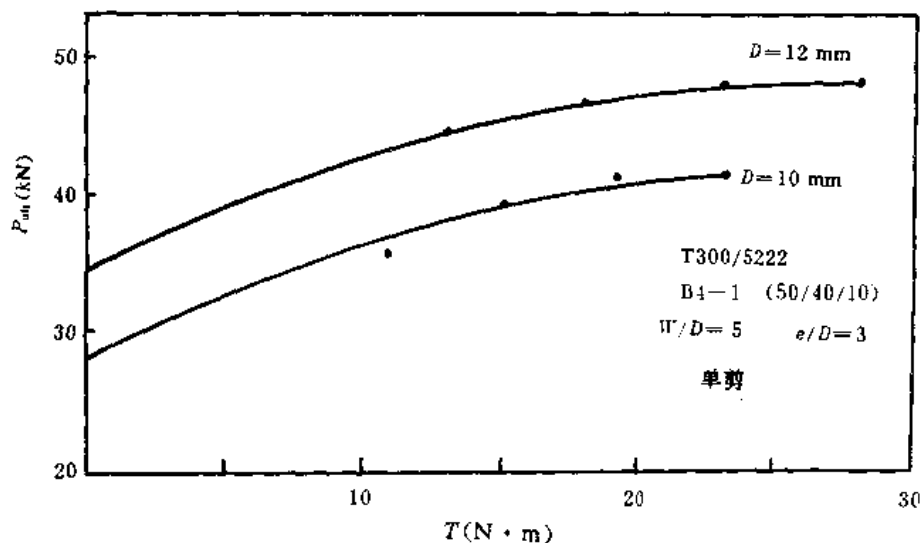


图 3.7d 拧紧力矩对 T300/5222 螺栓连接破坏载荷的影响

应当指出,由于复合材料的粘弹性行为,紧固件的夹持力将随时间的历程而逐渐松弛。因此,对侧向约束所产生的强度增加须谨慎对待,尤其对于长期使用又不便检查的螺栓连接。在确定许用挤压强度时应考虑螺栓夹紧力松弛的影响。

3.3.4 连接形式

在复合材料结构中,连接形式是影响机械连接强度的重要因素之一。同双剪连接相比,单剪连接由于载荷偏心,挤压应力沿板厚更不均匀,因此可能降低接头强度。单剪对接头强度影响的大小与板厚有关,对于薄板,单剪对挤压强度影响不大,但对初始挤压破坏强度有影响,最大可以降低 20%。随板厚增加,单剪影响逐渐增大。

3.3.5 几何参数

影响机械连接强度的几何参数主要有宽度(W)、端距(e)、层压板厚度(t)和孔径(D),下面阐述它们对单钉连接强度的影响。

3.3.5.1 板宽

板宽与孔径之比(W/D)主要影响复合材料机械连接的净拉伸破坏强度,随着板宽/孔径比的增加,机械连接破坏模式从净拉伸逐渐过渡到挤压,其前提条件是端距足够大。由于挤压是局部现象,进一步增加 W/D 值,对连接强度不再有影响,反而会降低连接效率。

图 3.8a 和图 3.8b 分别给出 T300/QY8911 和 T300/4211 复合材料几种层压板的挤压强度随 W/D 的变化情况。由图可见不同铺层层压板由拉伸型破坏向挤压型破坏过渡的比值 W/D 是不同的,对于推荐的连接区铺层产生挤压破坏的最小 W/D 值为 5。对于不含 $\pm 45^\circ$ 层的正交铺层(50% 0° 和 50% 90°)以及 100% $\pm 45^\circ$ 层组成的层压板,需要较大的 W/D 值才能出现挤压破坏。

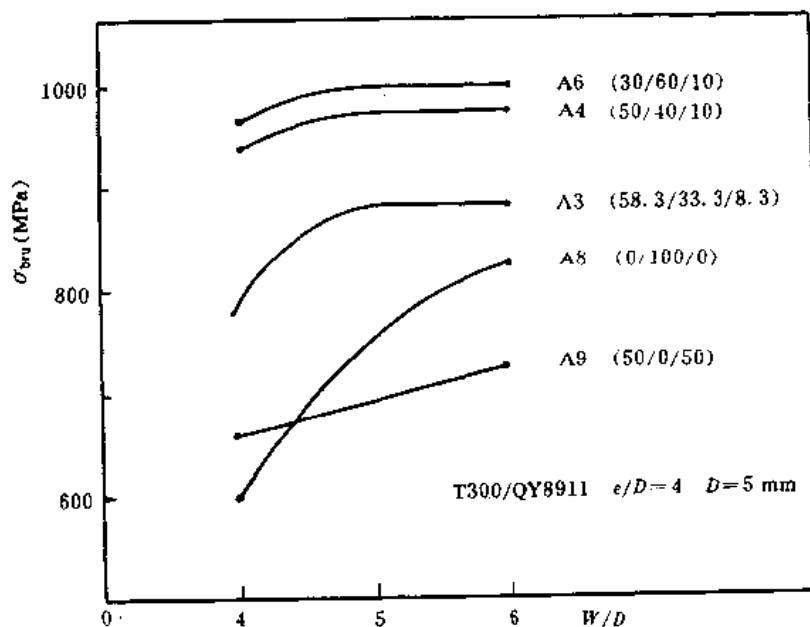


图 3.8a W/D 对 T300/QY8911 挤压强度的影响^[3-8]

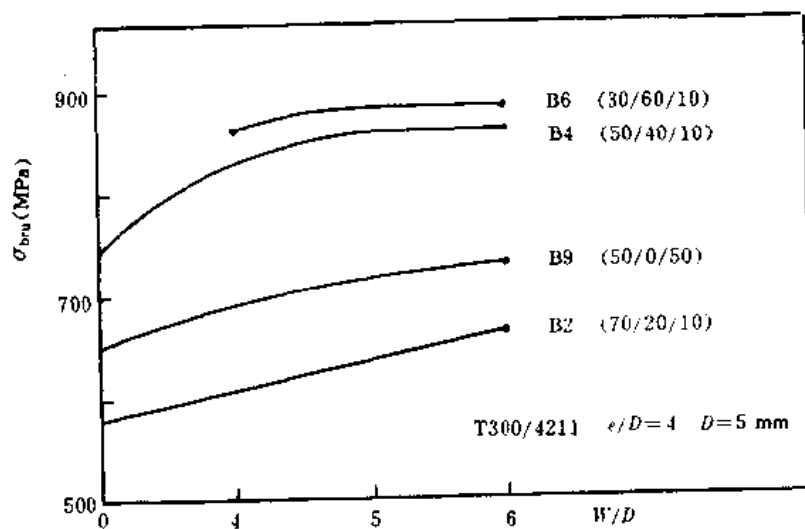


图 3.8b W/D 对 T300/4211 挤压强度的影响^[3-8]

3.3.5.2 端距

端距与孔径之比(e/D)主要影响复合材料机械连接的剪切强度。在板宽满足 $W/D \geq 5$ 的前提下,随着 e/D 的增加,接头的破坏模式由剪切过渡到挤压,在推荐的连接区铺层范围内, e/D 值不应小于 3。对于含 $\pm 45^\circ$ 层较少的层压板,要求较大的 e/D 值。

图 3.9a、图 3.9b 和图 3.9c 分别给出 T300/QY8911、T300/4211 和 T300/5222 复合材料几种层压板的挤压强度随 e/D 的变化情况。从图中可以看出,由剪切型破坏向挤压型破坏转化的 e/D 值,是随铺层的不同而变化的。

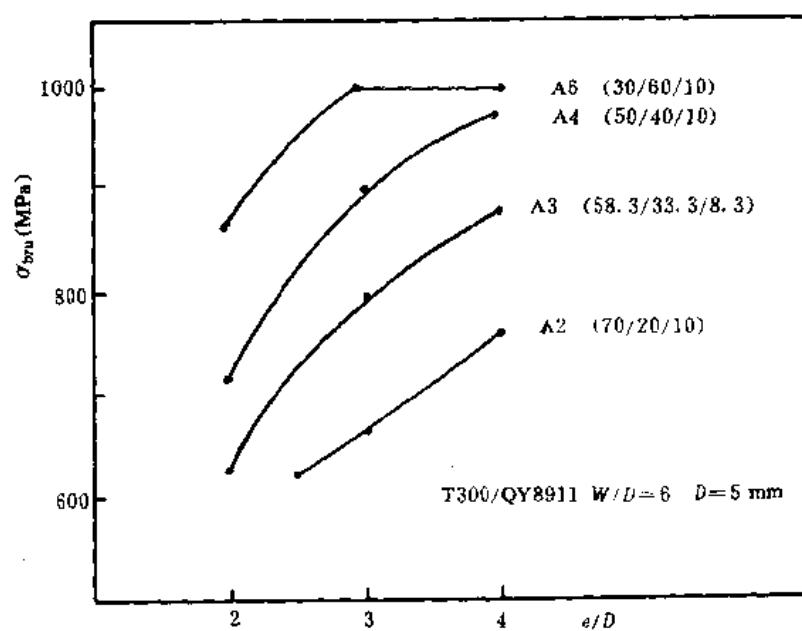


图 3.9a e/D 对 T300/QY8911 挤压强度的影响^[3-6]

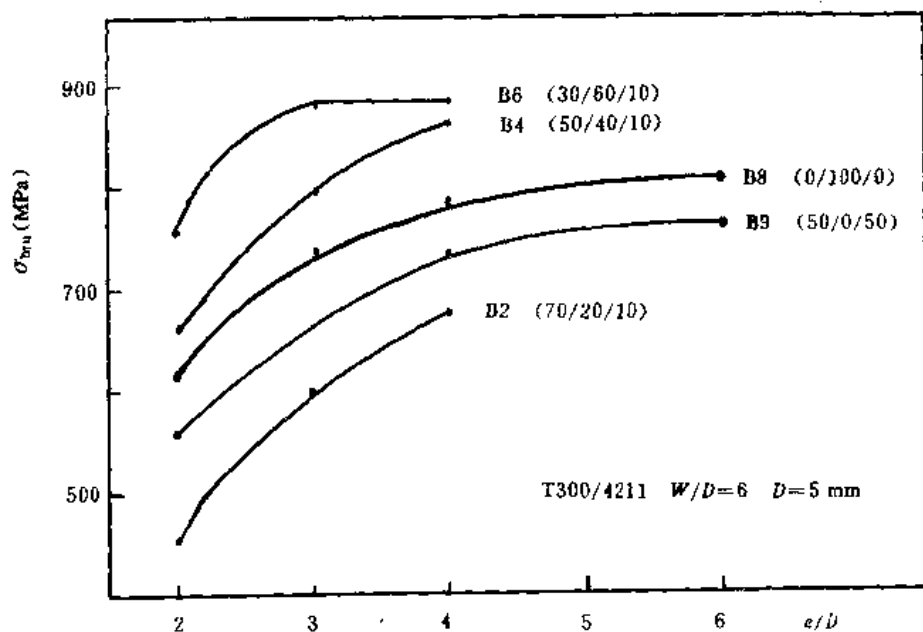


图 3.9b e/D 对 T300/4211 挤压强度的影响^[3-5]

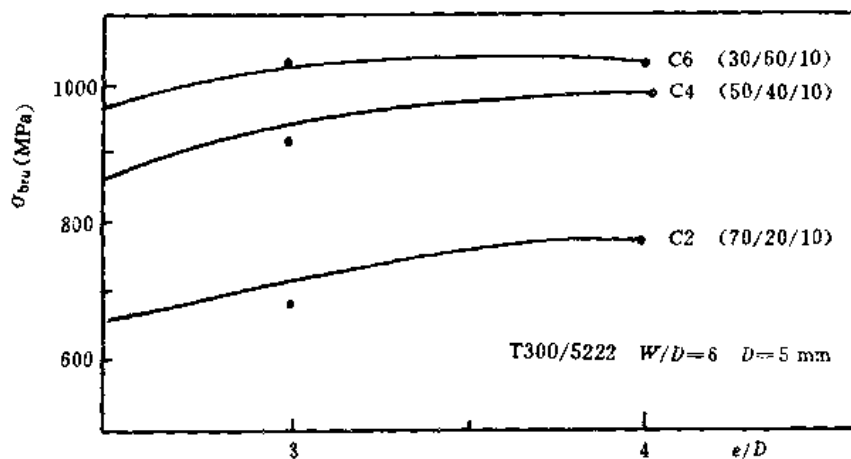


图 3.9c e/D 对 T300/5222 挤压强度的影响^[3-5]

3.3.5.3 其他尺寸

当 W/D 、 e/D 和 D/t 为常数时,随孔径增大,机械连接的破坏载荷增加,但挤压强度随之减小。

当 $D/t=1.0\sim 2.0$ 时,连接强度最佳。随 D/t 的增大,连接强度降低。当 $D/t=3$ 时,挤压强度约减小 13%。如果紧固件直径小于板厚,一般为紧固件破坏,此时计算层压板承受挤压载荷的能力时,取有效厚度 $t_e=D$ 。

3.3.6 载荷方向

对于强度和刚度等性质随纤维方向而变化的各向异性复合材料,钉载方向与层压板 0° 纤维方向的夹角将影响连接强度。

图 3.10a 和图 3.10b 分别给出了 A/DX210/BF3 和 T300/4211 及 T300/5222 碳纤维复

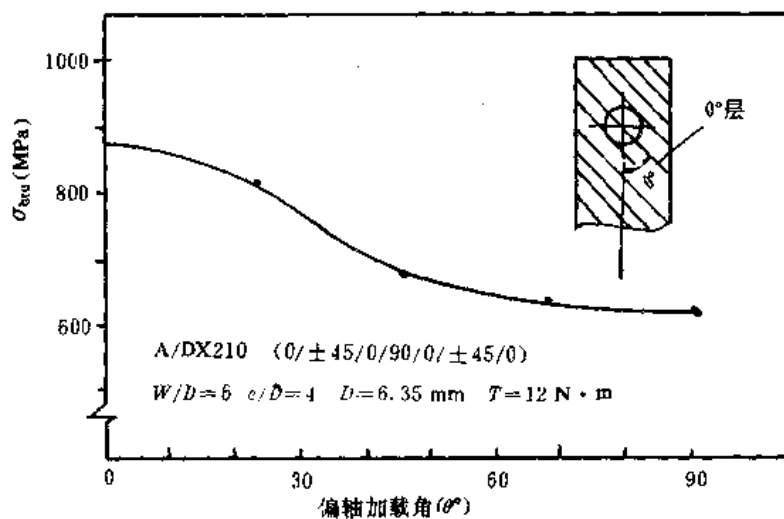


图 3.10a 载荷方向对挤压强度的影响^[3-5]

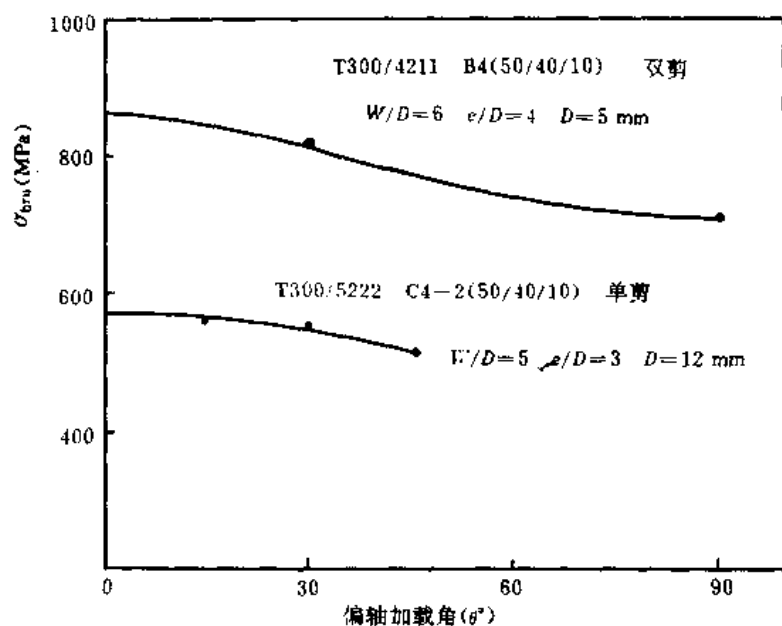


图 3.10b 载荷方向对挤压强度的影响

合材料层压板的挤压强度与载荷方向偏角之间的关系。图示表明挤压强度随载荷方向偏角的增大而降低。有试验结果表明,随着±45°层比例的增加,载荷方向偏角对挤压强度的影响将减弱。

3.3.7 沉头孔

沉头孔对较薄的层压板挤压强度有明显影响,随着板厚的增加,影响将会逐渐减小。图 3.11示出了 T300/QY8911 复合材料三种层压板单螺栓连接的试验结果。沉头孔挤压强度与非沉头孔挤压强度相比减小量在 16~20%之间。不同铺层的层压板当厚度相同时影响几乎相同。

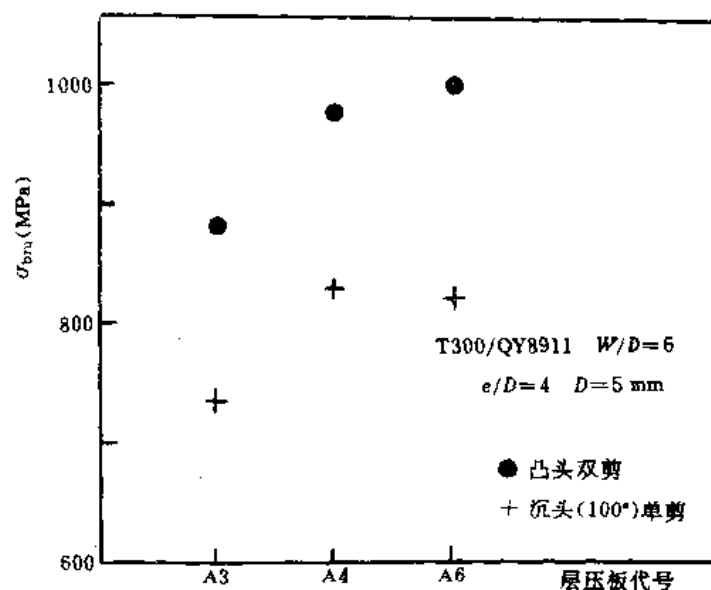


图 3.11 沉头孔对挤压强度的影响

3.3.8 湿热环境

温度、湿度和腐蚀等环境条件对树脂基复合材料层压板的挤压强度有显著影响。图 3.12a 示出了 T300/4211 复合材料的三种层压板单螺栓连接在 100℃ 吸湿 1% 时的试验结果。图 3.12b 示出了 T300/QY8911 复合材料层压板单螺栓连接在 100℃ 吸湿 1% 和 130℃ 吸湿 1% 时的试验结果。为便于比较,图上也示出了室温干态下的挤压强度。

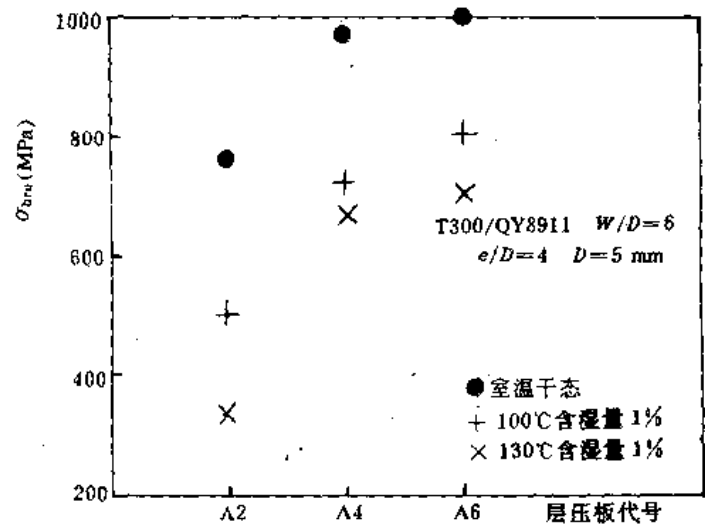


图 3.12a 环境对 T300/QY8911 挤压强度的影响^[3-6]

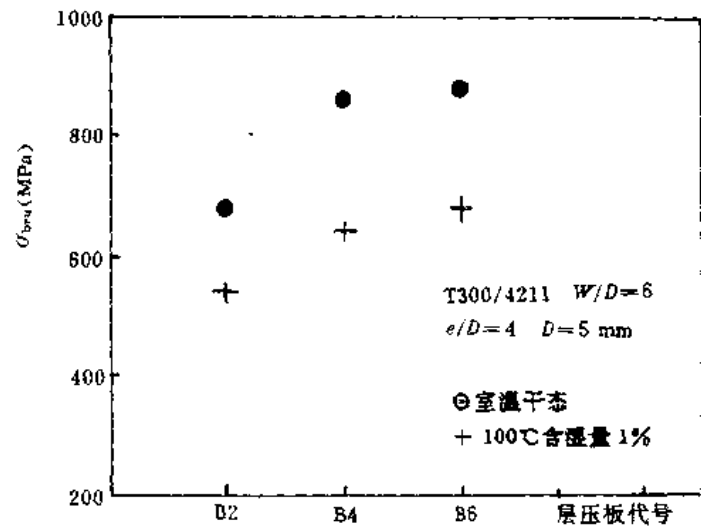


图 3.12b 环境对 T300/4211 挤压强度的影响^[3-5]

测得以上试验值的具体步骤如下:

- 试验件在自然状态下称质量。
- 试验件在 100℃ 烘干直至质量不再减少,此质量作为吸湿量比较的基准。

c. 把烘干的试件放入 $70 \pm 2^\circ\text{C}$ 蒸馏水中浸泡, 定时称质量直至试验件吸湿量达到 1% 为止。

d. 试验件放置在湿热环境炉内升温, 试验部位达到所需温度后保温 8 分钟。

e. 加载至破坏。

在整个试验过程中, 尽量保持炉内湿度, 在 100°C 时相对湿度可达 80%RH 以上。

应当指出不同材料体系的吸湿速率和吸湿饱和量是不一样的, 达到吸湿饱和和所需的浸泡温度和时间也不相同。

参 考 文 献

- [3-1] 航空航天工业部科学技术研究院. 复合材料设计手册. 北京: 航空工业出版社, 1990, 319~360
- [3-2] ASM International Handbook Committee. Engineered Materials handbook, Vol. 1. Composites, 479~495, 1988
- [3-3] Garbo S P, Ogonowski J M. Effect of Variances and Manufacturing Tolerances of Mechanically Fastened Composite Joints AD-A101657, 1981
- [3-4] 谢鸣九, 施丽中等. “铺层顺序对连接强度影响的实验研究”见《第六届全国复合材料学术会议论文集》, 北京, 1990, 11
- [3-5] Collings T A. “The Strength of Bolted Joints In: Multidirectional CFRP Laminates”. ARC, CP, 1380, 1977
- [3-6] 谢鸣九. 影响复合材料机械连接强度的因素研究. 飞机强度研究所, Q/12S-9101-69, 1991
- [3-7] 谢鸣九, 施丽中等. 螺栓拧紧扭矩对层压板挤压强度的影响研究. 飞机强度研究所, Q 12S-8801-119, 1988
- [3-8] 谢鸣九, 李武铨等. T300/QY8911 复合材料连接强度. 飞机强度研究所, 12S-9201-07, 1992

第四章 机械连接静力分析

复合材料结构机械连接的静力分析包括以下三方面内容(图 4.1)：

(一) 从总体结构分析确定机械连接所受的外力,在进行连接分析时一般均已给出；

(二) 由机械连接所受的外力确定各个钉孔处的挤压载荷和旁路载荷；

(三) 进行细节分析,得到钉孔区域的应力,利用材料的失效准则或半经验破坏包线评定机械连接的强度。

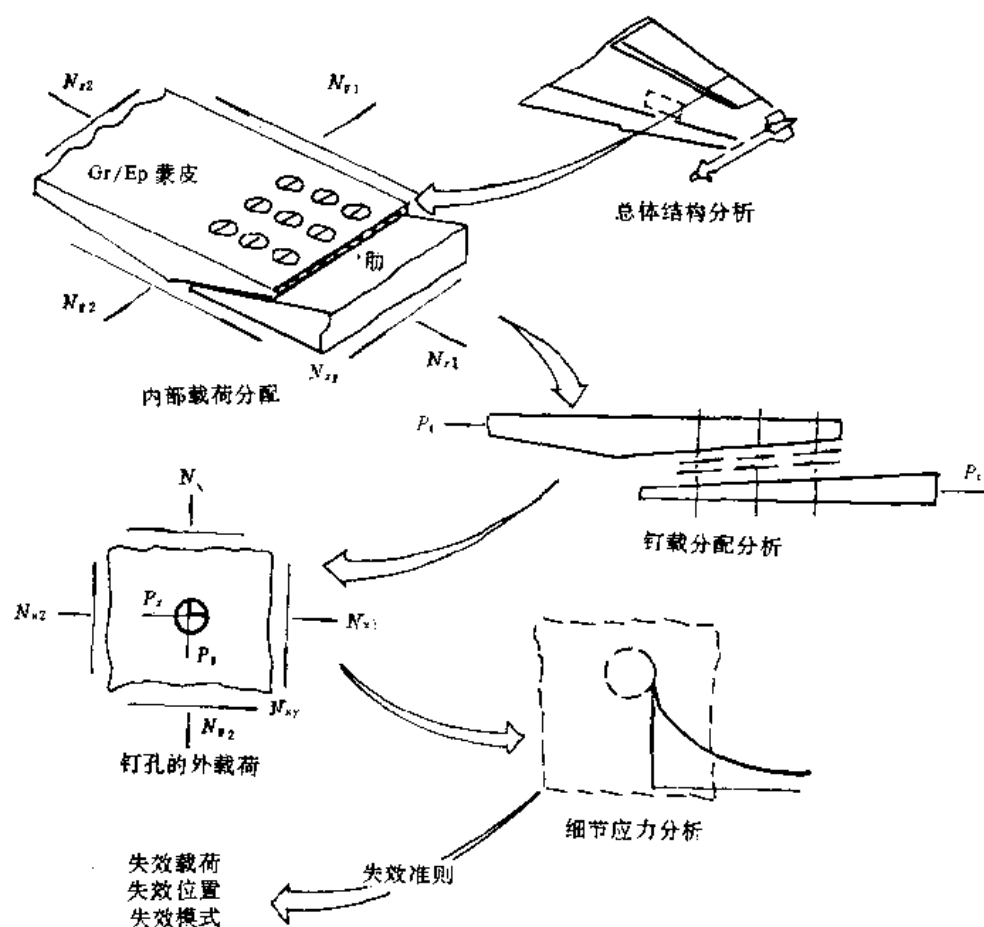


图 4.1 机械连接失效分析步骤

本章给出多排钉连接钉载分配的经典刚度计算方法和理论分析方法,单钉连接的理论分析方法和经验方法。这些方法可用于连接的初步设计,为了证实理论分析的正确性和确保结构的完整性,对于重要的机械连接,除了分析外,还应进行试验验证。

4.1 机械连接钉载分配分析

目前确定复合材料机械连接载荷分配的方法主要有两种：经典的刚度方法和有限元法。前者比较简单，适用于钉排列比较规则的机械连接，后者适用于复杂形状的机械连接。处理复合材料机械连接时，应牢记两个与金属不同的特点：第一、复合材料层压板的刚度和强度与载荷的方向有关；第二、复合材料层压板一直到破坏都呈现近似的线弹性行为，几乎不具有载荷重新分配的能力。

4.1.1 单排钉连接

单排钉连接是最简单的多钉连接形式，有如下三种情况：

a. 载荷垂直于钉排(图 4.2)

每个钉的载荷都等于单位长度作用下的载荷与钉间距的乘积。

$$P_{brn} = N_x \cdot S \quad (4.1)$$

b. 载荷平行于钉排(图 4.3)

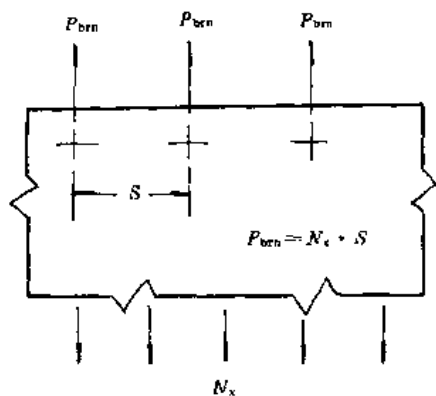


图 4.2 载荷垂直于钉排情况

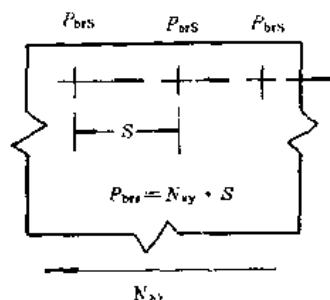


图 4.3 载荷平行于钉排情况

每个钉的载荷为：

$$P_{brn} = N_{xy} \cdot S \quad (4.2)$$

c. 轴向和剪切复合加载(图 4.4)

按向量计算每个钉的合力

$$P_{br} = \sqrt{P_{brn}^2 + P_{brs}^2} \quad (4.3a)$$

钉载方向

$$\theta = \arctan(P_{brn}/P_{brs}) \quad (4.3b)$$

单排钉连接的载荷全部由钉承受，不存在旁路载荷。

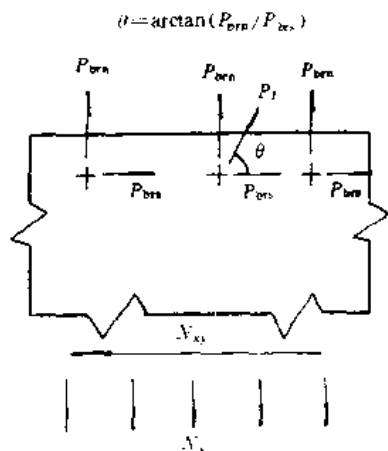


图 4.4 轴向和剪切复合加载情况

4.1.2 多排单列钉连接

多排单列钉连接见图 4.5。

下面给出的分析方法基于弹性超静定力法。可以

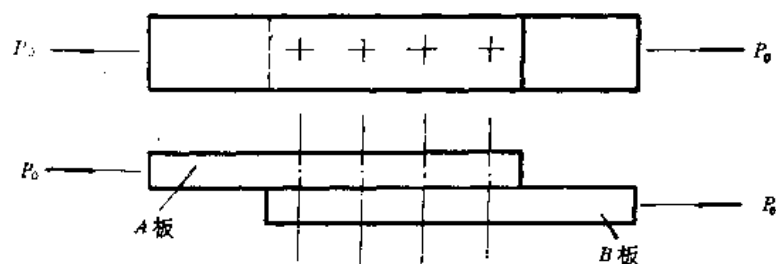


图 4.5 多排单列钉连接情况

考虑被连接板不同的拉伸刚度、不同的钉尺寸和钉间距,忽略了被连接板的弯曲刚度。平衡条件:

钉:

$$P_1 + P_2 + \dots + P_n = P_0 \quad (4.4)$$

元件板 A:

$$\begin{aligned} P_{12}^A &= P_0 - P_1 \\ P_{23}^A &= P_0 - (P_1 + P_2) \\ &\vdots \\ P_{n-1,n}^A &= P_0 - (P_1 + P_2 + \dots + P_{n-1}) \end{aligned} \quad (4.5)$$

元件板 B:

$$\begin{aligned} P_{12}^B &= P_1 \\ P_{23}^B &= P_1 + P_2 \\ &\vdots \\ P_{n-1,n}^B &= P_1 + P_2 + \dots + P_{n-1} \end{aligned} \quad (4.6)$$

相容性条件:

$$\begin{aligned} \Delta_1 - \Delta_2 &= \Delta_{12}^A - \Delta_{12}^B \\ \Delta_2 - \Delta_3 &= \Delta_{23}^A - \Delta_{23}^B \\ &\vdots \\ \Delta_{n-1} - \Delta_n &= \Delta_{n-1,n}^A - \Delta_{n-1,n}^B \end{aligned} \quad (4.7)$$

载荷-位移关系:

$$\begin{aligned} \Delta_i &= \frac{P_i}{K_i} \\ \Delta_{i,i+1}^A &= \frac{P_{i,i+1}^A}{K_{i,i+1}^A} \\ \Delta_{i,i+1}^B &= \frac{P_{i,i+1}^B}{K_{i,i+1}^B} \\ K_{i,i+1}^A &= E_x W^A t^A / L^A \end{aligned} \quad (4.8)$$

式中 P_i —— 第 i 个钉的载荷;

$P_{i,i+1}^A$ —— 第 i 和 $i+1$ 个钉之间板 A 的轴向载荷;

Δ_i ——第 i 个钉的剪切引起的位移;

$\Delta_{i,i+1}^A$ ——第 i 和 $i+1$ 个钉之间板 A 的长度变化;

K_i^s ——第 i 个钉的剪切刚度;

$K_{i,i+1}^A$ ——第 i 和 $i+1$ 个钉之间板 A 的轴向拉伸刚度;

E_s^A ——第 i 和 $i+1$ 个钉之间板 A 的拉伸弹性模量;

W^A ——第 i 和 $i+1$ 个钉之间板 A 的有效宽度;

t^A ——第 i 和 $i+1$ 个钉之间板 A 的有效厚度;

L^A ——板 A 第 i 和 $i+1$ 个钉之间的间距。

在上述式中将上标改为 B 即为 B 板相应的值。

将方程(4.8)代入(4.7)得

$$\frac{P}{K_i^s} - \frac{P_{i-1}}{K_{i+1}^s} = \frac{P_{i,i-1}^A}{K_{i,i+1}^A} - \frac{P_{i,i+1}^B}{K_{i,i+1}^B} \quad (4.9)$$

将方程(4.4)~(4.6)代入方程(4.9)

$$\left. \begin{aligned} \frac{P_1}{K_1^s} - \frac{P_2}{K_2^s} &= \frac{P_0 - P_1}{K_{12}^A} - \frac{P_1}{K_{12}^B} \\ \frac{P_2}{K_2^s} - \frac{P_3}{K_3^s} &= \frac{P_0 - (P_1 + P_2)}{K_{23}^A} - \frac{P_1 + P_2}{K_{23}^B} \\ &\vdots \\ \frac{P_i}{K_i^s} - \frac{P_{i+1}}{K_{i+1}^s} &= \frac{P_0 - (\sum_{j=1}^i P_j)}{K_{i,i+1}^A} - \frac{(\sum_{j=1}^i P_j)}{K_{i,i+1}^B} \\ &\vdots \\ \frac{P_{n-1}}{K_{n-1}^s} - \frac{P_n}{K_n^s} &= \frac{P_0 - (\sum_{j=1}^{n-1} P_j)}{K_{n-1,n}^A} - \frac{\sum_{j=1}^{n-1} P_j}{K_{n-1,n}^B} \\ P_n &= P_0 - (\sum_{j=1}^{n-1} P_j) \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

利用 P_0 解 P_i

$$[B] \{P_i\} = \{C\} \quad (4.11)$$

或

$$\{P_i\} = [B]^{-1} \{C\} \quad (4.12)$$

板 A 中第 i 个钉处的旁路载荷

$$P_{byi}^A = P_0 - \sum_{j=1}^i P_j \quad (4.13)$$

而板 B 中

$$P_{byi}^B = \sum_{j=1}^{i-1} P_j \quad (4.14)$$

当 $n=3$ 排钉时

$$\frac{P_1}{K_1^s} + \frac{P_1}{K_{12}^B} + \frac{P_1}{K_{12}^A} - \frac{P_2}{K_2^s} = \frac{P_0}{K_{12}^A}$$

或

$$P_1\left(\frac{1}{K_1^S} + \frac{1}{K_{12}^B} + \frac{1}{K_{12}^A}\right) + P_2\left(-\frac{1}{K_2^S}\right) = \frac{P_0}{K_{12}^A}$$

同样

$$P_1\left(\frac{1}{K_{23}^A} + \frac{1}{K_{23}^B}\right) + P_2\left(\frac{1}{K_2^S} + \frac{1}{K_{23}^A} + \frac{1}{K_{23}^B}\right) + P_3\left(-\frac{1}{K_3^S}\right) = \frac{P_0}{K_{23}^A} \quad (4.15)$$

$$P_1(1) + P_2(1) + P_3(1) = P_0$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{K_1^S} + \frac{1}{K_{12}^B} + \frac{1}{K_{12}^A}\right) & \left(-\frac{1}{K_2^S}\right) & 0 \\ \left(\frac{1}{K_{23}^A} + \frac{1}{K_{23}^B}\right) & \left(\frac{1}{K_2^S} + \frac{1}{K_{23}^A} + \frac{1}{K_{23}^B}\right) & \left(-\frac{1}{K_3^S}\right) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$$\{C\} = \begin{Bmatrix} \frac{P_0}{K_{12}^A} \\ \frac{P_0}{K_{23}^A} \\ P_0 \end{Bmatrix} \quad (4.17)$$

和

$$\{P_i\} = \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{Bmatrix} = [B]^{-1} \{C\} \quad (4.18)$$

旁路载荷计算公式同方程(4.13)和(4.14)。

4.1.3 多排多列钉规则排列连接

确定多排多列钉连接钉载分配的关键是有效宽度。如果确定出有效宽度,就可用前述方法求解钉载分配。分以下两种情况处理:

a. 钉规则布置(图 4.6)

此时,单列钉连接分析所用的连接区宽度取钉列之间的间距。

b. 钉布置比较复杂(图 4.7)

除蒙皮外,其他组合件上的连接区有效宽度均可用上面的方法处理。为简单起见,假设有效蒙皮宽度按线性变化,如图 4.7 所示。

4.1.4 多钉非规则分布的复杂连接

多钉非规则分布的复杂连接,目前普遍采用有限元素法求钉载分配。本节简介求钉载分配时有限元模型的选取,和复合材料层压板解析法。文献[4-2]中采用各向异性体平面弹性理论中的复势方法求解多钉非规则分布的复合材料层压板机械连接问题。文献[4-3]中综述多钉连接分析的各种方法,介绍计算机软件,并给出各种理论方法求解钉载分配的计算结果与实验数据的比较。

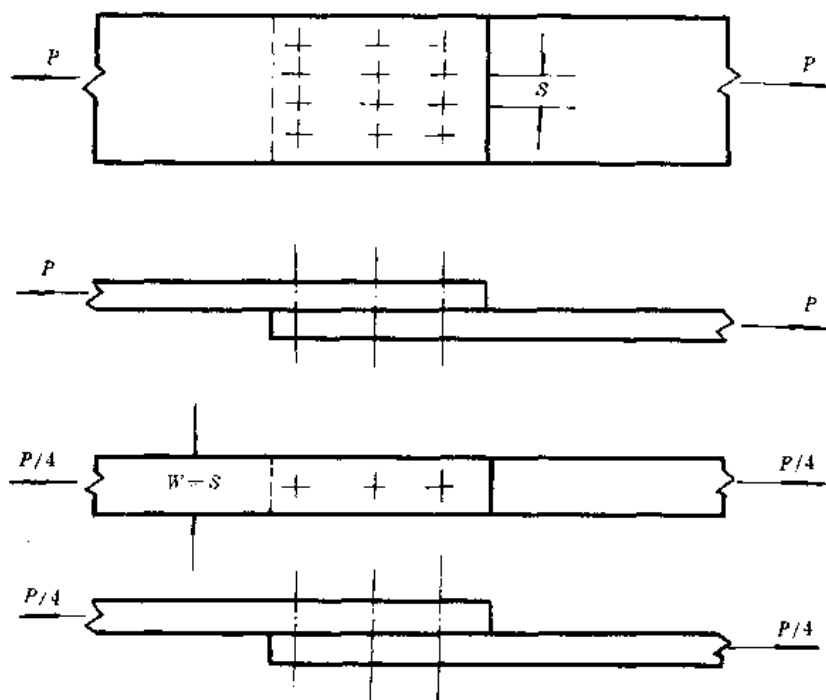


图 4.6 规则布置的多钉连接

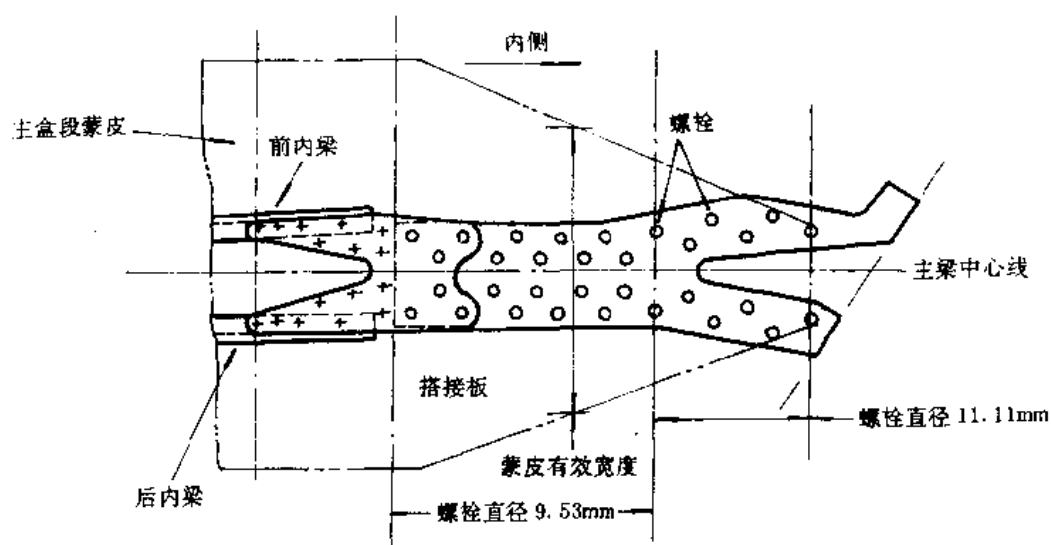


图 4.7 比较复杂的多钉连接

4.1.4.1 有限元素法

有限元素法求解钉载分配的要点是将钉视为钉元素,将钉元素的两个端点置于被连接件的有限元网格节点上,如图 4.8 所示。

钉元素的力学特性有各种方法表示,工程上通常用剪切钉元及梁元模拟钉。此外,为了比较精确的求出孔边应力场,在钉与孔接触处设置间隙元(GAP 元)。

a. 剪切钉元

剪切钉元以剪切形式传递载荷。在 MSC/NASTRAN 程序中一般用 CELAS2 元素模拟剪切钉元。

CELAS2 元素本身为标量(零维)元素,通常可以定义为结构模型中的标量弹簧元素,即连接两个几何节点或标量点,但只有一个自由度,力的分量只有轴向力或扭矩。如果两个几何节点中的任一个为基础连接点,则该点的自由度分量号可以省略。

用 CELAS2 元素模拟剪切钉元,只能在受载平面内使用。为了求出钉载的大小和方向,每个钉至少要用受剪平面内两个方向的 CELAS2 元素。钉元的剪切刚度可以用 4.1.5 节中介绍的方法进行计算,即 $K = \frac{1}{a}$ 。

b. 短梁元

对于厚板连接,需要考虑弯曲效应,这时采用短梁元模拟钉。短梁元可采用 MSC/NASTRAN 程序中的 BAR 元素。

BAR 元素属于一维元素,由两个节点 GA 和 GB 相连,剖面弯曲特性的方向由第三个节点或定向矢量 V 确定。力的分量有轴向力、扭矩、两个平面内的剪力及弯矩。

在有限元分析中,用 BAR 元素模拟钉元时,一般只考虑两个平面内的剪力。在使用中,两个节点可按图 4.8 中所示的 A 板和 B 板上的两个节点编号来填写,其截面积、两个平面惯性矩、扭转刚度以及弹性常数等可选用紧固件的实际几何及力学特性。BAR 元素可直接求出钉载的大小和方向。

c. 间隙元

• 间隙元的基本概念

在 MSC/NASTRAN 程序中,间隙元用 GAP 元来表示。GAP 元经常用于表面接触问题中模拟点与点的接触。设两点为 GA、GB,此元素连接 GA、GB 两点,设两点连接方向为 x ,其它方向为 y 和 z 。

1) 当 GAP 元张开(即两点无接触)且无侧向刚度时,

$$F_x = K_a u \leq 0; \quad F_y = F_z = 0$$

其中 F_x, F_y, F_z 分别为接触力在 x, y, z 方向的分量,这里主要关心 F_x ,以受压为正。 K_a 为张开时刚度。

2) 当 GAP 元闭合,且无摩擦时,

$$F_x = K_c u > 0; \quad F_y = F_z = 0$$

其中, K_c 为闭合时的刚度。当考虑摩擦时, $F_y, F_z \neq 0$ 。

3) K_a, K_c 取值

K_a, K_c 取值大小对计算结果有影响,建议取值如下:设两接触体在该接触点 x 方向的刚度分别为 $\bar{K}_a, \bar{K}_b$,

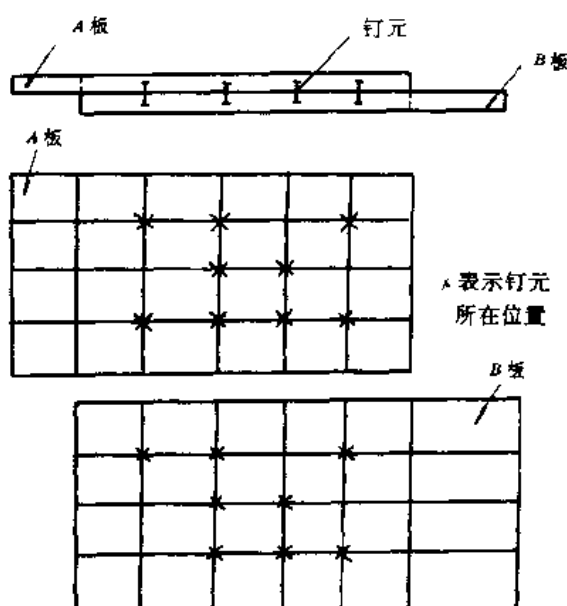


图 4.8 连接分析的有限元网格

$$K_a \geq 1000 \times \max(\bar{K}_a, \bar{K}_b)$$

$$K_b = 10^{-3} \times \min(\bar{K}_a, \bar{K}_b)$$

• GAP 元在连接分析中的应用

应用 GAP 元求解多钉连接钉载分配与求解孔边应力场时相比,有限元模型取法应有所不同。如图 4.9 所示,钉两端与 A、B 板的孔接触面处要用若干 GAP 元,求出各 GAP 元的 F_x 、 F_y ,钉载便求得。在求钉载分配时,可将钉视为单一梁元,见图 4.9d。

一般在钉数目较多的非规则分布复杂连接中,不宜采用 GAP 元求钉载分配,因为,钉与孔接触面未知,在整个圆周上都要设置接触元素,计算规模太大,数据准备工作量大,且应用 GAP 元素的接触分析中要多次迭代计算,计算时间长。有关 GAP 元详细情况,参阅文献[4-4]。

通常在工程分析中,可首先使用梁元或弹簧元求解出钉载的大小和方向,再使用间隙元进行钉孔周围的细节分析。

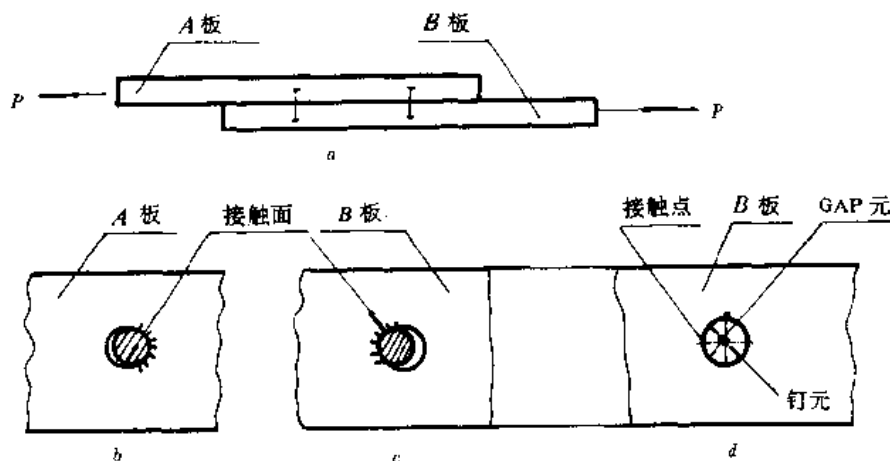


图 4.9 用 GAP 元计算连接问题示意图

4.1.4.2 解析法

如图 4.10 所示的复杂连接结构,有 L 个随意分布且孔径大小不等(也可为椭圆)的孔,由 L 个钉将板 A、B 连接。板 A、B 各边可任意加载(力的边界条件)或提供支持(位移边界条件)。A、B 板可为任意多边形。板边载荷可为任意函数关系,但两块板通过钉连接在一起组成的结构必须处于力的平衡状态。第 i 个孔钉载为 P_{bi} ,它与 x 轴夹角为 θ_i 。钉载 P_{bi} 及 A、B 板的应力场通过此解析法求解得到。

本方法采用各向异性体平面弹性理论中的复势方法,利用保角映射及 Faber 级数,给出任意有限个椭圆(或圆)孔有限大层板平面弹性问题的级数解形式。对有载孔,孔的载荷视为孔边某种分布载荷的力的边界条件(方向及大小均未知),应用最小二乘配点法,导出内边界条件精确满足、外边界条件任意精度满足的诸复势函数,从而完全确定多孔有限大层板的弹性解。由于孔边的边界力及方向(钉载)为未知,为求解钉载,必须建立两个板在连接处的变形协调方程及总的力的平衡方程:

协调方程

A、B 板在第 i 个孔的 $\theta = \theta_i$ 处的位移分别为:

$$\begin{aligned} W_i^A &= U_i^A + i V_i^A \\ W_i^B &= U_i^B + i V_i^B \end{aligned} \quad (4.19)$$

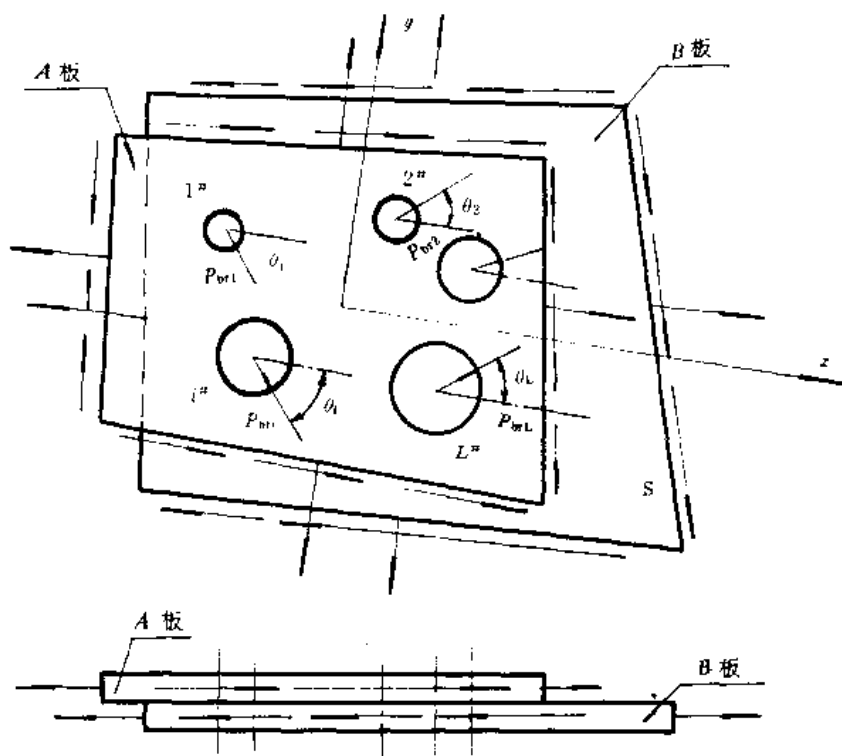


图 4.10 连接分析模型

第 i 个钉变形为:

$$\delta_i = \delta_{i1} + i \delta_{i2} \quad (4.20)$$

则变形协调方程为:

$$W_i^A - W_i^B = \delta_i \quad (i=1, 2, \dots, L) \quad (4.21)$$

平衡方程

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^L X_i &= P_x \\ \sum_{i=1}^L Y_i &= P_y \end{aligned} \quad (4.22)$$

其中, X_i, Y_i 为第 i 个孔边的应力主矢量。

此方法计算过程及程序较为复杂, 详见文献[4-2]及[4-3]。

4.1.5 钉的柔度

复杂机械连接中超静定内力的分配取决于被连接板和钉的刚度。每个钉对连接区柔度的贡献与钉的刚度、被连接板刚度和载荷偏心度有关。

图 4.11 示出了单钉连接典型的载荷—变形曲线。载荷—变形行为总体上是非线性的。从 O 到 A 表示克服连接区摩擦, 从 A 滑移到 B 表示消除间隙, 从 B 到 C 曲线基本上是线性的, 可以用线性方程来描述。在 C 和 D 之间, 由于铺层局部破损或钉的屈服, 使刚度行为再次变成

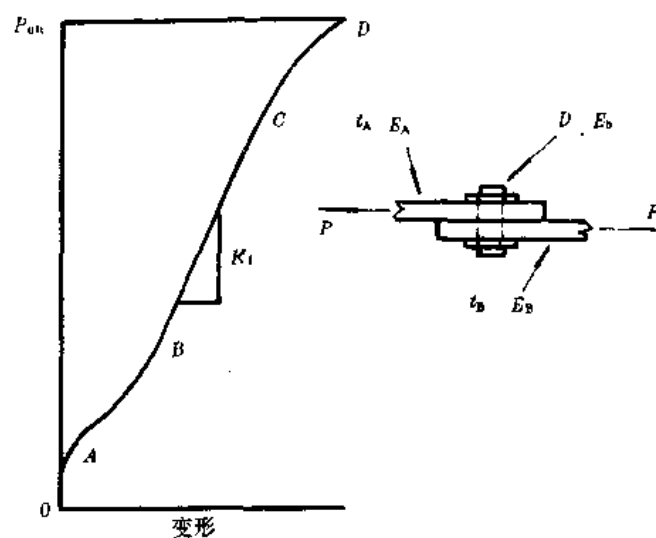


图 4.11 单钉连接的载荷—变形曲线

非线性。在 D 点达到复合材料层压板的破坏强度或者钉的剪切强度。

通常忽略钉与孔的摩擦和间隙,假设钉的载荷—变形行为在加载期间自始至终是线性的。对于初步设计、钉的柔度可以采用下述半经验公式。

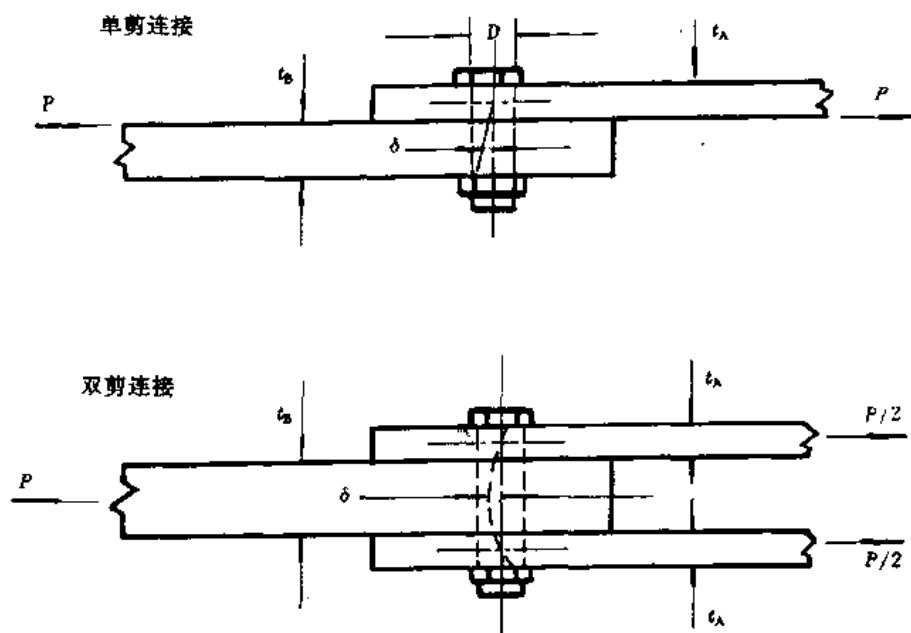


图 4.12 机械连接的柔度关系

单剪机械连接的柔度关系式(图 4.12)。

$$\frac{\delta}{P} = \frac{(t_A + t_B)^2}{E_b D^3} + (3.72) \left(\frac{1}{t_A E_{XA}} + \frac{1}{t_B E_{XB}} \right) \quad (4.23a)$$

双剪机械连接的柔度关系式(图 4.12)

$$\frac{\delta}{P} = \frac{(t_A + t_B/2)^2}{2E_b D^3} + \left(\frac{2}{t_A E_{XA}} + \frac{1}{t_B E_{XB}} \right) \quad (4.23b)$$

式中 P ——钉的载荷(N);

E_b ——钉的弹性模量(MPa);

D ——钉的直径(mm);

t_A ——外板厚度(mm);

t_B ——内板厚度(mm);

E_{XA} ——外板纵向弹性模量(MPa);

E_{XB} ——内板纵向弹性模量(MPa);

δ ——钉的中心在内板中面相对于外板中面的位移(mm)。

初步阶段可应用下述比较简单的钉柔度 α 关系式:

$$\alpha = \frac{1}{K_s} = \frac{l}{A_s G} \quad (4.24)$$

式中 K_s ——钉的剪切刚度;

A_s ——钉的剪切面积;

G ——钉的剪切模量;

l ——钉的有效长度。

单剪情况的有效长度 l 取被连接板总厚度的 $1/4$, 双剪的有效长度取单剪值的 $1/2$ 。式(4.24)只考虑了钉的剪切, 忽略了(单剪搭接)钉弯曲和刚体旋转的影响。因此用式(4.24)得到的钉载分布将比用式(4.23)得到的值更为严重。顺便指出, 在多数情况下钉的刚度对孔的最终挤压破坏载荷的影响较小。

4.2 机械连接的理论分析方法

本节在钉载分配分析的基础上给出计算单钉孔的细节应力分布和强度预示的理论方法, 经验方法在下节给出。

机械连接的理论分析方法主要有解析法和有限元素法, 包括应力分析和强度估算两方面内容。首先, 由作用的挤压载荷和旁路载荷, 计算钉孔附近的应力或应变分布; 然后选择合适的失效准则估算其强度和破坏模式。影响复合材料机械连接强度的因素很多, 如纤维铺叠方式、几何尺寸和拧紧力矩等, 理论分析方法不可能考虑所有这些因素。另一方面, 关于复合材料的失效准则仍在研究之中, 至今还没有一种准则被公认是普遍适用的。因此, 估算的连接强度往往与试验结果有一定偏差。

本节推荐两种典型的理论分析方法, 其结果具有较好的工程估算精度。

4.2.1 应力计算方法

这里介绍的计算方法只限于讨论平面应力情况, 假设应变沿厚度方向为常数, 钉无限刚硬, 也不考虑层间应力。

4.2.1.1 有限元素法

单钉双剪连接的计算模型如图 4.13 所示。层压板的铺层取向可以任意, 但必须关于 $Z=0$ 平面对称。板对 X 轴对称, 孔位于板中心。外力与板平行, 并对称于中线。

由对称性,只取二分之一板块,对称面按铰支处理。采用四节点等参元,网格划分如图 4.14 所示。

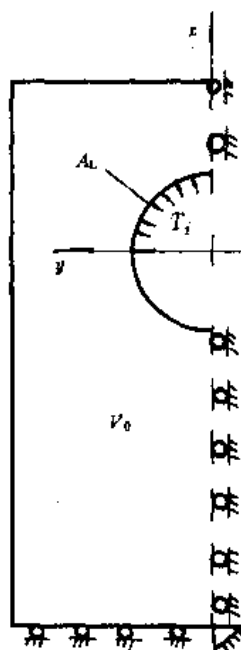


图 4.13 单钉双剪连接
计算模型

计算中作如下假设:

- a. 材料为线弹性

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (4.25)$$

$$\epsilon_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right)$$

- b. 作用在孔半周上的销钉力服从余弦分布

$$T_1 = -\frac{4P}{\pi D} n_i \cos \theta \quad (4.26)$$

式中 n_i 为单位矢量。

- c. 每个单元的位移可用节点位移表示:

$$u_i = N_\alpha q_{i\alpha} \quad (\alpha = 1, 2, 3, 4) \quad (4.27)$$

式中 N_α 是形状函数, $q_{i\alpha}$ 为节点 α 在 i 方向的位移。

由平衡方程和边界条件,应用虚功原理,通过一系列运算可得有限元计算的基本方程:

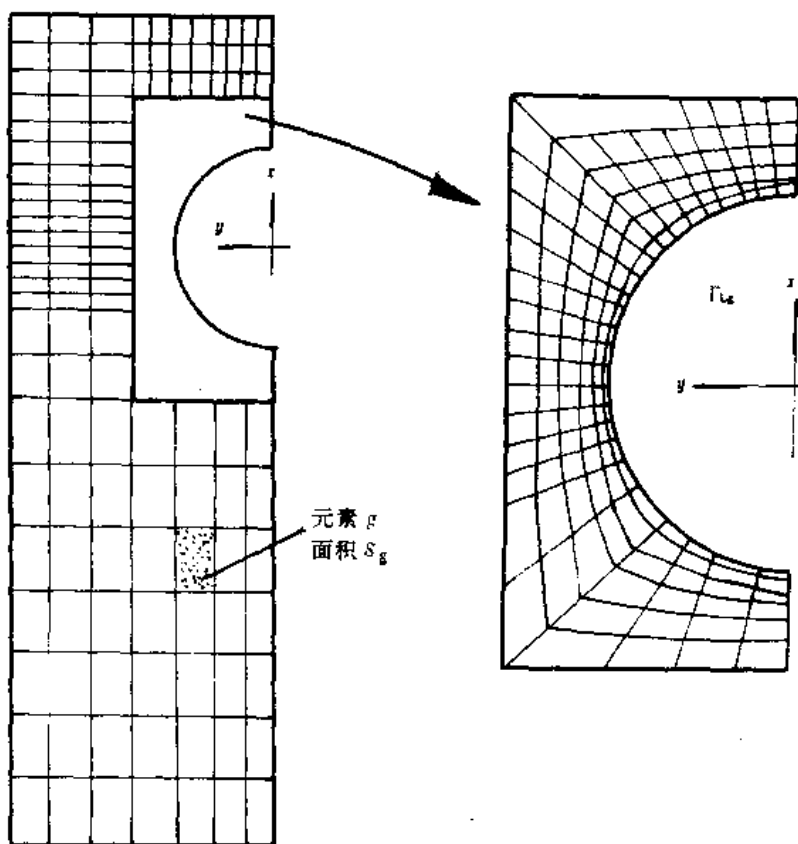


图 4.14 有限元网格划分

$$\bar{K}_{ijk\alpha} \cdot q_{k\alpha} = \bar{F}_{i\beta} \quad (4.28)$$

式中

$$\begin{aligned} \bar{K}_{ijk\alpha} &= \sum_{k=1}^M K_{ijk\alpha}^k \\ K_{ijk\alpha}^k &= \iint_{s_g} E_{ijkl} N_{\alpha,i} N_{\beta,j} ds \\ \bar{F}_{i\beta} &= \sum_{k=1}^M \int_{\Gamma_{Lg}} \frac{-4P}{\pi D} n_i N_{\beta} \cos \theta d\Gamma \end{aligned}$$

(4.28)式中的 $\bar{K}_{ijk\alpha}$ 和 $\bar{F}_{i\beta}$ 是已知的,于是可用高斯消去法求出点位移 $q_{k\alpha}$,然后代入式(4.27)求出单元位移 u_i ,应变与应力就随之由式(4.25)求得。

上述方法进一步发展考虑大变形和剪切应变的非线性,对不同失效模式采用相应不同的失效判据,以及失效层的刚度削减,详见参考资料[4-6]。

上述有限元素法只能计算由钉载产生的应力,不能考虑旁路载荷的影响。

4.2.1.2 解析法(一)^[4-7]

首先用复变应力函数方法计算了含钉载孔均质正交各向异性半无限大板受压缩载荷时的应力,然后把结果推广到实际结构中经常遇到的其他受载情况。

这种方法的突出优点是能得到孔边应力的封闭解析表达式,不需要假设钉载的分布类型,可以方便地计算与分析铺层、板宽、摩擦系数、旁路载荷和载荷类型等多种参数对应力分布的影响。得到的销钉位移表达式还可用于最大变形准则估算挤压强度。当钉载合力与层压板弹性主轴不一致时,可方便又较精确地算出销钉位移方向与载荷方向的夹角,这对多钉连接载荷分配计算十分重要。

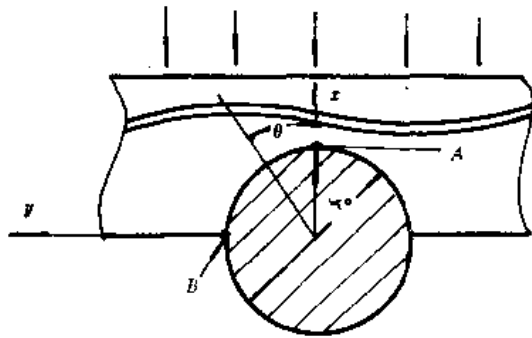


图 4.15 销钉挤压计算模型

研究图 4.15 所示在销钉载荷 P (合力) 作用下的均质正交各向异性板,载荷 P 的方向与 x 轴一致,座标轴 x 与 y 可以不是板的弹性主轴。设销钉无限刚硬,钉径与孔径一致,均为 r_0 。相应的满足孔边位移边界条件的复变应力函数表达式为:

$$\begin{aligned} \Phi_1(z_1) &= A_1 \ln \xi_1 + \left\{ \frac{C-1}{2C} \cdot \frac{q_2 - ip_2}{2D} - \frac{C+1}{C} \cdot \frac{ip_2}{2D} \right\} \frac{u_0}{\xi_1^2} + \frac{C+1}{2C} \cdot \frac{q_2 - ip_2 u_0}{2D} \frac{1}{\xi_1^4} \\ \Phi_2(z_2) &= A_2 \ln \xi_2 + \left\{ -\frac{C-1}{2C} \cdot \frac{q_1 - ip_1}{2D} + \frac{C+1}{C} \cdot \frac{ip_1}{2D} \right\} \frac{u_0}{\xi_2^2} - \frac{C+1}{2C} \cdot \frac{q_1 - ip_1 u_0}{2D} \frac{1}{\xi_2^4} \end{aligned} \quad (4.29)$$

式中 C 和 u_0 为两个待定数,它们的物理意义为:

u_0 —— A 点位移值,也即销钉的位移值;

u_0/C —— B 点的位移值。

$$\xi_k = \frac{z_k + \sqrt{z_k^2 - r_0^2 - \mu_k r_0^2}}{r_0(1 - \mu_k)} \quad (k=1,2) \quad (4.29a)$$

$$z_k = x + \mu_k y$$

μ_1, μ_2 为与变形协调微分方程相对应的代数方程的两个复数根。 $q_k, p_k (k=1, 2)$ 和 D 是与材料弹性常数有关的参量, 见[4-8]。

当 x 与 y 轴与板的弹性主轴一致时, 解出孔边的应力表达式为:

$$\sigma_r = \frac{(C-1)}{Cgr_0} u_0 \cdot n(1-k) \cos 5\theta + \frac{u_0}{Cgr_0} \left[(C+1) \cdot (3\nu_{12} - 3k - kn) + \frac{(C-1)}{2} n(1-k) \right] \cos 3\theta - \left[\frac{P}{\pi r_0} + \frac{(C-1)u_0}{2Cgr_0} (2k - 2\nu_{12} + nk + n) + \frac{(C+1)u_0}{Cr_0} (k - \nu_{12} + n) \right] \cos \theta \quad (4.30)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{u_0(C+1)}{Cgr_0} n(1-k) \sin 5\theta - \frac{u_0}{Cr_0} \left[(C+1)(k - \nu_{12} + nk + 2n) + \frac{(C-1)}{2} n(1-k) \right] \sin 3\theta + \left[\frac{P}{\pi r_0} - \frac{(C-1)u_0}{2Cgr_0} (2k - 2\nu_{12} + nk + n) - \frac{(C+1)u_0}{Cgr_0} (k - \nu_{12} + n) \right] \sin \theta \quad (4.31)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} k &= \left(\frac{E_x}{E_y} \right)^{\frac{1}{2}} \\ n &= \left[2(k - \nu_{12}) + \frac{E_x}{G} \right]^{\frac{1}{2}} \\ g &= \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{E_y} + \frac{k}{G} \end{aligned} \right\} \quad (4.32)$$

$$\left. \begin{aligned} C &= \frac{B_1 - A_1}{A_1} \\ u_0 &= \frac{g}{\pi} \cdot \frac{P}{2A_1(\nu_{12} - nk - k) - B_1(\nu_{12} + nk - k)} \end{aligned} \right\} \quad (4.33)$$

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= (19n + 11nk + 10k - 10\nu_{12}) + f(11n - 6nk + 15k - 16\nu_{12}) \\ B_1 &= 10n(1-k) + 10f(3k - 3\nu_{12} + 2nk + n) \end{aligned} \right\} \quad (4.34)$$

上式中, E_x, E_y, G 和 ν_{12} 为正交各向异性板的主弹性常数; f 为销钉与复合材料孔之间的摩擦系数。

孔边切向正应力 σ_θ 可分为几个分应力叠加, 叠加式见表 4.1, 分应力表达式为:

$$\sigma_{\theta 1} = \frac{P}{\pi r_0} \frac{E_0}{E_x} \left[-\nu_{12} \cos^4 \theta - (k^2 - 1 + 2\nu_{12}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + (2 + 2k - \nu_{12} - n^2) \sin^4 \theta \right] \cos \theta \quad (4.35)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta 2} &= \frac{(C-1)u_0}{Cgr_0} \frac{E_0}{E_x} \left\{ \left[\frac{n}{2} \cos 2\theta - (\sin^2 \theta - k \cos^2 \theta) \right] [(1+2k)(k - \nu_{12} + n) \cos^2 \theta \right. \\ &\quad \left. - (k\nu_{12} + n^2k - k^2 - n\nu_{12}) \sin^2 \theta] \sin \theta \sin 2\theta + [\cos 2\theta (\sin^2 \theta - k \cos^2 \theta) + \frac{n}{2} \sin^2 2\theta] \right. \\ &\quad \left. [(k - n^2 - \nu_{12} + n\nu_{12}) \cos^2 \theta + (2+k)(nk + k - \nu_{12}) \sin^2 \theta] \cos \theta \right\} \end{aligned} \quad (4.36)$$

$$\sigma_{\theta 3} = \frac{2(C+1)u_0}{Cgr_0} \frac{E_0}{E_x} \left\{ \left[\frac{n}{2} \cos 2\theta - (\sin^2 \theta - k \cos^2 \theta) \right] \cdot [n(1+2k) \cos^2 \theta + n\nu_{12} \sin^2 \theta] \right.$$

$$\sin\theta\sin2\theta + [\cos2\theta(\sin^2\theta - k\cos^2\theta) + \frac{n}{2}\sin^22\theta] \\ [(k - n^2 - \nu_{12})\cos^2\theta + (k - \nu_{12})(2 + k)\sin^2\theta]\cos\theta \} \quad (4.37)$$

$$\sigma_{\theta 4} = \frac{2(C+1)u_0 E_\theta}{C g r_0 E_x} \left\{ \left[\frac{n}{2}\cos4\theta - 2\cos2\theta(\sin^2\theta - k\cos^2\theta) \right] \right. \\ [(1+2k)(k - \nu_{12} + n)\cos^2\theta - (k\nu_{12} + n^2k - k^2 - \nu_{12}n)\sin^2\theta]\sin\theta\sin2\theta + \\ \left. [\cos4\theta(\sin^2\theta - k\cos^2\theta) + \frac{n}{2}\sin2\theta\sin4\theta] \right. \\ \left. [(k - n^2 - \nu_{12} + n\nu_{12})\cos^2\theta + (2+k)(nk + k - \nu_{12})\sin^2\theta]\cos\theta \right\} \quad (4.38)$$

$$\frac{1}{E_\theta} = \frac{\sin^4\theta}{E_x} + \left(\frac{1}{G} - \frac{2\nu_{12}}{E_x} \right) \sin^2\theta\cos^2\theta + \frac{\cos^4\theta}{E_y} \quad (4.39)$$

$$\sigma_{\theta 5} = \frac{C-1}{2Cr_0} E_x u_0 \sin^2\theta \quad (4.40)$$

$$\sigma_{\theta 6} = \frac{E_\theta}{W E_x} \left\{ \frac{u_0}{C g} (C+1)(k - \nu_{12} + nk)\sin4\theta + \frac{u_0}{C g} \right. \\ \left. [(C-1)(k - \nu_{12} + nk) + 2(C+1)(k - \nu_{12})] \right. \\ \left. \sin2\theta - (\pi - 2\theta) \frac{P}{\pi} \right\} \cdot [-k\cos^2\theta + (1+n)\sin^2\theta] \quad (4.41)$$

$\sigma'_{\theta 1} \sim \sigma'_{\theta 5}$ 和 $\sigma'_{\theta 6}$ 的表达式与 $\sigma_{\theta 1} \sim \sigma_{\theta 5}$ 和 $\sigma_{\theta 6}$ 式相同, 但应以 P_1 代替 P (包括 u_0 中的 P), 而 $\sigma'_{\theta 6}$ 等于:

$$\sigma'_{\theta 6} = -\frac{(P-P_1)}{W} \cdot \frac{E_\theta}{E_x} [-k\cos^2\theta + (1+n)\sin^2\theta] \quad (4.42)$$

$$\sigma_{\theta 7} = \frac{P E_\theta}{W E_x} [-k\cos^2\theta + (1+n)\sin^2\theta] \quad (4.43)$$

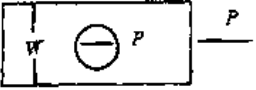
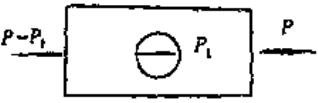
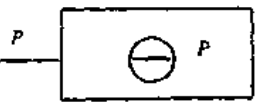
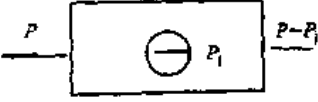
不同载荷类型的 σ_θ 的表达式在表 4.1 中给出。对于受拉无限大板或者有限宽板的挤压情况, σ_r 和 $\tau_{r\theta}$ 表达式不变。

由于本方法对板宽的修正是由无限大开孔板引伸得到的, 故只当 $W \geq 4D$ 时才有较好的精度。

表 4.1 不同受载情况孔边周向正应力表达式

序号	计 算 情 况	示 意 图	σ_θ	
			$-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$	$\pi/2 \leq \theta \leq 3\pi/2$
1	无限大板压缩挤压		$\sigma_{\theta 1} + \sigma_{\theta 2} + \sigma_{\theta 3} + \sigma_{\theta 4}$	≈ 0

续表 4.1

序号	计算情况		示意图	σ_θ	
				$-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$	$\pi/2 \leq \theta \leq 3\pi/2$
2	无限大板拉伸挤压			$\sigma_{\theta 1} + \sigma_{\theta 2} + \sigma_{\theta 3} + \sigma_{\theta 4} + \sigma_{\theta 5}$	$\sigma_{\theta 5}$
3	有限宽板压缩	全挤压		$\sigma_{\theta 1} + \sigma_{\theta 2} + \sigma_{\theta 3} + \sigma_{\theta 4} + \sigma_{\theta 5}$	≈ 0
4		部份挤压		$\sigma'_{\theta 1} + \sigma_{\theta 2} + \sigma_{\theta 3} + \sigma_{\theta 4} + \sigma_{\theta 5} + \sigma_{\theta 6}$	$\sigma_{\theta 6}$
5	有限宽板拉伸	全挤压		$\sigma_{\theta 1} + \sigma_{\theta 2} + \sigma_{\theta 3} + \sigma_{\theta 4} + \sigma_{\theta 5} + \sigma_{\theta 6} + \sigma_{\theta 7}$	$\sigma_{\theta 7} + \sigma_{\theta 8}$
6		部份挤压		$\sigma_{\theta 1} + \sigma_{\theta 2} + \sigma_{\theta 3} + \sigma'_{\theta 4} + \sigma_{\theta 5} + \sigma_{\theta 6} + \sigma_{\theta 7}$	$\sigma_{\theta 7} + \sigma_{\theta 8}$

本方法能考虑钉孔之间摩擦力的影响。摩擦力改变了板的应力分布,因而也影响了连接强度。图 4.16 示出了摩擦力对孔边应力分布的影响。一般来说,对于常用连接的铺层范围,摩擦系数小于 0.20 时,摩擦力将对强度产生有利影响。试验证明,钢钉与树脂基复合材料孔之间的摩擦系数可取为 0.20。

载荷方向与 X 轴不一致时的应力表达式见文献[4—7]。

对于非孔边界上各点的应力,可把上面求得的 C 和 u_0 值代入(4.29)式,再把待求应力点的坐标代入,通过一系列复数运算,根据下面方程就可得到任意点应力的三个分量。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= 2\text{Re}[\mu_1^2 \Phi_1'(z_1) + \mu_2^2 \Phi_2'(z_2)] \\ \sigma_y &= 2\text{Re}[\Phi_1'(z_1) + \Phi_2'(z_2)] \\ \tau_{xy} &= -2\text{Re}[\mu_1 \Phi_1'(z_1) + \mu_2 \Phi_2'(z_2)] \end{aligned} \right\} \quad (4.44)$$

当求特征线上各点的应力时(参见图 4.10),由于特征线离孔边不远,可直接应用上述孔边各点的三个应力分量,按下式近似计算:

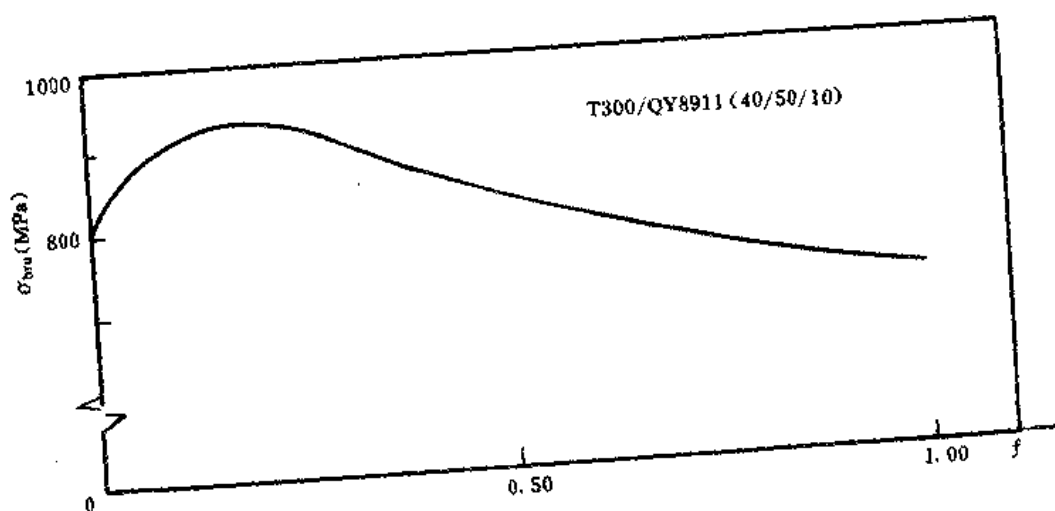


图 4.16 摩擦系数 f 对极限挤压强度的影响

$$\sigma_{rc} = \frac{r_0}{r_c} \sigma_r \quad (4.45)$$

$$\sigma_{\theta c} = \frac{r_0}{r_c} \sigma_\theta$$

$$\tau_{r\theta c} = \frac{r_0}{r_c} \tau_{r\theta}$$

这里,所有带下标 c 的参数均是对特征线而言的。

对于层压板结构,求出的应力实际上是沿板厚的平均值。可以由这一组值根据层压板的弹性模量求出层压板相应点的三个应变,然后由各层的模量就可求出各层相应点的应力。

4.2.1.3 解析法(二)^[4-9]

这一方法仍以复变应力函数为基础,求解几个典型的受载情况,然后叠加得到机械连接的应力分布。具体求解过程如图 4.17 所示。图左的问题为均质正交各向异性无限大板在均匀分布外载和孔边销钉力共同作用的情况,把它分成两个子问题,一个是带孔板在均匀外载作用下的问题,已有现成的解答^[4-8];第二个问题是只有销钉载荷作用的情况,此时,假设复变应力函数为:

$$\Phi_1(z_1) = A_1 \ln \xi_1 + \sum_{m=1}^{\infty} A_{1m} \xi_1^{-m} \quad (4.46)$$

$$\Phi_2(z_2) = A_2 \ln \xi_2 + \sum_{m=1}^{\infty} A_{2m} \xi_2^{-m}$$

式中 ξ_1 与 ξ_2 由(4.29)式决定。 A_1 、 A_2 、 A_{1m} 和 A_{2m} 均为复系数,其中 A_1 和 A_2 由孔边位移唯一性条件求得, A_{1m} 和 A_{2m} 由孔边径向力分布边界条件求出。假设销钉挤压力沿孔半周界上的分布(径向)为余弦函数形式,即:

$$P_R = -P \cos \theta \quad (4.47)$$

由此求出

$$\left. \begin{aligned} A_{12} &= r_0 P i (1 + i \mu_2) / [16(\mu_2 - \mu_1)] \\ A_{22} &= -r_0 P i (1 + i \mu_1) / [16(\mu_2 - \mu_1)] \end{aligned} \right\} \quad (4.48)$$

当 $m=4, 6, 8, \dots$, 时

$$A_{1m} = A_{2m} = 0 \quad (4.49)$$

当 $m=1, 3, 5, \dots$, 时

$$A_{1m} = -r_0 P i (-1)^{(m-1)/2} (2 + m i \mu_2) / [\pi m^2 (m^2 - 4) (\mu_2 - \mu_1)] \quad (4.50)$$

$$A_{2m} = r_0 P i (-1)^{(m-1)/2} (2 + m i \mu_1) / [\pi m^2 (m^2 - 4) (\mu_2 - \mu_1)]$$

应力与复变应力函数之间仍服从关系式(4.44)。

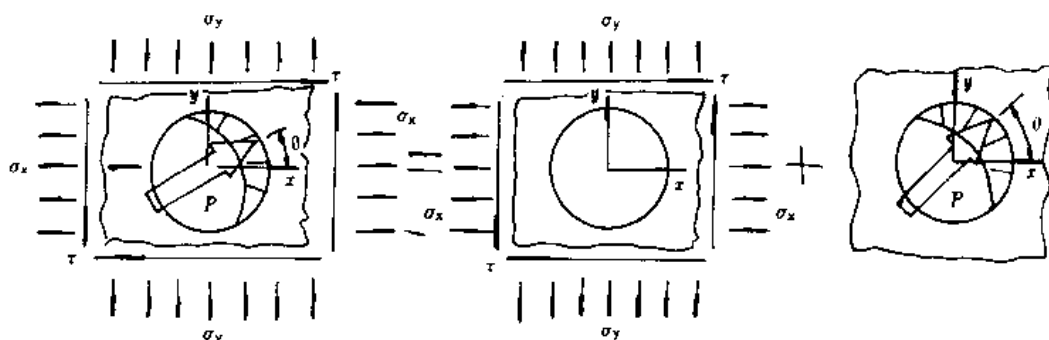


图 4.17 叠加模型

对于有限宽板情况,则按图 4.18 近似方法进行处理。实际上,这是在上述无限大板解的基础上叠加一个 $\sigma = P/2Wt$ 均匀拉伸无限大带孔板的应力。只当 $W/D \geq 4$ 才有较好的精度。

4.2.2 破坏载荷计算

(1) 失效准则

计算机械连接破坏载荷时需要先确定材料的失效准则,可供选用的一般有最大应力、最大应变、蔡-希尔、蔡-胡、霍夫曼等准则。对于机械连接比较常用的是 Yamada-Sun 失效准则,其表达式为:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{1i}}{X}\right)^2 + \left(\frac{\tau_i}{S_c}\right)^2} = L \quad \begin{aligned} L < 1 & \text{ 未失效} \\ L \geq 1 & \text{ 失效} \end{aligned} \quad (4.51)$$

式中 σ_{1i} 和 τ_i 分别为层压板中第 i 层沿纤维方向的正应力和面内剪切应力, X 为单向板纵向拉伸(或压缩)强度, S_c 为 $[0/90]_s$ 板的剪切强度,如果只给出了单向板的剪切强度 S ,则可令 $S_c = 2.50S$ 。

所以采用 Yamada-Sun 判据主要是因为它简单并抓住了主要矛盾,但由于它不考虑单向板横向(基体)破坏对总体强度的影响,使某些受横向失效控制的估算结果与试验结果有较大差别,也无法反映这些板的失效情况。在这种情况下,应该附加上最大应力准则或其它合适的准则补充判据。

(2) 特征线假设

估算机械连接破坏载荷同开孔情况一样,如果利用孔边应力按照某种失效准则确定强度,其值将过于保守。因此将开孔特征尺寸假设^[4-10]推广,提出了特征线假设:用离开孔边一定距

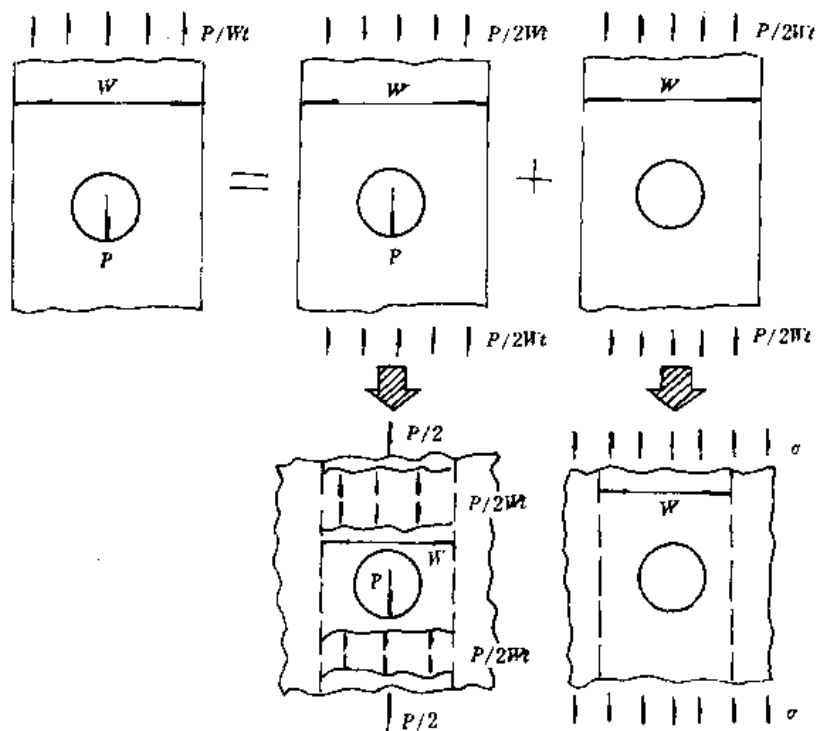


图 4.18 宽度修正模型

离以某种函数表达的曲线上的应力代入失效准则确定机械强度。

一般令特征曲线 r_c 有如下两种形式：

A 半圆形

$$r_c = r_0 + R_t \quad (4.52)$$

式中 r_0 为孔半径, R_t 为特征尺寸。

B 余弦曲线形

$$r_c = r_0 + R_t + (R_c - R_t) \cos \theta \quad (-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}) \quad (4.53)$$

式中 R_t 为拉伸特征尺寸, R_c 为压缩特征尺寸, 均由实验确定, 见图 4.19。

目前式(4.53)用得更为广泛些。

只要任何单向层中特征线上任何一点的应力满足所选失效准则表达式等于 1 的条件, 就认为发生总体失效, 相应载荷即为失效载荷。

应当注意到, 特征线假设必须与某个合适的失效准则一起使用才有意义。即使采用同样的特征线函数, 对于不同的失效准则和不同的应力计算方法, 相应的特征尺寸值是不同的。

用特征线法求破坏载荷的步骤：

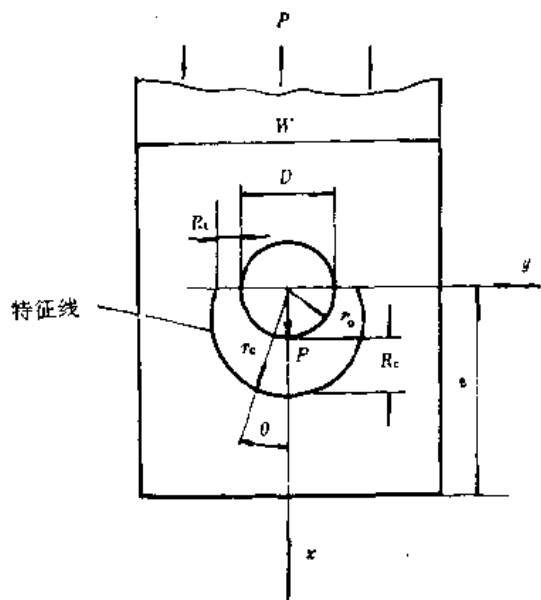


图 4.19 按余弦变化的特征线

先按某种理论分析方法求出钉孔在特征线上各点的应变;然后计算出各单向层各点的主向应力;最后把求出的主向应力代入到预先选好的失效准则(例如 Yamada-Sun 准则)。最先使任何单向层中特征线上任何一点的应力满足准则表达式等于 1 的载荷被确定为机械连接的破坏载荷。

(3) 特征尺寸的确定方法

特征线表达式中包含有一个或两个特征常数,它们是通过理论分析方法并与试验结果比较后得到的。式(4.52)的特征尺寸一般取开孔强度点应力准则的特征尺寸 d_0 ,见附录 C。式(4.53)含有特征尺寸 R_t 和 R_c 。

R_t 的确定方法如下:从开孔拉伸试件试验得到破坏载荷 P ,选择某种理论分析方法,求出在 P 作用下沿 $\theta=90^\circ$ 线各点的应力,代入相应的失效准则,找到恰能使准则表达式等于 1.0 的点,则该点到孔边的距离即为 R_t 。

R_c 值按以下步骤确定:从单钉连接试验得到破坏载荷 P ,利用已得到的 R_t 值,先假设一个 R_c 值,计算层压板中沿特征线 $-15^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$ 范围内各层各点的应力,代入相应失效准则,对不同的 R_c 重复上述计算,直找到某层某点的计算值恰能使判据式等于 1,由此对应的 R_c 值就认为是压缩特征尺寸。

表 4-2 给出了按解析法(一)和 Yamada-Sun 准则求出的复合材料推荐使用的 R_t 和 R_c 值。

表 4.2 推荐使用的 R_t 、 R_c 值

材 料	R_t mm	R_c mm
T300/4211	2.032	0.457
T300/QY8911	2.826	1.234
T300/5222	2.826	1.234

利用特征线上首先达到判据式等于 1 的点的坐标 θ_0 ,可以给出机械连接相应的破坏模式。假设:

$$\left. \begin{array}{ll} -15^\circ \leq \theta_0 \leq 15^\circ & \text{挤压破坏} \\ 30^\circ \leq \theta_0 \leq 60^\circ & \text{剪切破坏} \\ 75^\circ \leq \theta_0 \leq 90^\circ & \text{拉伸破坏} \end{array} \right\} \quad (4.54)$$

在上述范围之间的破坏则为组合型破坏。

在有限元法和解析法(二)计算中均假设挤压孔钉载分布为余弦形式。实际上,板的各向异性性能越大,采用余弦分布偏离实际情况就越严重。为了提高计算精度,可直接根据挤压孔边位移边界条件求出孔边径向挤压应力分布^[4-11]。

4.3 机械连接的经验方法^[4-12,13]

影响复合材料机械连接强度的因素很多,解析法和数值法要考虑所有这些因素几乎是不可能的。经验方法可以回避难以考虑的不少因素,方法简单,且便于工程应用。这种方法的分析基础是与所研究的复合材料有同样几何形状的各向同性材料的弹性应力集中系数,再根据

复合材料试件的实验结果对上述应力集中系数确定一个减缓因子 C , 以便考虑复合材料特有的各向异性、不均匀性、非线性和损伤等材料特性。

4.3.1 单排钉连接

4.3.1.1 各向同性材料弹性应力集中系数

a. 受载孔净面积拉伸应力集中系数 K_{te}^i

对于单钉双剪连接(图 4.20), 最大峰值应力发生在垂直于载荷方向的孔径附近, 由净面积拉伸应力集中系数的定义可得:

$$K_{te}^i = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{net}}} = \frac{\sigma_{\max}}{P/(W-D)t} \quad (4.55)$$

式中 P —— 载荷(N);
 W —— 板宽(mm);
 D —— 孔径(mm);
 t —— 板厚(mm)。

理论研究和实验证明, 对于图 4.20 所示的有限宽板单钉连接情况, 可以采用如下的经验公式:

$$K_{te}^i = 2 + \left(\frac{W}{D} - 1\right) - 1.5 \frac{W/D - 1}{W/D + 1} \theta \quad (4.56)$$

式中

$$\theta = \begin{cases} 1.5 - 0.5/(e/W), & \text{当 } (e/W) \leq 1 \\ 1, & \text{当 } (e/W) \geq 1 \end{cases} \quad (4.57)$$

b. 受载孔挤压应力集中系数 K_{be}

挤压应力集中系数 K_{be} 定义为:

$$K_{be} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{br}} = \frac{\sigma_{\max}}{P/Dt} \quad (4.58)$$

挤压应力集中系数 K_{be} 与拉伸应力集中系数 K_{te}^i 有如下关系,

$$K_{be} = K_{te}^i / (W/D - 1) \quad (4.59)$$

将式(4.56)代入上式得:

$$K_{be} = 1 + \frac{2}{(W/D - 1)} - \frac{1.5\theta}{(W/D + 1)} \quad (4.60)$$

式中 θ 等参数定义同前。

表 4.3 列出了各向同性材料螺接连接一些典型情况的 K_{be} 值, 前述方程就是情况[1]。表中的示意图还标明了最大周向应力的位置。

c. 开孔拉伸应力集中系数

开孔净面积拉伸应力集中系数 K_{te} 定义为:

$$K_{te} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{net}}} \quad (4.61)$$

对于有限宽板中心圆孔情况,

$$K_{te} = \frac{\sigma_{\max}}{P/(W-D)t} = 2 + \left(1 - \frac{D}{W}\right)^3 \quad (4.62)$$

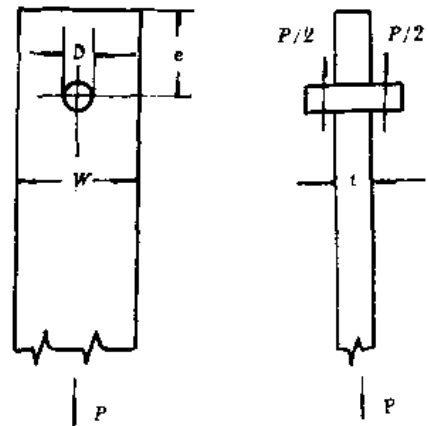
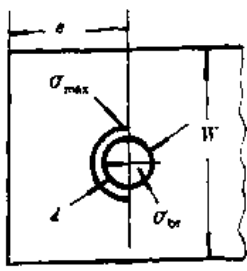
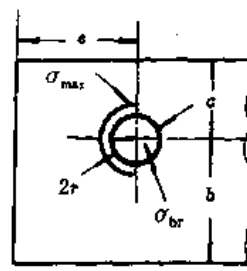
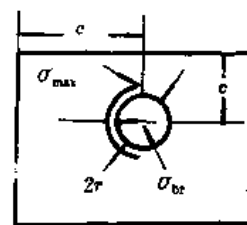
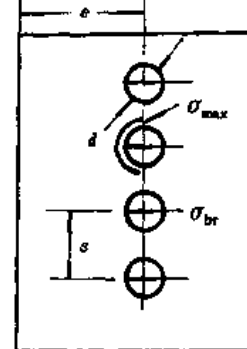


图 4.20 单钉双剪连接

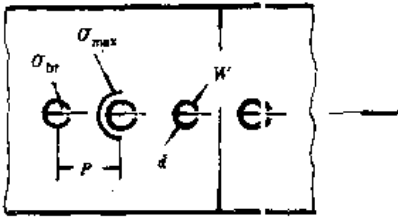
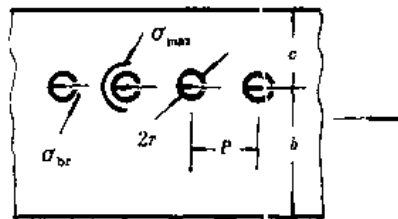
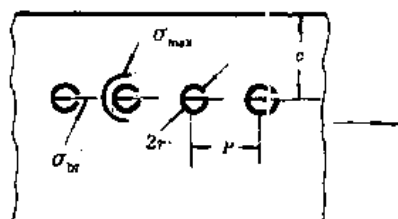
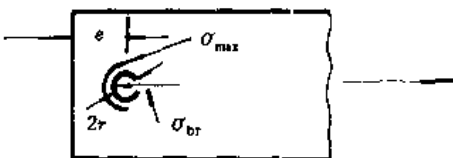
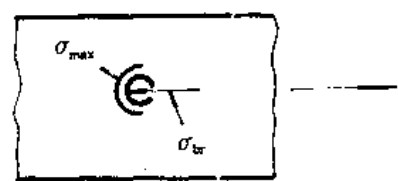
表 4.4 给出了一些典型开孔情况相应于净面积的拉伸弹性应力集中系数 K_{te} 。计算多钉连接强度时,要考虑旁路载荷对机械连接破坏的贡献,需要用到开孔应力集中系数。

表 4.3 各向同性材料受载孔挤压弹性应力集中系数

$$K_{be} = \sigma_{\max} / \sigma_{br}$$

1	有限宽板中心钉孔	 $K_{be} = 1 + \frac{2}{\left(\frac{W}{D} - 1\right)} - \frac{1.5\theta}{\left(\frac{W}{D} + 1\right)}$ (注: $\sigma_{\max}$ 发生在 $>180^\circ$) $\theta = 1.5 - \frac{0.5}{(e/W)}$ 如果 $(e/W) \leq 1.0$, $\theta = 1.0$ 如果 $(e/W) > 1.0$
2	有限宽板偏心钉孔	 $K_{be} = 1 + \left[\frac{2}{\left(\frac{c}{r} - 1\right)} - \frac{1.5\theta}{\left(\frac{c}{r} + 1\right)} \right] \left\{ 1 - \frac{7}{6} \left(\frac{b-c}{b+c} \right)^{2.5} + \frac{5}{6} \left(\frac{b-c}{b+c} \right)^{3.5} \right\}$ $\theta = 1.5 - 0.5/(e/2c)$ 如果 $\frac{e}{2c} \leq 1.0$ 否则 $\theta = 1.0$
3	半无限大板偏心钉孔	 $K_{be} = 1 + \frac{2}{3} \left[\frac{2}{\frac{c}{r} - 1} - \frac{1.5\theta}{\frac{c}{r} + 1} \right]$ θ 同 [2]
4	半有限大板一排钉孔	 $K_{be} = 1 + \frac{1 + \left[1 - \left(\frac{D}{S} \right)^2 \right]^{2.41}}{\left(\frac{S}{D} - 1 \right)} - \frac{1.5\theta}{\left(\frac{S}{D} + 1 \right)}$ $\theta = 1.5 - 0.5 \left(\frac{e}{S} \right)$ 如果 $\left(\frac{e}{S} \right) \leq 1.0$ 否则: $\theta = 1.0$ (注: $\sigma_{\max}$ 发生在 $>180^\circ$)

续表 4.3

5	有限宽板 一列中心钉孔	$K_{be} = \text{同 [1]}$ (注: σ_{max} 发生在 $>180^\circ$)
		
6	有限宽板 一列偏心钉孔	$K_{be} = \text{同 [2]}$
		
7	半无限大板 一列偏心钉孔	$K_{be} = \text{同 [3]}$
		
8	半无限大板端部钉孔	$K_{be} = 1 + 1.5 \frac{r}{e}$ (注: σ_{max} 发生在 $>180^\circ$)
		
9	无限大板单钉孔	$K_{be} = 1$ (注: σ_{max} 发生在 $>180^\circ$)
		

当为压缩(图 A)或剪切(图 B)时, $K_{be} = 0$.



图 A

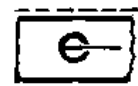
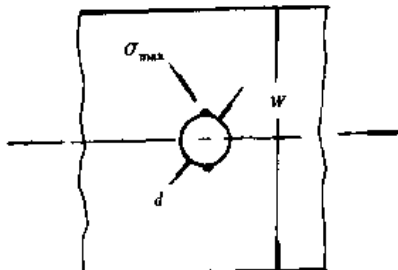
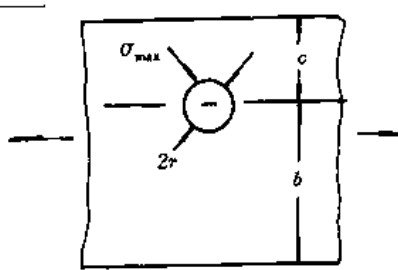
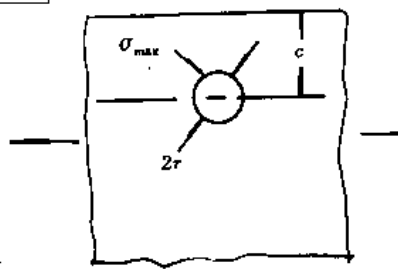
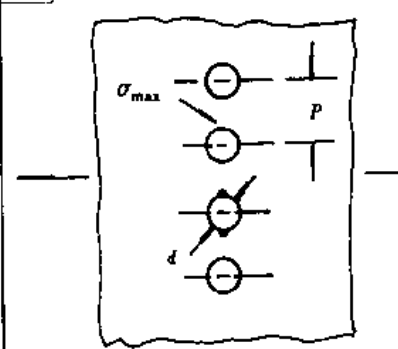


图 B

表 4.4 各向同性材料开孔拉伸应力集中系数

$$K_{te} = \sigma_{te} / \sigma_{ne}$$

1	有限宽板中心孔		$K_{te} = 2 + \left(1 - \frac{D}{W}\right)^4$
2	有限宽板偏心孔		$K_{te} = \left[2 + \left(1 - \frac{r}{c}\right)^3\right] \left\{1 - \left(\frac{b-c}{b+c}\right)^2 \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r}{c}\right)^2}\right]\right\} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{r}{c}\right)^2}} \left[1 - \frac{c}{b} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r}{c}\right)^2}\right)\right]$
3	半无限大板偏心孔		$K_{te} = \left[2 + \left(1 - \frac{r}{c}\right)^3\right]$
4	半无限大板一排孔		$K_{te} = 1 + \left(1 - \frac{D}{S}\right)^3 + \left[1 - \left(\frac{D}{S}\right)^2\right]^{2.41}$

4.3.1.2 复合材料应力集中减缩系数

复合材料应力集中减缩系数与各向同性材料的弹性应力集中系数的定义不同,它不是由

应力集中部位的最大应力除以截面的平均应力得到的,而是由光滑层压板的极限强度除以开孔或机械连接试件在破坏时的应力所定义的。

a. 复合材料受载孔拉伸应力集中减缩系数 K_{tc}^I

复合材料受载孔破坏时相应于净面积的拉伸应力集中减缩系数 K_{tc}^I 定义为:

$$K_{tc}^I = \frac{\sigma_b}{P_{ult}/(W-D)t} \quad (4.63)$$

根据经验可以合理地假设 K_{tc}^I 与 K_{bc}^I 之间有如下近似关系成立:

$$K_{tc}^I = 1 + C(K_{bc}^I - 1) \quad (4.64)$$

式中 C 称为复合材料应力集中减缓因子。 C 值与材料、铺层、紧固件尺寸和层压板厚度等因素有关。

b. 复合材料受载孔挤压应力集中减缩系数 K_{bc}

复合材料受载孔破坏时挤压应力集中减缩系数 K_{bc} 定义为:

$$K_{bc} = \frac{\sigma_b}{\sigma_{bru}} = \frac{\sigma_b}{P_{ult}/Dt} \quad (4.65)$$

K_{bc} 与 K_{tc}^I 有如下关系:

$$K_{bc} = K_{tc}^I / (W/D - 1) \quad (4.66)$$

将式(4.64)和式(4.59)代入上式得:

$$K_{bc} = \frac{1 + C[K_{bc}(W/D - 1) - 1]}{W/D - 1} \quad (4.67)$$

上式中如果令 $K_w = (W/D - 1)$, 在表 4.3 的另外一些情况下将为 $S/D - 1$ 或 $C/r - 1$ 。

c. 复合材料开孔拉伸应力集中减缩系数 K_{tc}

复合材料开孔破坏时相应于净面积的拉伸应力集中减缩系数 K_{tc} 定义为:

$$K_{tc} = \frac{\sigma_b}{\sigma_{net}} = \frac{\sigma_b}{P_{ult}/(W-D)t} \quad (4.68)$$

与机械连接情况一样,假设 K_{tc} 与 K_{tc}^I 有下述线性关系:

$$K_{tc} = 1 + C(K_{tc}^I - 1) \quad (4.69)$$

且 C 值与机械连接情况的相同。

4.3.1.3 应力集中减缓因子 C

应力集中减缓因子 C 值是应用经验方法的关键。由于各向同性材料开孔和受载孔的应力集中系数是已知的,只要 C 值确定了,通过线性关系就可以求得复合材料应力集中减缩系数,从而可以估算连接强度。确定机械连接应力集中减缓因子 C 值的方法如下:

a. 由复合材料机械连接的破坏载荷 P_{ult} ,按式(4.63)计算复合材料机械连接拉伸应力集中减缩系数 K_{tc}^I ;

b. 按式(4.56)计算各向同性材料相同几何尺寸的拉伸弹性应力集中系数 K_{tc}^I ;

c. 对 K_{tc}^I 和 K_{tc}^I 进行通过点(1,1)的最小二乘法线性拟合,斜率即为 C 值。纵座标为 K_{tc}^I ,横座标为 K_{tc}^I 。

图 4.21 和图 4.22 分别给出碳纤维 T300/QY8911 和 T300/4211 复合材料各三种铺层的 K_{tc}^I 与 K_{tc}^I 的线性拟合情况。 C 值一般在 0~1 之间,如果层压板的 0° 层比例太大, $\pm 45^\circ$ 层比例太少, C 值将大于 1,失去了应力集中减缓因子的意义,如 A2 和 B2 层压板,但仍可用来预示单钉

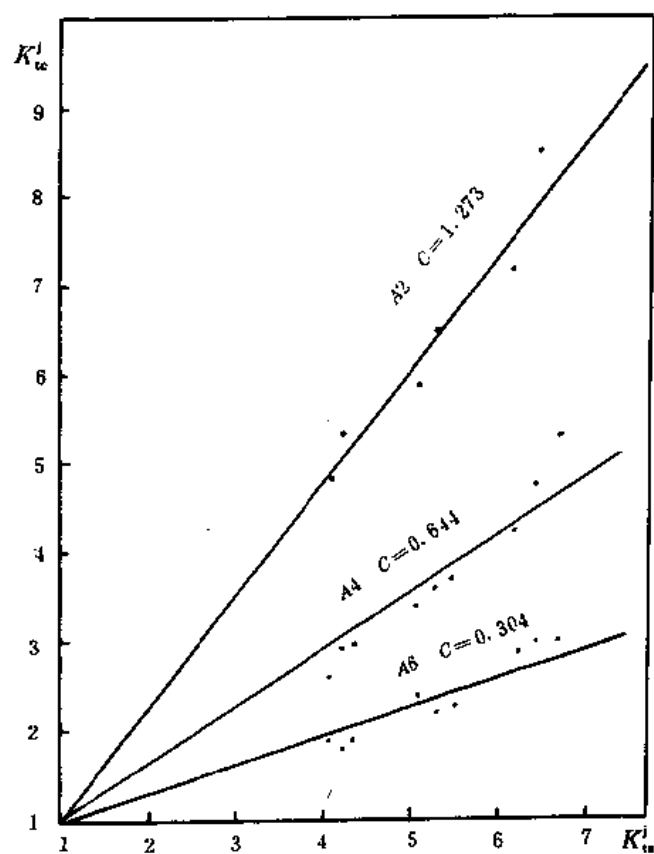


图 4.21 T300/QY8911 层压板 K_{II}^I 与各向同性材料 K_{II}^I 的关系

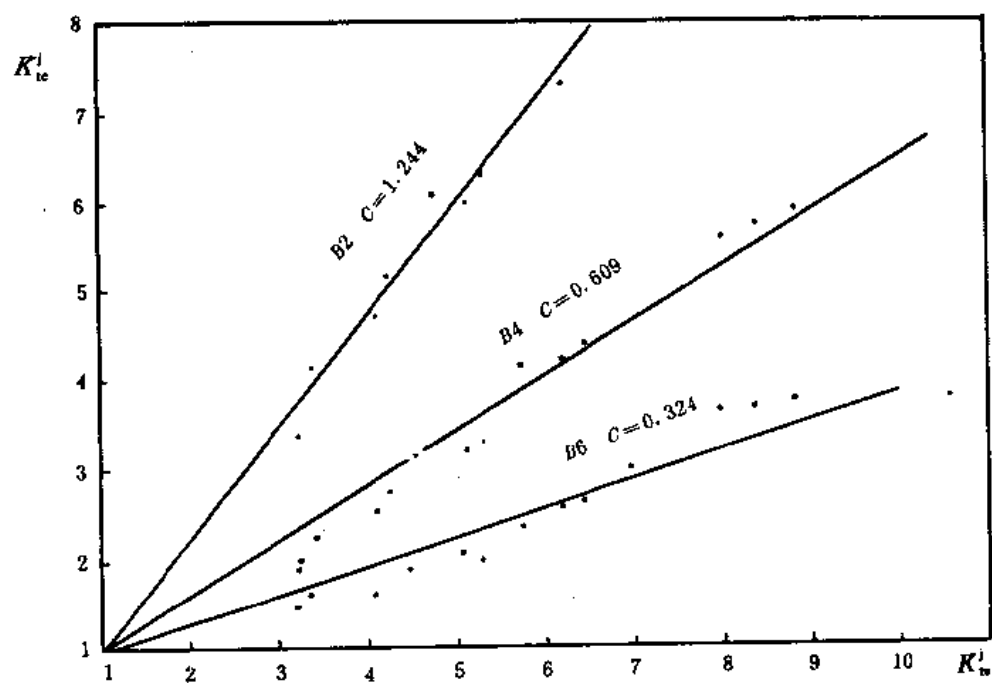


图 4.22 T300/4211 层压板 K_{II}^I 与各向同性材料 K_{II}^I 的关系

连接强度。

图 4.23 给出了根据单钉连接大量常温试验结果得到的 C 值随铺层变化的曲线。曲线主要根据 T300/QY8911 的试验数据,同时也参照了 T300/5222 和 T300/4211 的试验结果,图中标注了机械连接的试验参数。 C 值可用来估算碳纤维树脂基复合材料相同情况下的机械连接强度,至于尺寸效应、单剪和环境等因素的影响应另外考虑。

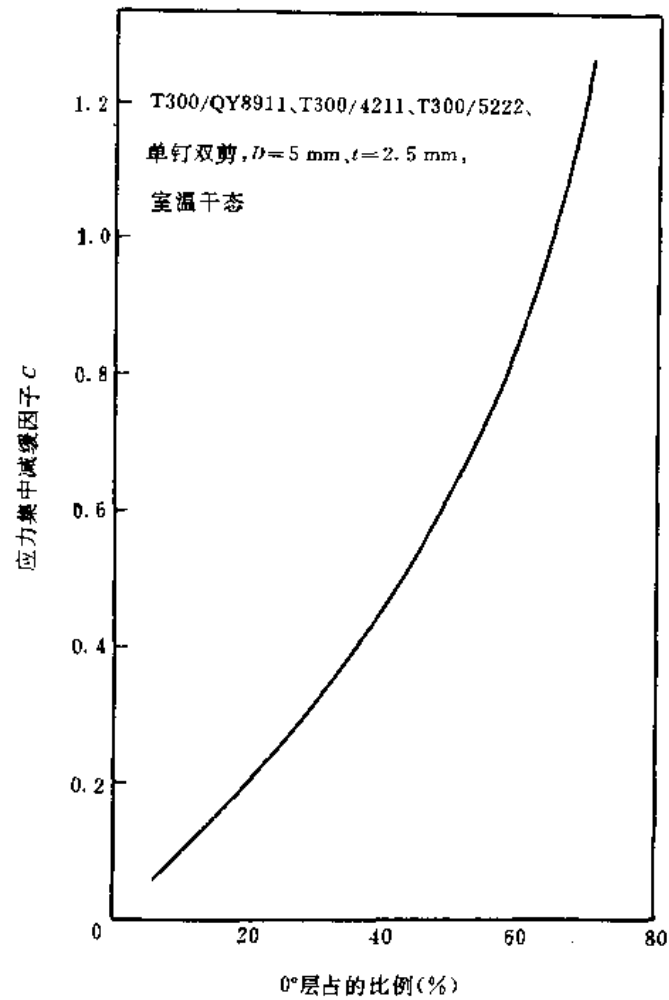


图 4.23 应力集中减缓因子 C 随铺层比例的变化

开孔试件 C 值的确定方法与机械连接的类似。在推荐的连接区铺层比例范围内,开孔试件的 C 值比较接近,可取 $C \approx 0.30$ 。

应当指出,假设开孔与机械连接有一样的 C 值并不符合所有情况。实际上,实验结果表明只在准各向同性铺层附近二者符合较好,随着 0° 层比例的增加,开孔 C 值减小,受载孔 C 值增大,二者差别逐渐扩大。这是由于开孔和受载孔的破坏机理不同所决定的。对于初步设计,在推荐的连接区铺层范围内,可以认为受载孔和开孔有一样的 C 值。

4.3.1.4 单钉连接强度计算例子

根据下列参数估算单钉连接强度。

材料: T300/QY8911;

层压板: (50%0°, 40%±45°, 10%90°), 20 层, 单层厚度 0.120;

材料性质: $\sigma_b = 850\text{MPa}$,

$C = 0.630$, 取自图 4.23;

几何尺寸: $W = 30\text{mm}$, $e = 20\text{mm}$, $D = 5\text{mm}$ 。

估算步骤为:

a. 由连接区的几何参数按式(4.60)计算或由表 4.3 得到各向同性材料的挤压应力集中系数 K_{ic} :

$$K_{ic} = 1 + \frac{2}{6-1} - \frac{(1.5)[1.5 - (0.5)(30)/(20)]}{6+1} = 1.239$$

b. 按式(4.67)计算复合材料挤压应力集中减缩系数 K_{bc} :

$$K_{bc} = \frac{1 + (0.630)[(1.239)(6-1) - 1]}{6-1} = 0.8546$$

c. 按照式(4.65)计算复合材料机械连接的破坏载荷 P_{ult} :

$$P_{ult} = (5)(2.4)(850)/0.8546 = 11.94\text{kN}$$

实际破坏载荷 11.88kN, 符合得相当好。

4.3.2 多排钉连接

对于多钉连接情况, 只考虑钉载引起的挤压破坏是不够的, 必须考虑挤压载荷和旁路载荷的共同作用。对于拉伸和压缩载荷情况, 本节给出便于工程应用的近似计算方法。

4.3.2.1 拉伸载荷情况

受拉伸载荷时挤压应力和旁路应力相互干涉作用下的破坏包线如图 4.24(a)所示。

斜线段代表拉伸破坏, 其方程为:

$$K_{bc}\sigma_{br} + K_{ic}\sigma_{net} = \sigma_b \quad (4.70)$$

平直线段代表挤压破坏, 其方程为:

$$\sigma_{br} = \sigma_{bru} \quad (4.71)$$

式(4.70)可以改写为:

$$(\sigma_b - K_{ic}\sigma_{net})/K_{bc} = \sigma_{bru} \quad (4.72)$$

上式既适用于拉伸破坏又适用于挤压破坏。

4.3.2.2 压缩载荷情况

受压缩载荷时挤压应力和旁路应力相互干涉作用下的破坏包线如图 4.24(b)所示。

斜线段代表紧配合(填充)孔的挤压破坏, 其方程为:

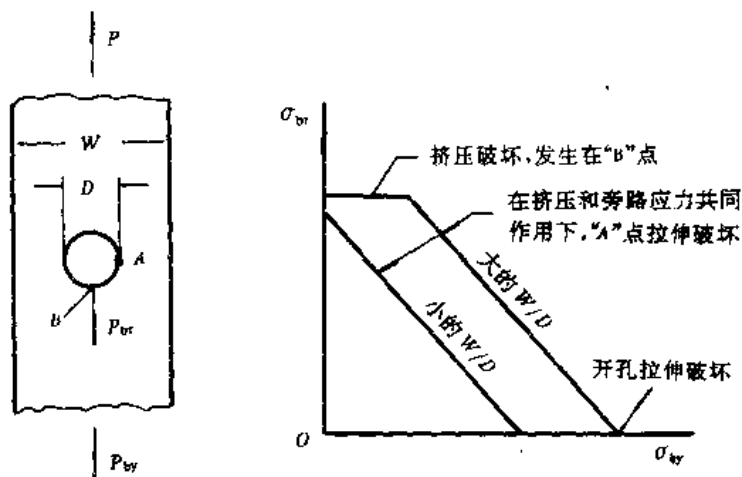
$$\sigma_{br} + \sigma_{net} = \sigma_{bru} \quad (4.73)$$

表示由挤压载荷产生的挤压应力 σ_{br} 迭加上由旁路载荷产生的净面积应力 σ_{net} 之和达到挤压强度时, 连接区就发生破坏。

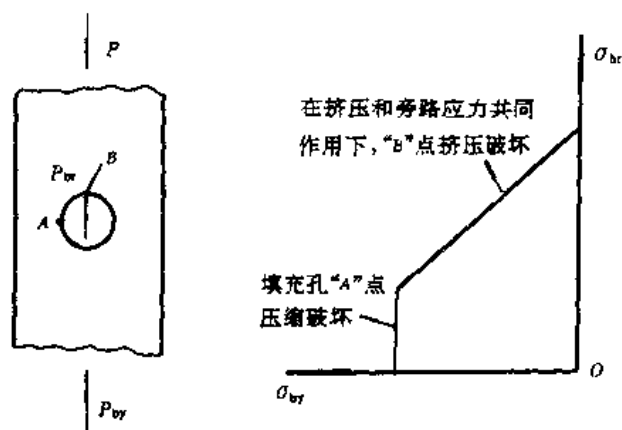
垂直线段代表紧配合(填充)孔的压缩破坏, 其方程为:

$$K_{ic}\sigma_{net} = \sigma_c \quad (4.74)$$

当缺乏受压填充孔的 K_{ic} 值时, 可取受拉开孔的 K_{ic} 值和 1 的平均值。



(a) 拉伸情况



(b) 压缩情况

图 4.24 挤压应力和旁路应力的相互干涉

4.3.2.3 多钉连接强度计算例子

根据下述已知参数计算图 4.25 所示机械连接强度。

材料: T300/4211;

层压板: (50%0°, 40%±45°, 10%90°),

20 层, 单层厚度 0.125mm;

材料性质:

$\sigma_{xt} = 766\text{MPa}$, $\sigma_{yt} = 587\text{MPa}$,

$\sigma_{bru} = 866\text{MPa}$, $C = 0.630$ (图 4.23);

载荷分配:

挤压载荷 $P_{br1} = 0.57P$, $P_{br2} = 0.43P$,

图 5.9(a);

旁路载荷 $P_{by1} = 0.43P$, $P_{by2} = 0$;

几何尺寸如图 4.25 所示。计算过程如下:

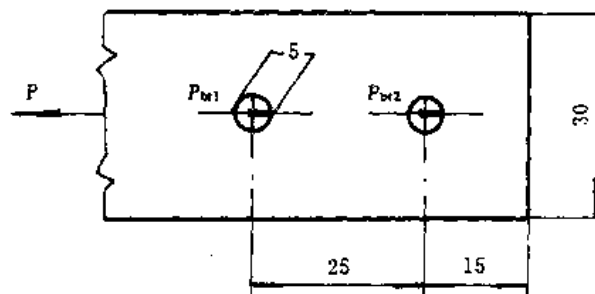


图 4.25 单列双钉连接

$$\text{由式(4.62)} \quad K_{te1}=K_{te2}=2.5787$$

$$\text{由式(4.60)} \quad K_{be1}=1.2071, K_{be2}=1.2929$$

$$\text{由式(4.69)} \quad K_{te1}=K_{te2}=1+(0.630)(2.5787-1)=1.9946$$

$$\text{由式(4.67)} \quad K_{be1}=\frac{1+(0.630)[(1.2071)(6-1)-1]}{6-1}=0.8345$$

$$K_{be2}=\frac{1+(0.630)[(1.2929)(6-1)-1]}{6-1}=0.8885$$

$$\text{螺栓 1} \quad \sigma_{net}=P_{by1}/A_{net}=0.43P/(30-5)(2.5)=0.00688P$$

$$\sigma_{br}=P_{br1}/Dt=0.57P/(5)(2.5)=0.0456P$$

$$\text{挤压破坏由式(4.71)} \quad 0.0456P=866$$

$$P=18.99(\text{kN})$$

$$\text{拉伸破坏由式(4.70)} \quad [(0.8345)(0.0456)+(1.9946)(0.00688)]P=766$$

$$P=14.79(\text{kN})$$

$$\text{螺栓 2} \quad \sigma_{net}=0$$

$$\sigma_{br}=P_{br2}/Dt=0.43P/(5)(2.5)=0.0344P$$

$$\text{挤压破坏} \quad 0.0344P=866$$

$$P=25.17(\text{kN})$$

$$\text{拉伸破坏} \quad (0.8885)(0.0344)P=766$$

$$P=25.06(\text{kN})$$

连接区的破坏载荷取最小值 14.79kN,发生在螺栓 1 截面处,破坏形式是拉伸。实际破坏载荷为 18.17kN,预示值偏小。对于所研究的层压板,实际开孔的 C 值比受载孔的 C 值要小,是其重要原因之一。

4.4 多钉规则排列连接工程计算方法

本节介绍一种多钉规则排列、等厚复合材料连接区的承载能力计算方法,侧重于计算复合材料板的拉伸承载能力。本方法解决的是一般工程问题,计算方法属经验公式,方法简单且与试验结果吻合较好,适合复合材料结构设计人员使用。

4.4.1 连接区承载能力计算方法

复合材料连接区的承载能力主要是指复合材料板的拉伸承载能力和挤压承载能力及螺栓的剪切承载能力。为使计算公式简单明了,本方法采用以下假设:

a. 均匀假设 假设连接区钉的材料、直径相同,在承受设计载荷时,各钉所受的载荷也相同。实际上钉载分布是不均匀的,其影响将在修正系数中考虑。

b. 工程几何参数假设 假设钉的端距、排距、列距等均符合 3.2.1 节的要求,分别不小于 3D、4D、5D。连接区一般均能满足此条件。

4.4.1.1 计算方法介绍

设复合材料连接区安装有 m 排 n 列钉承受集中力 P 。钉的直径为 D 、列距为 S 、单剪承载能力为 P_t 。复合材料板的厚度为 t ,沿 P 向的拉伸强度为 σ_b ,挤压强度许用值为 $[\sigma_{br}]$,应力集中减缓因子 C 见 4.3.1 节。结构如图 4.26 所示。计算方法如下:

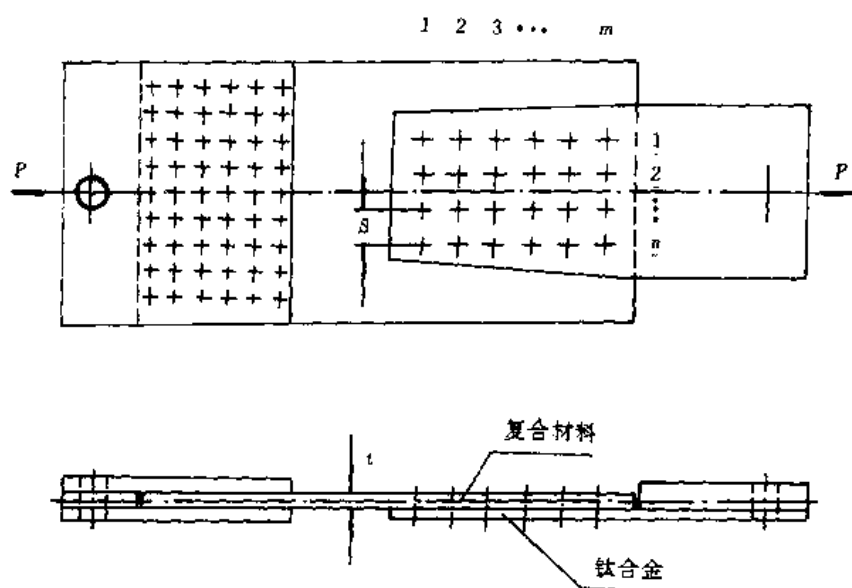


图 4.26 多列钉连接区结构简图

第一步,根据均匀性假设,每一列钉所承受的载荷相等,研究其中一列。

设钉的数量为无限多,因而钉孔的挤压应力 σ_{br} 趋于零,即 $\sigma_{br} \Rightarrow 0$ 。

计算 D/S ,由 $C/D/S, \sigma_{br}/\sigma_b = 0$ 查图 4.27 至图 4.30,得连接效率 λ_1 。

计算一列钉宽度复合材料板的承拉能力:

$$P_1 = \lambda_1 \sigma_b S t$$

第二步,根据均匀性假设,每列中的各个钉所承受的载荷相等,故每个钉的载荷为:

$$P_i = P_1 / m,$$

钉孔的挤压应力为

$$\sigma_{br} = P_i / (D t)$$

挤压应力 σ_{br} 与拉伸强度 σ_b 的比值为

$$\sigma_{br} / \sigma_b = P_i / (D t \sigma_b)$$

由 $C/D/S, \sigma_{br}/\sigma_b$ 查图 4.27 至图 4.30 得连接效率 λ_2 。

计算一列钉宽度复合材料板的承拉能力第二次近似值:

$$P_2 = \lambda_2 \sigma_b S t$$

以后各步重复第二步,直至 $\lambda_{i+1} \approx \lambda_i$ 。一般第二次近似值与第三次近似值已非常接近,可满足工程需要,不需作更多运算。

复合材料板的拉伸承载能力: $P_t = n P_{i+1}$

复合材料板的挤压承载能力: $P_{br} = mn D t \sigma_{br0} / K$

钉的剪切承载能力: $P_s = mn P_s / K$

式中 K 为钉载不均匀系数,由试验决定。对于连接元件刚度相近的情况,建议取 $1.1 \sim 1.3$ 。

连接区的承载能力取 P_t, P_{br}, P_s 中最小者,即 $P = \min \{P_t, P_{br}, P_s\}$

在进行方案论证时,由于诸多因素尚未确定,根据经验 P 取 $P_t = 0.5 \sigma_b S t$

4.4.1.2 应力集中减缓因子 C

应力集中减缓因子的定义见 4.3.1 节。对于碳纤维/双马(或环氧)树脂复合材料, C 值大体上与 0° 铺层的百分比相同。试验结果表明, 0° 层比例较大时, 用本节方法计算的结果偏保守; 在准各向同性铺层附近, 计算结果与试验值相差很小。

4.4.1.3 连接效率

连接效率定义为连接区能够承受的载荷与光滑层压板能够承受的载荷之比。连接效率综合反映了各种因素对复合材料层压板的影响, 其中包括净面积减少、孔的应力集中和钉载分布不均匀等因素。其值取决于复合材料板的材料特性(主要影响应力集中减缓因子 C 和 σ_b) 和钉直径与列距的比值 D/S 。同时也与钉的数量有一定关系(主要影响挤压应力 σ_{br} 的大小)。对应连接区常用铺层的 C 值, 连接效率 λ 与 D/S 的关系在图 4.27 至图 4.30 中给出。

4.4.2 实例

机械连接结构如图 4.26 所示。

复合材料板为 T300/QY8911 ($32\%0^\circ, 59\%\pm 45^\circ, 9\%90^\circ$) 总层数为 68 层。板长 680mm, 宽 350mm, 厚 8.5mm。纤维体积含量 60%, 拉伸强度 $\sigma_b = 540\text{MPa}$, 许用挤压强度值 $[\sigma_{br}] = 700\text{MPa}$ 。

与复合材料板相连接的另一构件材料为钛合金, 板厚 5mm。

钉为 $\Phi 8$ 钛合金高锁螺栓, 100° 沉头, 单剪承载能力 $P_t = 25.24\text{kN}$ 。

螺栓共 10 排 5 列, 列距 40mm。

计算过程如下:

取 $C = 0.3$, $D/S = 8/40 = 0.2$ 。

第一步, 令 $\sigma_{br} = 0$, 则 $\sigma_{br}/\sigma_b = 0$ 。

由 $\sigma_{br}/\sigma_b = 0$, $D/S = 0.2$, $C = 0.3$, 查图 4.28 得 $\lambda_1 = 0.55$ 。于是

$$P_1 = \lambda_1 \sigma_b S t = 0.55 \times 540 \times 40 \times 8.5 = 100980 \text{ N}$$

第二步, $P_i = P_1/m = 100980/10 = 10098 \text{ N}$

$$\sigma_{br} = P_i/(D t) = 10098/(8 \times 8.5) = 148.5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{br}/\sigma_b = 148.5/540 = 0.275$$

由 $\sigma_{br}/\sigma_b = 0.275$, $D/S = 0.2$, $C = 0.3$, 查图 4.28 得 $\lambda_2 = 0.525$,

$$P_2 = \lambda_2 \sigma_b S t = 0.525 \times 540 \times 40 \times 8.5 = 96390 \text{ N}$$

第三步, $P_i = P_2/m = 96390/10 = 9639 \text{ N}$

$$\sigma_{br} = P_i/(D t) = 9639/(8 \times 8.5) = 141.75 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{br}/\sigma_b = 141.75/540 = 0.2625$$

由 $\sigma_{br}/\sigma_b = 0.2625$, $D/S = 0.2$, $C = 0.3$ 查图 4.28 得 $\lambda_3 = 0.522 \approx \lambda_2$

$$P_3 = \lambda_3 \sigma_b S t = 0.522 \times 540 \times 40 \times 8.5 = 95839 \text{ N}$$

复合材料板的拉伸承载能力为: $P_t = n \cdot P_{i+1} = 5 \times 95839 = 479195 \text{ N}$

复合材料板挤压承载能力:

$$P_{br} = m \cdot n [\sigma_{br}] D t / K = 10 \times 5 \times 700 \times 8 \times 8.5 / 1.3 = 1830769 \text{ N}$$

螺栓的剪切承载能力为: $P_t = mn P_t / K = 10 \times 5 \times 25242 / 1.3 = 970846 \text{ N}$

连接区的承载能力为: $P = P_t = 479 \text{ kN}$

试件在 I—I 剖面拉断,破坏载荷为 487kN,理论计算与试验值相差为:

$$\left| \frac{479-487}{487} \right| \cdot 100\% = 1.6\%$$

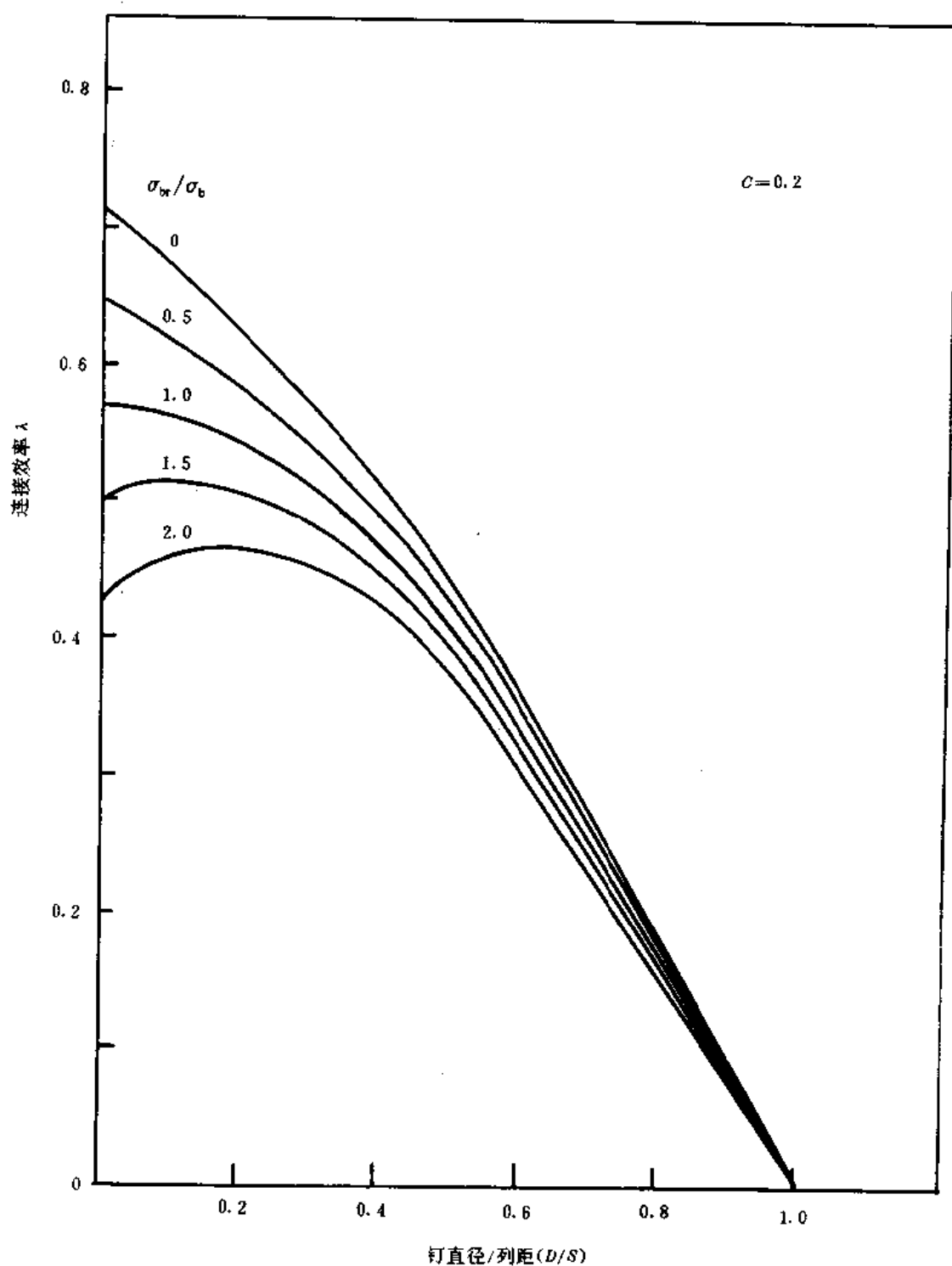


图 4.27 在拉伸载荷作用下的多列钉的连接设计曲线

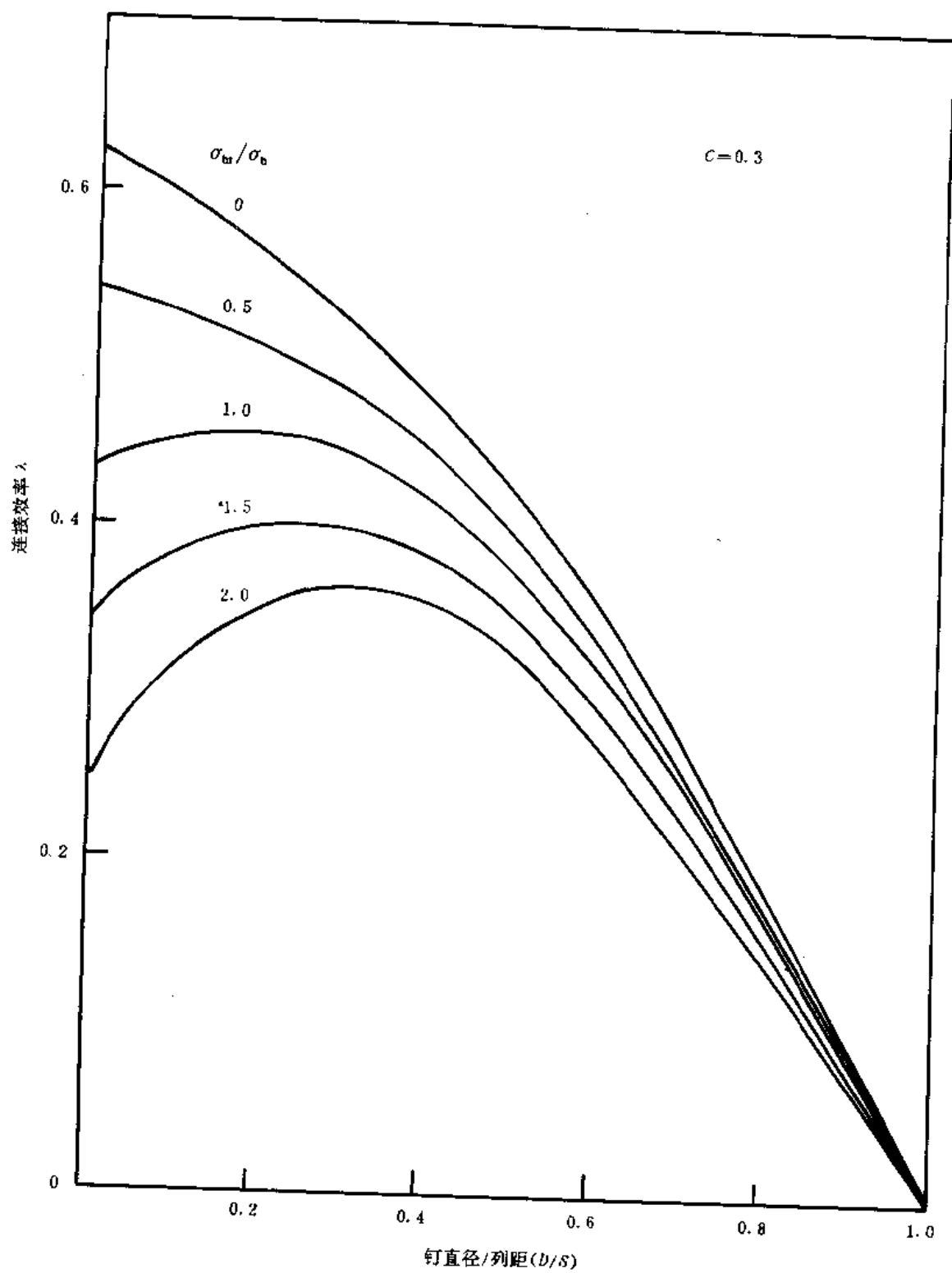


图 4.23 在拉伸载荷作用下的多列钉的连接设计曲线

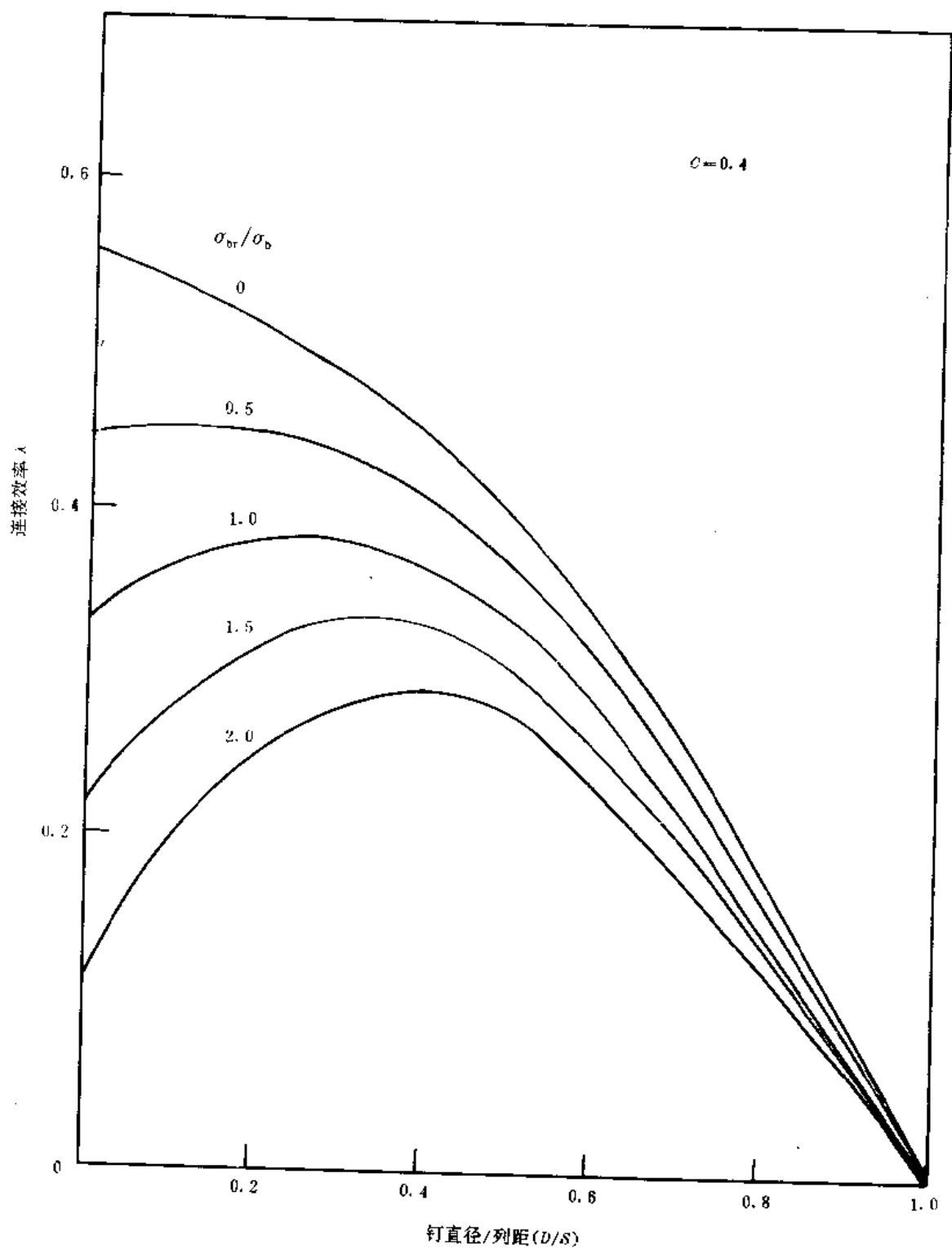


图 4.29 在拉伸载荷作用下的多列钉的连接设计曲线

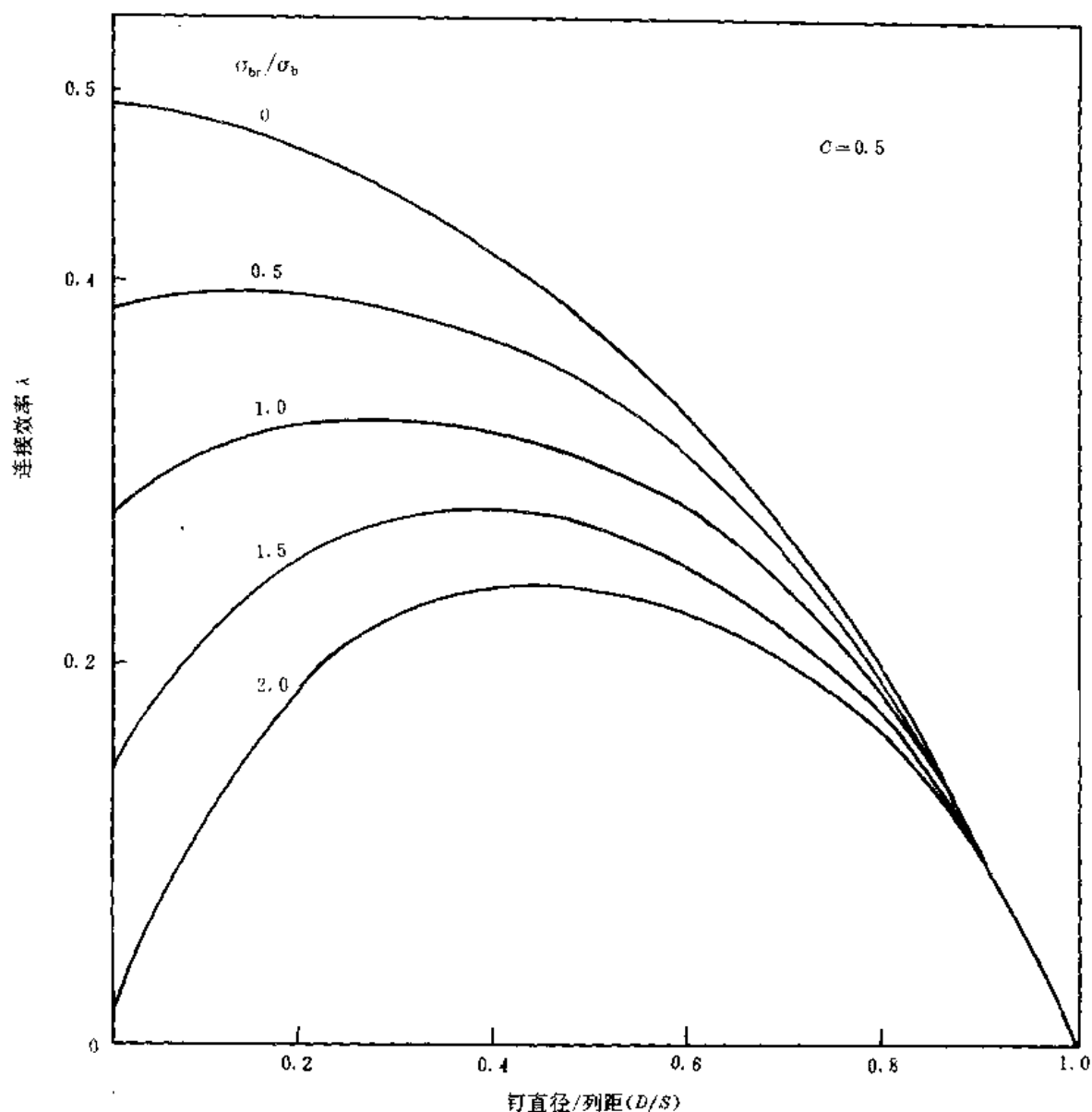


图 4.30 在拉伸载荷作用下的多列钉的连接设计曲线

4.4.3 连接区结构参数的选取

经理论计算和试验证明,连接区的承载能力主要取决于复合材料板的拉伸承载能力。从公式

$$P = n\lambda\sigma_b St$$

可以看出,为了提高连接区的承载能力应采取以下措施:

- a. 增加螺栓的列数 n 、列距 S 和板厚 t ;
- b. 适当增加复合材料层压板 0° 层的比例以提高 σ_b 。建议采用 (50% 0° 、40% $\pm 45^\circ$ 、10% 90°) 层压板。

需要指出以下两点:

a. 在排数达到一定值后,增加螺栓的排数对提高连接区的承载能力是很小的。例如,对于上述试件,假如其他参数不变,螺栓的数量从8排5列(40个)增加到10排5列(50个),承载能力仅增加1.9%。

b. 复合材料板的有效宽度为 $n \cdot S$,超过这一数值的板宽对承载能力几乎无贡献,也就是说不能用增加边距的方法提高连接区的承载能力。

参 考 文 献

- [4-1] Shanley F R. *Strength of Materials*. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, 1957
- [4-2] 许希武. 复合材料层板多钉机械连接分析方法研究. 南京航空航天大学宇航系资料, 1993. 4
- [4-3] 陈业标, 李武铨. 复合材料层板机械连接强度计算. 航空工业总公司 611 所资料, 1993. 5
- [4-4] MSC/NASTRAN HAND BOOK for Nonlinear Analysis, Version 67
- [4-5] Chang F. K., Scott R A., Springer G S. "Failure Strength of Nonlinearly Elastic Composite Laminates containing a pin Loaded Hole", J. C. M., 1984, Vol. 18, PP. 464—477
- [4-6] Chang F K, Chang K Y, "Post-Failure Analysis of Bolted Composite Joint in Tension or Shear-Out Mode Failure", J. C. M., 1987, Vol. 21, PP. 809—833, 1987
- [4-7] Zhang K D, Ueng C E S, "Stresses Around a Pin-loaded Hole in Orthotropic plates with Arbitrally Loading Direction", *Composite Structures*, 1985, Vol. 3, PP. 119~144
- [4-8] 列赫尼茨基 C T 著, 胡海昌译, 《各向异性板》, 科学出版社, 1963.
- [4-9] Garbo C P Ogonowski J M. "Effect of Variances and Manufacturing Tolerances On the Design Strength and Life of Mechanically Fastened Composite Joints". AFWAL-R-81-3041, V. 1-3, 1981. 4
- [4-10] Nuismer R J, Whitney, J M, "Uniaxial Failure of Composite Laminated Containing Stress Concentrations", ASTM STP 593, PP. 117—142, 1975
- [4-11] D Jong, 《Mechanics of Composite Materials: Recent Advances》, PP. 339~353, 1982
- [4-12] Hart-Smith L J, "Mechanically-Fastened Joints for Advanced Composites-Phenomenological Considerations and Simple Analyses", in: 《Fibrous Composites in Structural Design》, Plenum Press, New York, 1980
- [4-13] Hart-Smith L J, Joints, in *Engineered Materials Handbook Composites*. ASM International Handbook Comittee, 1987

第五章 螺栓连接强度

螺栓连接强度数据是进行螺栓连接设计和强度校核的基础。本章给出了全碳纤维 T300·QY8911、T300/5222 及 T300/4211 等复合材料层压板单钉连接强度和多钉连接载荷分配及强度,碳-芳纶(T300-Kevlar49/5222)混杂和碳-玻璃(T300-E 玻璃/5222)混杂复合材料层压板的单钉连接强度,单钉和多钉连接设计和强度校核方法及举例。除非特殊说明,所给数据均为室温、干态情况下的结果。

5.1 全碳纤维复合材料连接强度

5.1.1 单钉连接强度

本节数据不仅适用于单钉连接,同时也是多钉连接强度的基础。所给连接强度数据全部是受拉伸载荷的结果,用于压缩载荷时将偏于安全。

5.1.1.1 许用挤压强度值

为保证结构的完整性,许用挤压强度值一般不应大于初始挤压破坏强度,因此,许用挤压强度值的选取与挤压失效准则密切相关。失效的定义不同,确定的初始挤压破坏强度有很大差异。失效准则有两类:一类基于应力,保证连接有足够的强度;另一类基于受载孔的变形,保证连接有足够的刚度。目前采用较多的是基于受载孔变形的准则,不同国家、不同部门选取的孔失效变形从 0.5% 到 6%。

推荐按下列原则确定受载孔的初始挤压破坏强度:取载荷-位移曲线上第一个斜率突变点和孔径变形 4% 所对应的值中的较小者。经验表明,初始挤压破坏强度的最小值可取挤压强度 σ_{bru} 的一半。

初始挤压破坏强度与挤压强度 σ_{bru} 的比值大小与材料体系和铺叠方式有关。一般来说,该比值随 $\pm 45^\circ$ 层比例的增加而减小。对于连接区常用的层压板,比值一般在 0.55~0.66 之间。

许用挤压强度值的选取还应考虑连接的重要程度、结构特点、载荷种类、耐久性和使用环境等因素的影响。

在规定拧紧力矩下,许用挤压强度值可按下式确定:

$$[\sigma_{br}] = C_w C_e C_P C_d C_s C_{en} K \sigma_{bru} \quad (5.1)$$

式中 C_w ——挤压强度宽度修正系数;
 C_e ——挤压强度端距修正系数;
 C_P ——挤压强度载荷方向修正系数;
 C_d ——挤压强度孔径修正系数;
 C_s ——挤压强度单剪连接修正系数;

C_{en} ——挤压强度环境修正系数；

K ——考虑初始破坏、耐久性、老化和工艺质量等因素影响的系数，通常取 K 值在 0.50~0.66 之间；

σ_{brs} ——挤压强度(MPa)。

几种复合材料的挤压强度见 5.1.1.2 节，各种修正系数在 5.1.1.3 节中给出。

对于连接区常用的层压板(0°层=25~50%，±45°层≥40%，90°层=10~25%)，在 $W/D \geq 6$ 、 $e/D \geq 4$ 、 $D/t = 1.0 \sim 2.0$ 、 $D = 5$ mm、双剪连接、拧紧力矩 4 Nm、室温、干燥条件下、T300/QY8911 和 T300/5222 复合材料层压板的许用挤压强度值可取 550 MPa，T300/4211 的许用挤压强度值可取 480 MPa。

5.1.1.2 挤压强度

为充分发挥复合材料的承载能力，连接设计中几何参数的选择一般均要求产生挤压型破坏或与挤压相关的组合型破坏。因此，发生挤压型破坏的挤压强度是连接设计的基础。但是破坏模式不仅与几何参数有关，还与铺叠方式有关。在连接区要求的铺层范围内，取 $W/D = 6$ 和 $e/D = 4$ 就可以保证发生挤压型破坏。本节给出的各种层压板的挤压强度 σ_{brs} 均由(极限)破坏载荷 F_{ult} 除以挤压面积 Dt 得到。

图 5.1a 给出了 T300/QY8911 和 T300/5222 复合材料层压板的挤压强度 σ_{brs} 。图 5.1b 给出了 T300/4211 复合材料层压板的挤压强度 σ_{brs} 。试验参数如下：试件受双剪，试件孔径为 5 mm，板宽不小于 6 倍孔径，端距不小于 4 倍孔径，孔径-板厚比为 2，载荷方向与 0°纤维方向一致。夹具为钢制，其刚度约为试件刚度的 8 倍，采用 30CrMnSiA 钢制螺栓加载。孔与螺栓的配合精度为 H8/h8，螺栓拧紧力矩为 4 Nm。垫圈内径 5.5 mm，外径 10 mm。

5.1.1.3 挤压强度修正系数

当实际使用参数与得到图 5.1 所示挤压强度的参数不相同时，需对图中所给的挤压强度进行修正，才能应用。本节给出的挤压强度修正系数主要根据 T300/QY8911 层压板的试验结果，也参照了 T300/5222 和 T300/4211 的结果，适用于碳纤维树脂基复合材料层压板。本节所用的层压板代号见 1.3 节。

a. 挤压强度宽度修正系数 C_w

由于结构空间限制，当板宽(列距)-孔径比小于 6 时，应用图 5.1 时应进行适当的修正。图 5.2a 示出了几种代表性层压板的挤压强度宽度修正系数 C_w 。

b. 挤压强度端距修正系数 C_e

当端距-孔径比(e/D)小于 4 时，应用图 5.1 时，应进行适当的修正。图 5.2b 示出了几种代表性层压板的挤压强度端距修正系数 C_e 。

c. 挤压强度载荷方向修正系数 C_p

图 5.1 所示的挤压强度是当载荷方向与 0°纤维方向一致时得到的，当载荷方向与 0°纤维方向不一致时，应对挤压强度进行修正。图 5.2c 示出了两种层压板的挤压强度载荷方向修正系数 C_p ，基本上概括了推荐的连接区的铺层范围。一般来说，0°层愈多，挤压强度受载荷方向的影响愈大，即 C_p 降低得愈多；±45°层愈多，挤压强度受载荷方向的影响愈小，即 C_p 降低得愈少。

d. 挤压强度孔径修正系数 C_d

当机械连接几何尺寸(W/D 、 e/D 和 D/t 等)和受力形式等都一样时，孔径尺寸愈大，其强

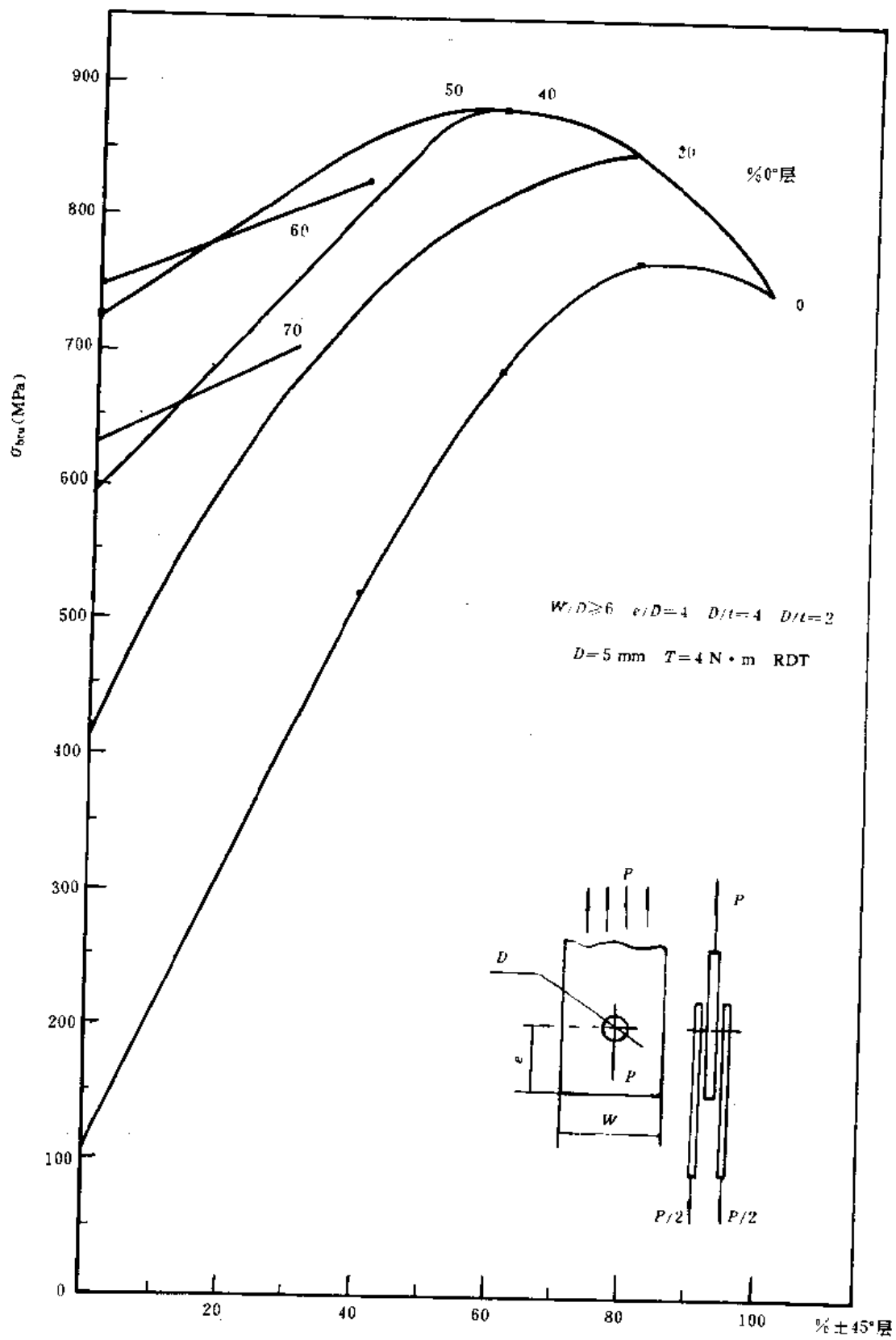


图 5.1a T300/QY8911 和 T300/5222 挤压强度

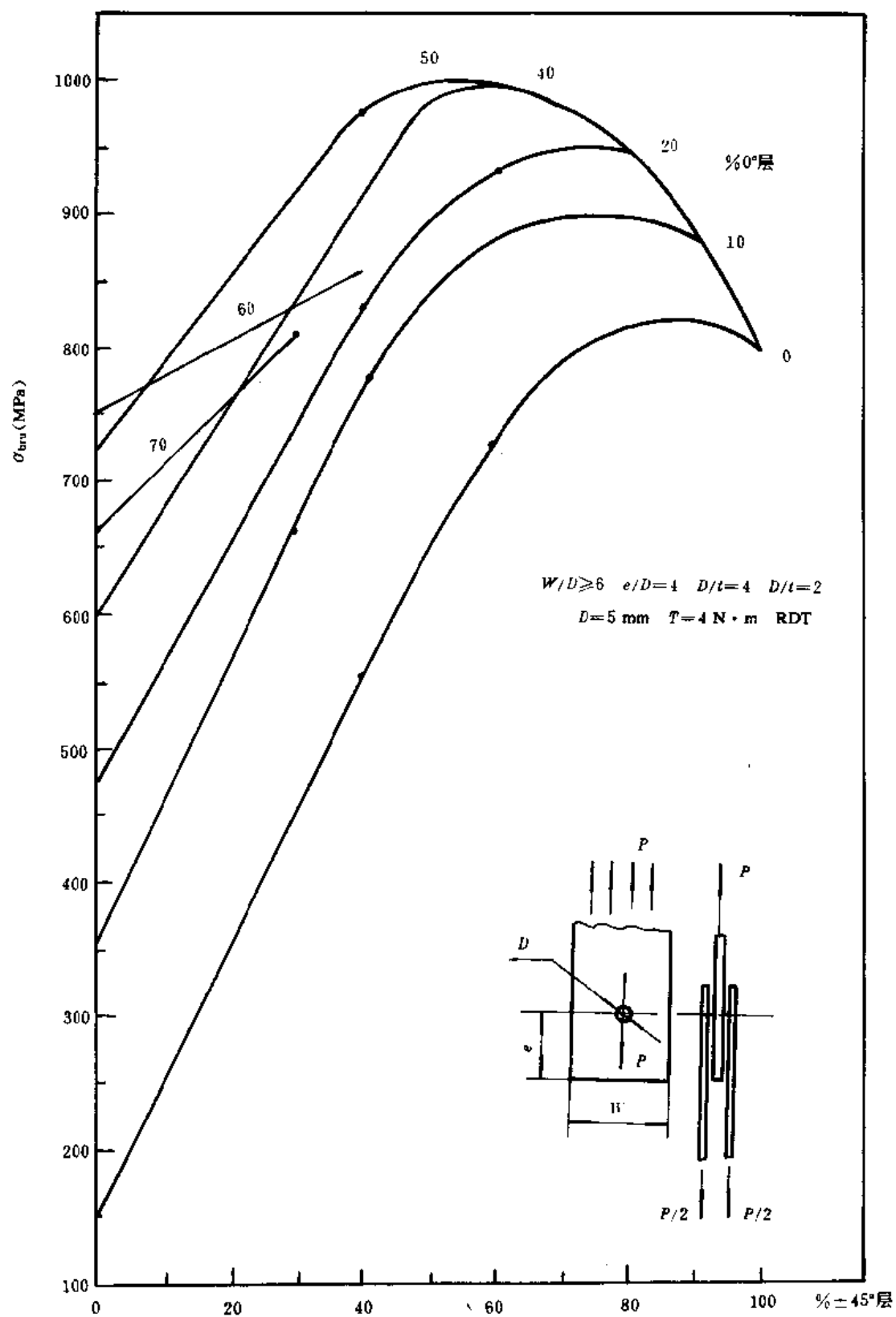


图 5.1b T300/4211 挤压强度

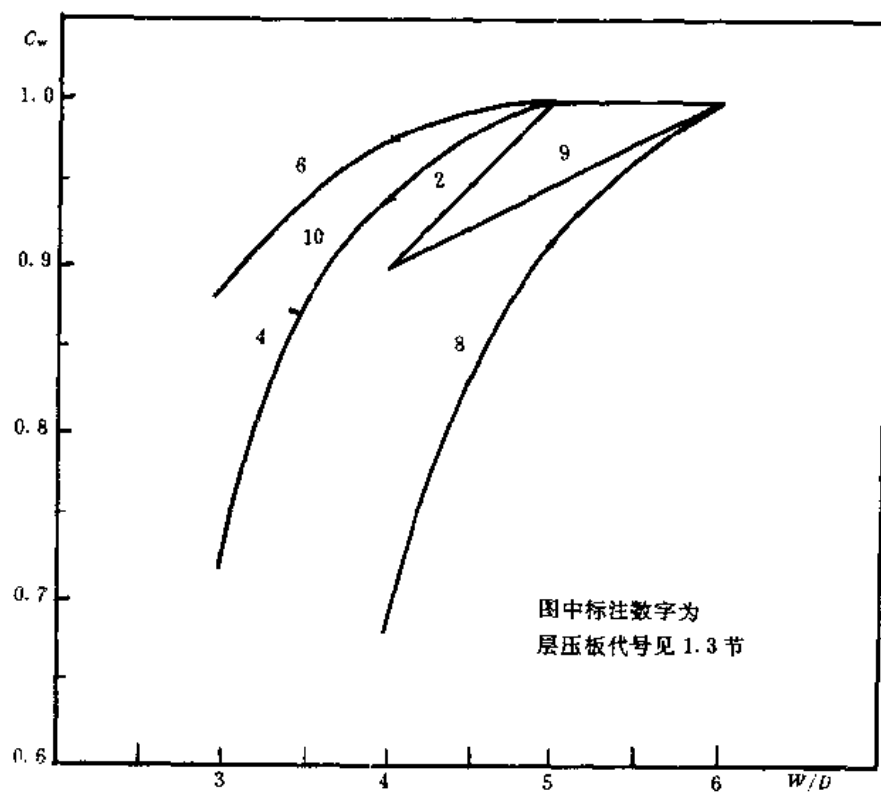


图 5.2a 挤压强度宽度修正系数 C_w

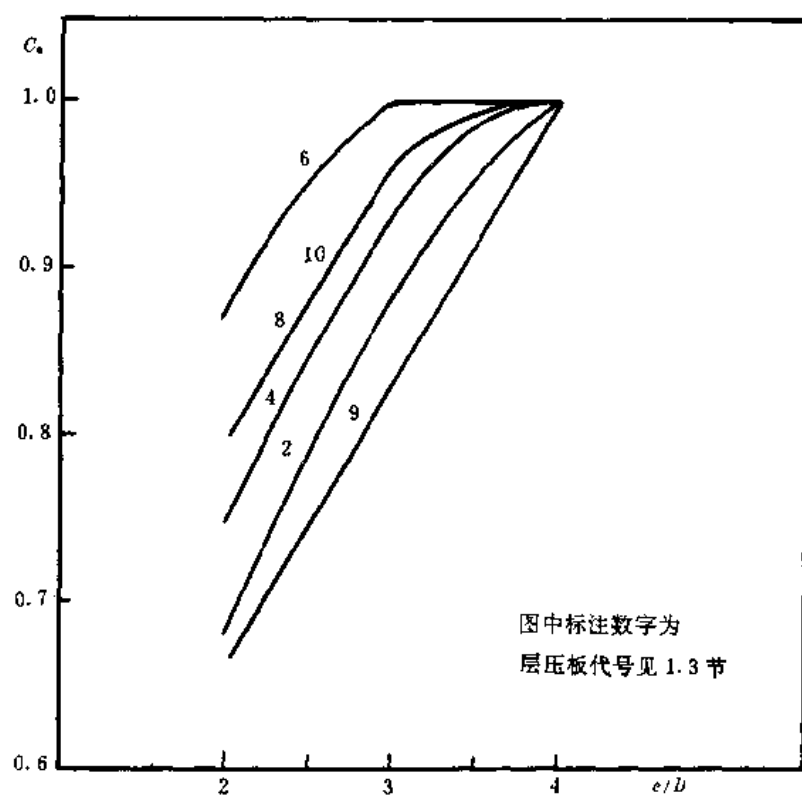


图 5.2b 挤压强度端距修正系数 C_e

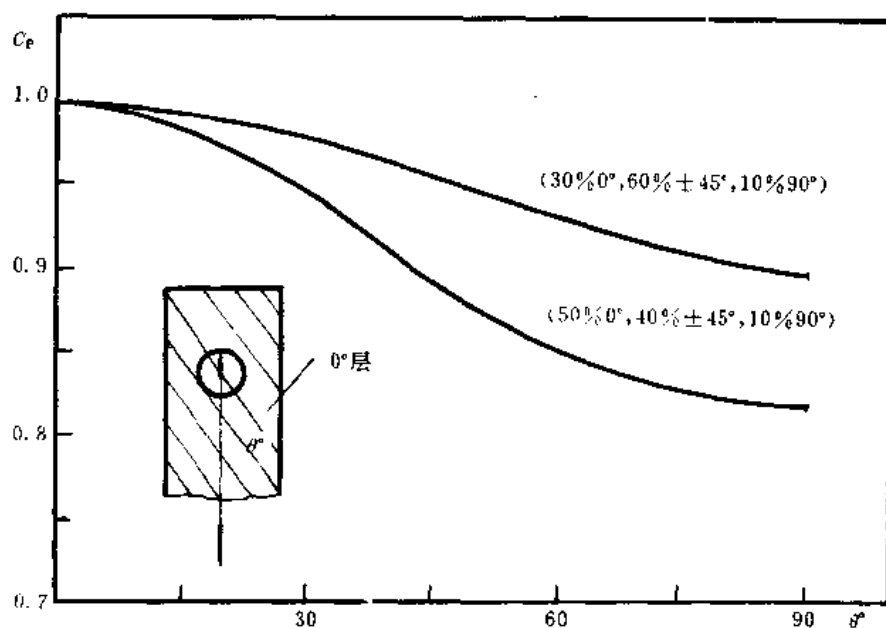


图 5.2c 挤压强度载荷方向修正系数 C_e

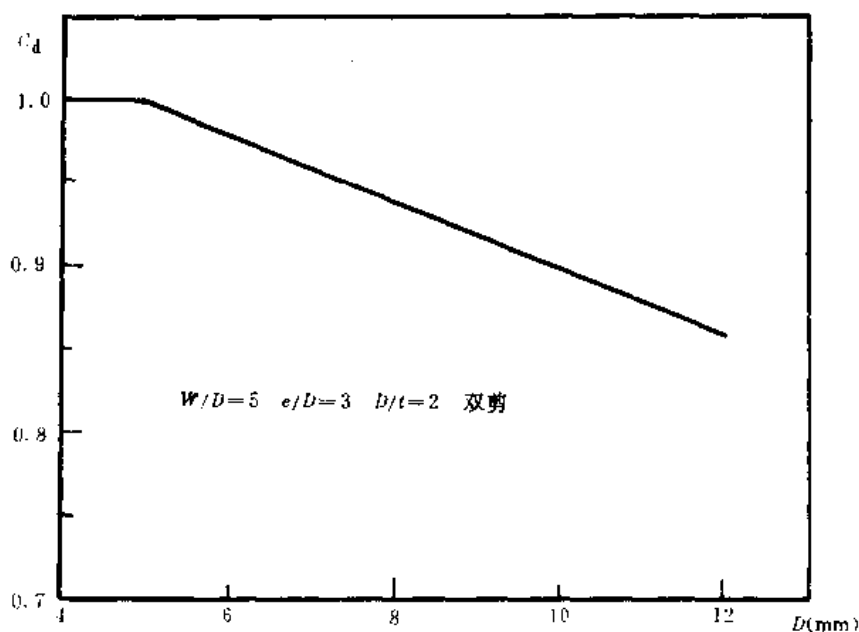


图 5.2d 挤压强度孔径修正系数 C_d

度就愈低。图 5.1 是依据孔径 5 mm 得到的, 当用于较大孔径时应采用图 5.2d 示出的孔径修正系数进行修正。

e. 挤压强度单剪修正系数 C_s

图 5.2e 给出挤压强度单剪连接修正系数 C_s 。应当指出, 飞机实际结构上的单剪连接。由于受周围构件的支持, 偏心引起的弯曲效应比支持不足的试验情况要小。因此, 实际结构应用此处的 C_s 将偏于保守。

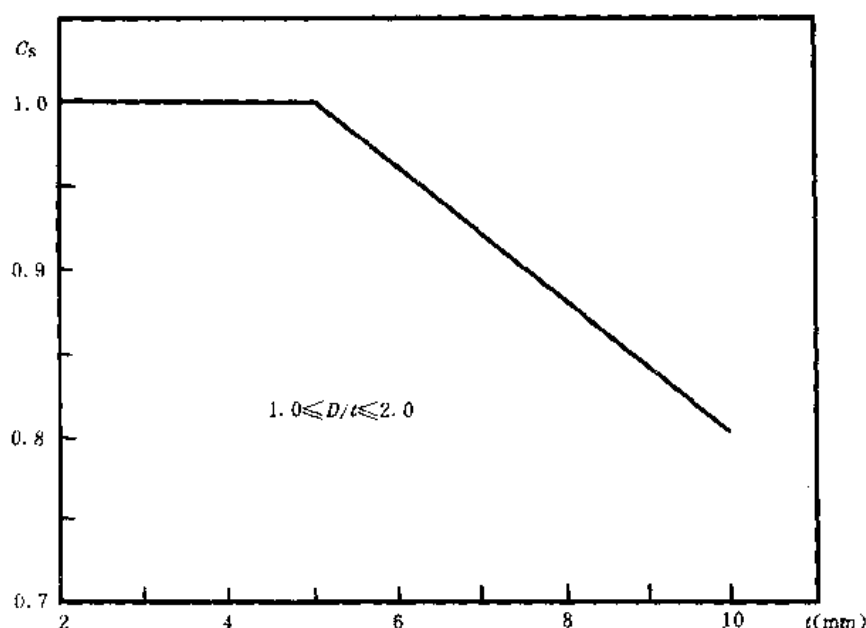


图 5.2e 挤压强度单剪修正系数 C_s

f. 挤压强度环境修正系数 C_m

环境对复合材料层压板的挤压强度有显著影响。在推荐的连接区铺层范围内, T300/QY8911 和 T300/4211 层压板挤压强度环境修正系数 C_m 在表 5.1 中给出。试验条件见 3.3.8 节。

表 5.1 挤压强度环境修正系数 C_m

材 料	环 境 条 件	C_m	材 料	环 境 条 件	C_m
T300/QY8911	100℃吸湿 1%	0.75	T300/4211	82℃吸湿 1%	0.83
	130℃吸湿 1%	0.67		100℃吸湿 1%	0.75

5.1.2 多排钉连接强度

复合材料多排钉连接强度特性与金属连接有很大不同。对于复合材料, 各排钉的承载比例是不均匀的。即使在极限载荷时, 无论钢钉或钛钉连接, 各排钉承载的不均匀性与初始载荷时相比并没有多大改善。各排钉的承载比例主要与被连接构件的相对刚度有关, 紧固件的材料也有一定影响。

5.1.2.1 受拉伸载荷均匀板厚多排螺栓连接载荷分配

两排钉、三排钉和四排钉单剪连接的钉载分配分别在图 5.3a、5.3b 和 5.3c 中给出。夹具试件刚度比为 8:1。用于刚度比小的情况时, 最严重一排钉的承载比例将有所降低。每条曲线均来自两组试验结果, 一组层压板为 B4、孔径 5 mm; 另一组层压板为 C4-2, 孔径为 12 mm。孔间距均不小于 4D。结果可用于双剪连接情况。

四排钉双剪连接的钉载分配在图 5.3d 中给出, 也来自两组试验结果。一组层压板为 T300/QY8911 (26%0°, 53%±45°, 21%90°), 孔径 6 mm, 钛钉连接; 另一组层压板为 C4-2, 孔径 12 mm。结果适用于钢钉或钛钉连接的碳纤维树脂基复合材料层压板。

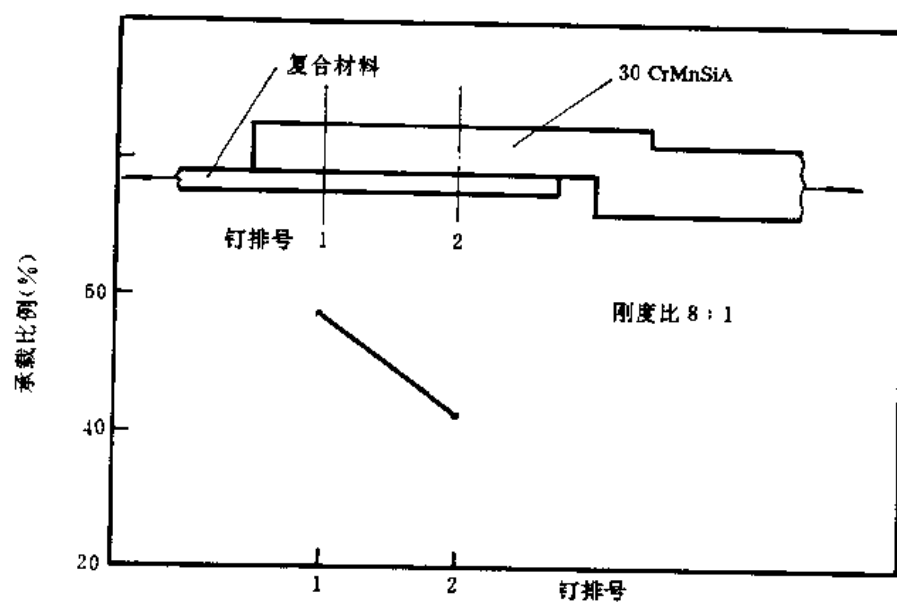


图 5.3a 两排钉单剪连接钉载分配

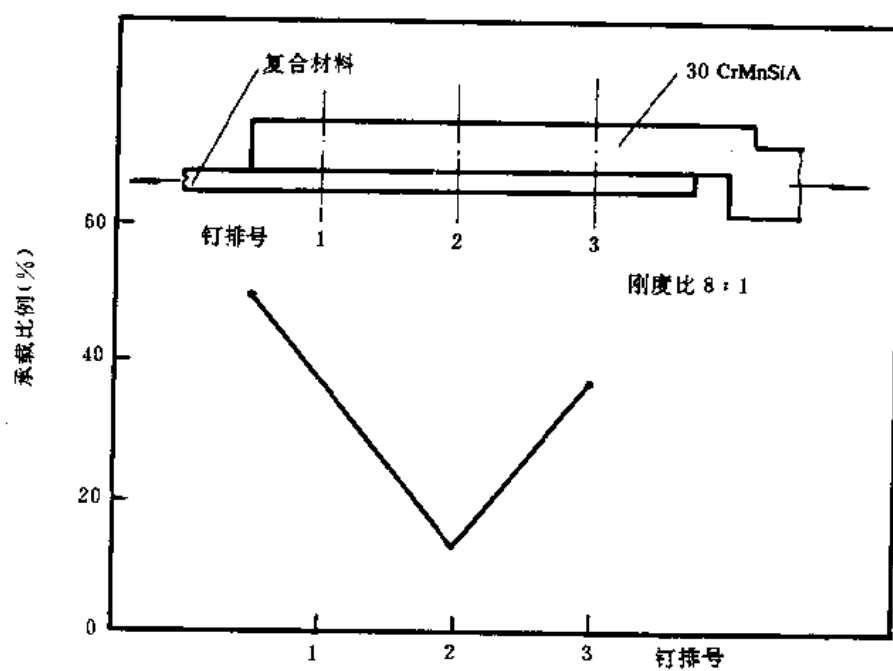


图 5.3b 三排钉单剪连接钉载分配

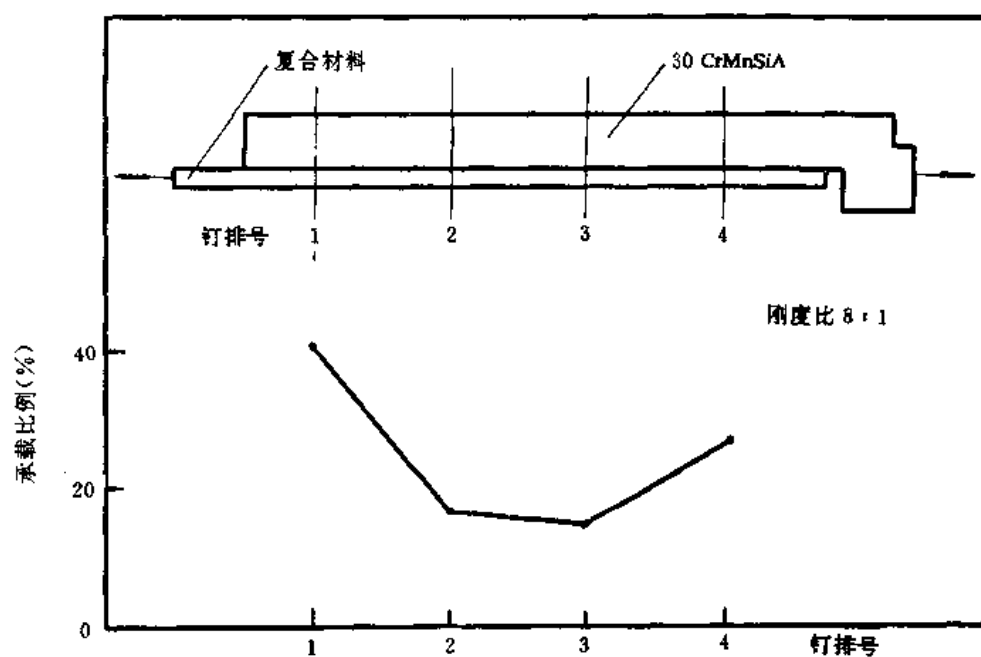


图 5.3c 四排钉单剪连接钉载分配

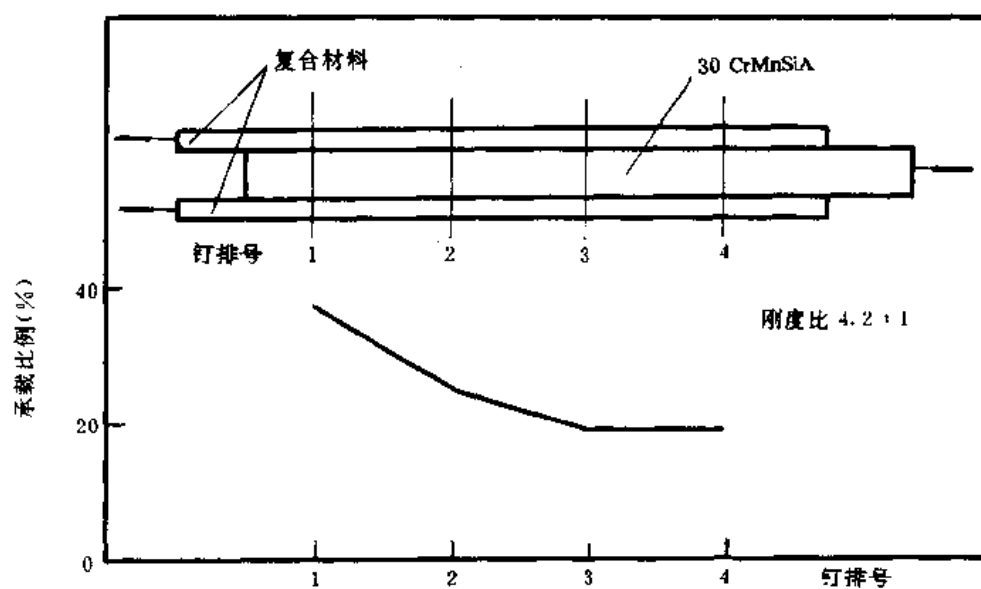


图 5.3d 四排钉双剪连接钉载分配

5.1.2.2 受拉伸载荷均匀板厚多排螺栓连接强度

a. T300/4211 单剪连接强度

T300/4211 层压板多排螺栓单剪连接强度在表 5.2 中给出。孔径为 5 mm。全部为 20 层。

b. T300/5222 单剪连接强度

T300/5222(50%0°、40%±45°、10%90°)层压板多排螺栓单剪连接强度在表 5.3 中给出。
孔径为 12 mm,层压板全部为 80 层。

c. 双剪连接强度

双剪连接强度在表 5.4 中给出。

表 5.2 T300/4211 受拉多排螺栓单剪连接强度

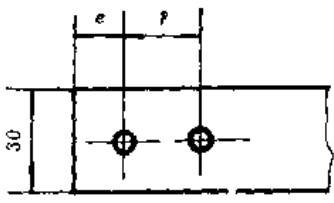
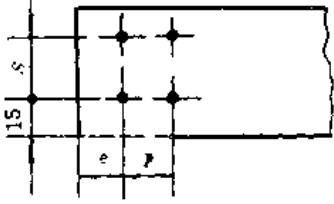
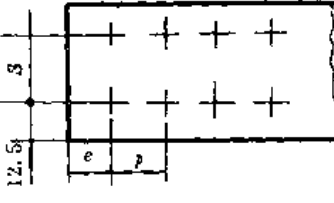
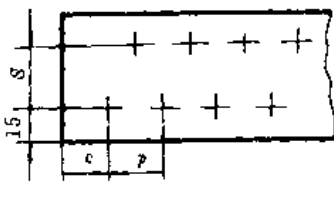
层压板 代号	铺层比例 0°/±45°/90°	P (mm)	e (mm)	(kN)		试件形状
				凸头	埋头	
B2	70/20/10	25	15	15.8	13.1	
B4	50/40/10	20	15	18.6		
B4	50/40/10	25	10	17.3		
B4	50/40/10	25	15	18.2	17.3	
B4	50/40/10	25	20	18.7		
B4	50/40/10	30	15	19.3		
B6	30/60/10	25	10	19.0		
B6	30/60/10	25	15	20.0	17.2	
B4	50/40/10	25	15	40.3		
B4	50/40/10	25	15	44.5		
B4	50/40/10	25	15	41.9		

表 5.3 T300/5222 受拉多排螺栓单剪连接强度

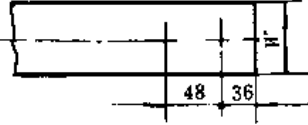
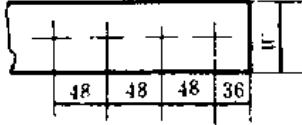
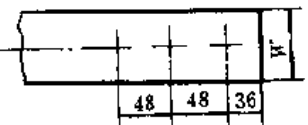
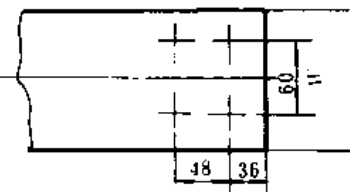
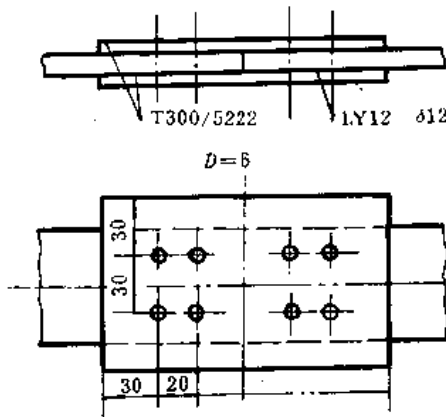
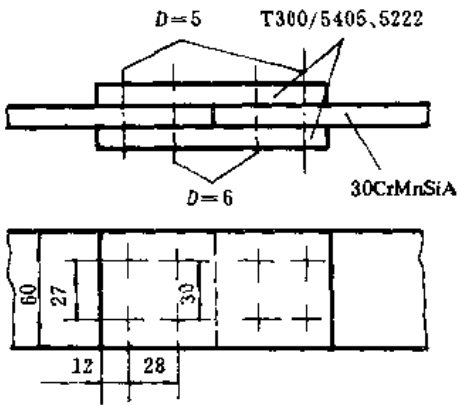
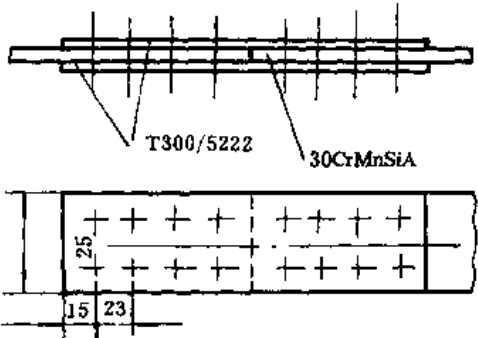
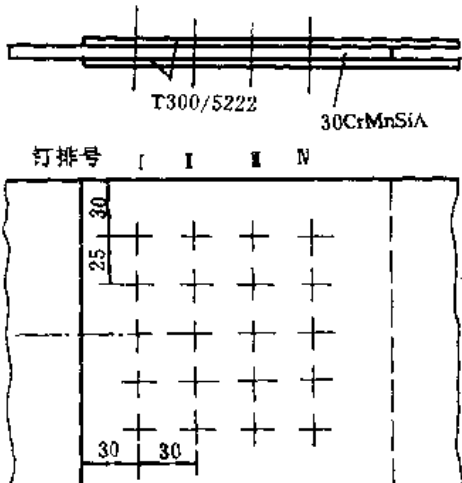
层压板 代号	W (mm)	P_{ult} (kN)	试 件 形 状	层压板 代号	W (mm)	P_{ult} (kN)	试 件 形 状
C4-2	60	123.0		C4-2	60 120	142.0 238.0	
C4-2	120	185.0		C4-2	120	260.0	

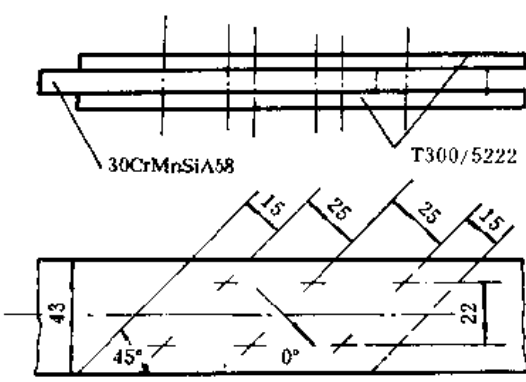
表 5.4 双剪连接强度

试 件 形 状	层压板和破坏载荷
	T300/5222 45/45/0/- - 45/45/90/- - 45/45/0/- - 45/45/90/- - 45/45/0/- - 45/45/90/0/- - 45/45/0/- $P_{ult} = 148 \text{ kN}$

续表 5.4

试件形状	层压板 and 破坏载荷
 T300/5405, 5222 30CrMnSiA	[45/-45/0/90/-45/45/45/-45/0/45/-45/45/-45/45/-45/45/0/-45/45/-45/90/45/-45/-45/0/0/-45/45/90]_s T300/5222 $P_{ult} = 137 \text{ kN}$ T300/5405 $P_{ult} = 142 \text{ kN}$
 T300/5222 30CrMnSiA 钉排号 I I II IV I I II IV	T300/5222 [-45/90/45/0/45/-45/0/45/-45/0/45/0/-45]_s 情况 1: 全部螺栓 $D=5 \text{ mm}$ $P_{ult} = 106 \text{ kN}$ 情况 2: I、IV 排 $D=5 \text{ mm}$ II、III 排 $D=6 \text{ mm}$ $P_{ult} = 104 \text{ kN}$
 T300/5222 30CrMnSiA 钉排号 I I II IV	T300/5222 [45/90/45/0/45/-45/0/45/-45/0/-45/45/0/45/-45]_s 情况 1: 全部螺栓 $D=5 \text{ mm}$ $P_{ult} = 249.5 \text{ kN}$ 情况 2: I、IV 排 $D=5 \text{ mm}$ II、III 排 $D=6 \text{ mm}$ $P_{ult} = 251.5 \text{ kN}$

续表 5.4

试件形状	层压板和破坏载荷
	T300/5222 [- 45/90/45/0/90/45/ - 45/45 - 45/0 45/0/ - 45/45/0/ 45/45/ - 45/0] _s $P_{uh} = 121.3 \text{ kN}$

5.1.2.3 受剪切载荷均匀板厚多排螺栓连接强度

图 5.4 示出受剪切载荷连接试验装置,为平衡弯曲和扭转,该装置含有 4 个连接试件。对于图示情况,内排螺栓承载 57%,外排螺栓承载 43%。表 5.5 给出单件的破坏载荷,即总破坏载荷的 1/4。

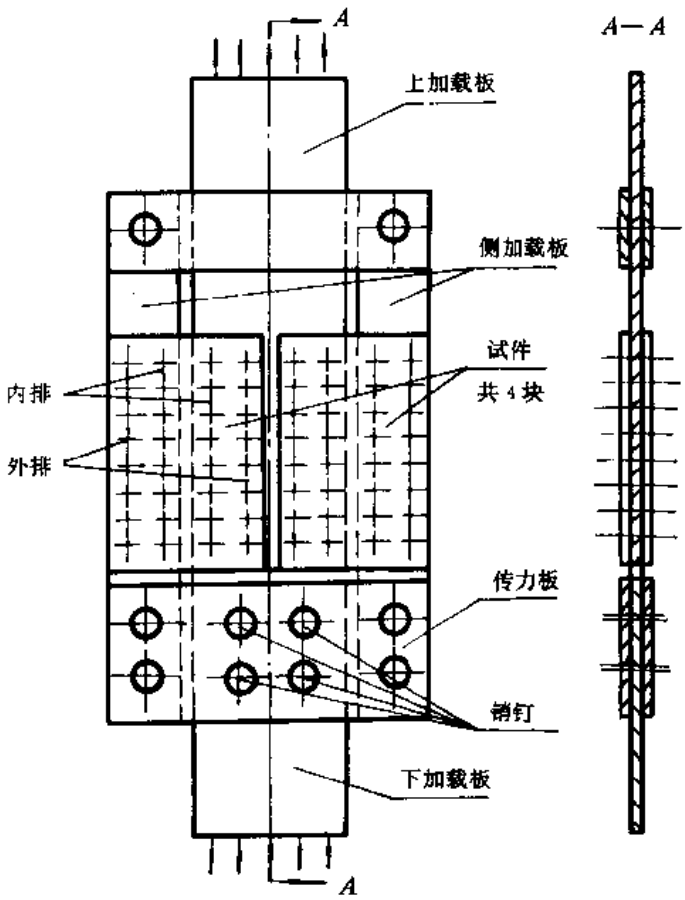


图 5.4 受剪切载荷连接试验装置

5.1.3 拉脱强度

拉脱强度试验装置如图 5.5a 所示,用冲压头模拟沉头紧固件。对于螺栓公称直径 5 mm 的情况,冲压头的头部直径为 5 mm,尾部直径 8 mm,圆锥角 100°。拉脱试件尺寸如图 5.5b 所示。

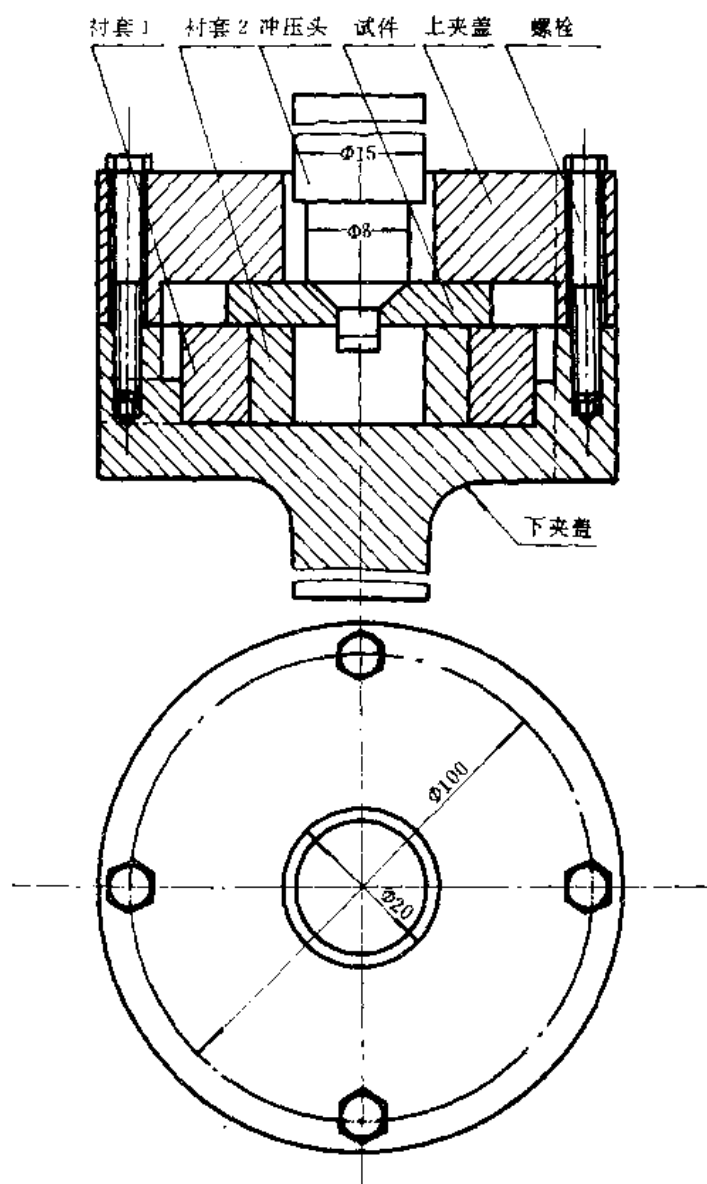


图 5.5a 拉脱试验装置

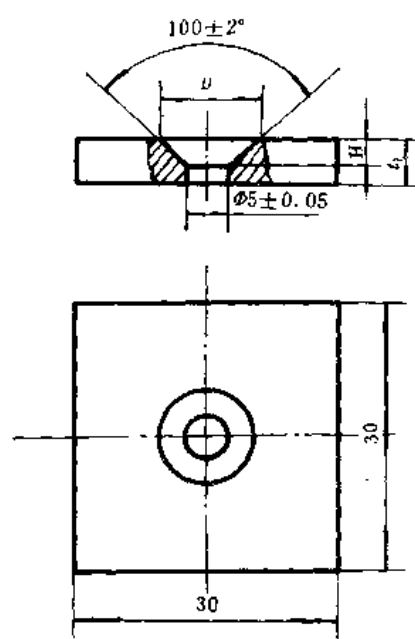


图 5.5b 拉脱试件尺寸

拉脱强度按下式计算:

$$\sigma_{\text{out}} = \frac{P_{\text{ult}}}{\pi D t} \quad (5.2)$$

式中 P_{ult} ——拉脱破坏载荷(N);
 D ——冲压头的最大直径(mm);
 t_0 ——试件厚度(mm);

t ——拉脱的实际厚度(mm),
 当镗窝深度 $H=1.5$ 时, $t=t_0-0.22$
 $H=1.7$ 时, $t=t_0-0.42$
 $H=1.9$ 时, $t=t_0-0.62$ 。

T300/5222 和 T300/QY8911 各两种层压板的拉脱强度在表 5.6 中给出。

表 5.5 受剪切载荷连接强度

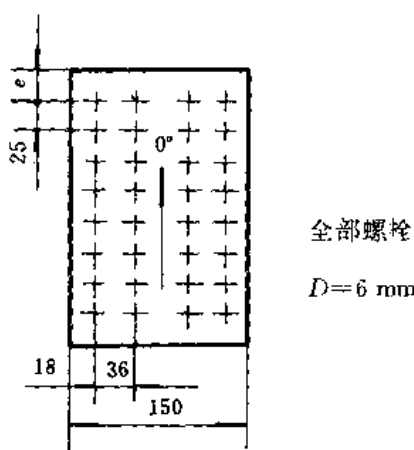
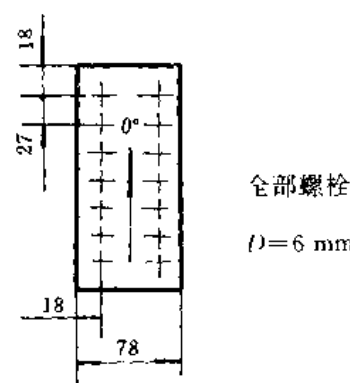
试件形状	层压板和破坏载荷
 全部螺栓 $D=6\text{ mm}$	材料: T300/5222 情况 1: $[-45/45/0/-45/45/90/-45/45/0/-45/45/90/-45/45/0/-45/45/90/0/-45/45/0]_s$ $e=25$ $P_{ult}=170.8\text{ kN}$ 情况 2: $[45/-45/0/90/-45/45/45/-45/-45/45/0/-45/45/0/0/-45/45/-45/45/45/-45/0/0/-45/45/90]_s$ $e=18$ $P_{ult}=193.1\text{ kN}$
 全部螺栓 $D=6\text{ mm}$	材料: T300/5405 $[45/-45/0/90/-45/45/45/-45/-45/45/0/-45/45/0/0/-45/45/-45/45/-45/0/0/-45/45/90]_s$ $P_{ult}=137.7\text{ kN}$

表 5.6 拉脱强度

材 料	层压板 代号	铺层比例 $0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$	镗窝深度 H (mm)	拉脱强度 (MPa)
T300/5222	C4	50/40/10	1.50	42.6
			1.70	38.0
			1.90	35.8
	C6	30/60/10	1.50	46.1
			1.70	41.4
			1.90	39.1
T300/QY8911	A4	50/40/10	1.90	33.0
	A6	30/60/10	1.90	33.3

5.2 混杂复合材料螺栓连接强度

纤维/树脂基体复合材料中的纤维通常选用碳、芳纶和玻璃单一纤维复合材料各有其优缺点。在三种复合材料中,碳纤维复合材料的特点是:比拉伸强度高,比压缩强度和比刚度最高,耐湿性最好,但是断裂应变最小,抗冲击性能最差。成本最高,比重居中。芳纶复合材料的特点是:抗冲击性能最好,比拉伸强度最高,比刚度较高,断裂应变较小,比压缩强度最低。成本适中,比重最小,吸湿。玻璃纤维复合材料的特点是:强度性能较好,抗冲击性能适中,刚度最低,破坏时应变最大。成本最低。比重最大,吸湿。

采用混杂复合材料可以弥补单一纤维复合材料的一些缺点,例如:

通过芳纶增强以克服碳纤维抗冲击性能差和断裂韧性差的弱点;

通过碳纤维增强来克服芳纶压缩性能低的弱点;

通过碳纤维增强可提高玻璃纤维结构的刚度,并减轻重量;

含有玻璃纤维带的碳或芳纶复合材料比较容易制孔;

碳纤维复合材料中的芳纶和玻璃纤维带可以起到止裂带的作用,从而有利于疲劳强度的提高。

在大多数情况下,碳纤维与芳纶混杂是可行的。这是因为它可以使重量减至最小,而且这两种材料的热膨胀系数实际上是相同的。应用玻璃纤维混杂复合材料,虽然价格便宜,但重量较大,而且在许多情况下内应力较高。

5.2.1 碳-芳纶混杂复合材料螺栓连接强度

芳纶同碳纤维相比较提供了一种改进损伤容限的手段,这是它的突出优点。它的缺点是压缩强度不如碳纤维好,这是由于芳纶原丝沿纤维劈裂造成的,但这种性质也使受载孔的应力集中得以释放,使之具有上述优点。因此在飞机结构中那些易于遭受外来物冲击的部位为改进损伤容限性质,采用碳-芳纶混杂复合材料将是有益的。

提供数据的混杂层压板的铺层方式在表 5.7 中给出,均为层间混杂。所用碳纤维为 T300、芳纶为 Kevlar49、基体为 5222。Kevlar 纤维只铺设在 0° 方向,表中用 0_K 表示,其余层均为碳纤

维。图 5.6 给出碳-芳纶混杂层压板当 $W/D \geq 5$ 时的挤压强度 σ_{bru} 随端距 e/D 的变化情况。

表 5.7 T300-Kevlar49/5222 混杂层压板铺层方式

层压板 代号	铺层比例 (%)				铺层顺序
	0°		±45°	90°	
	Kevlar	T300	T300	T300	
CK1	10	40	40	10	$[45/0/-45/0/90/0_K/45/0/-45/0]_s$
CK2	20	30	40	10	$[45/0/-45/0_K/90/0/+45/0_K/-45/0]_s$
CK3	20	40	30	10	$[45/0/0/-45/0_K/90/0/0/0_K \pm 45]_s$
CK4	30	30	30	10	$[45/0_K/0/-45/0_K/0/90/0_K/0 \pm 45]_s$
CK5	20	50	20	10	$[45/0/0_K/0/-45/0/0_K/90/0/0]_s$
CK6	30	40	20	10	$[45/0_K/0/-45/0/0_K/0/90/0_K/0]_s$

当板宽-孔径比 $W/D=4$ 时,上述各混杂层压板的挤压强度最大降低 5%。
由图 5.6 可见,碳-芳纶混杂层压板的挤压强度比全碳纤维层压板的要低。

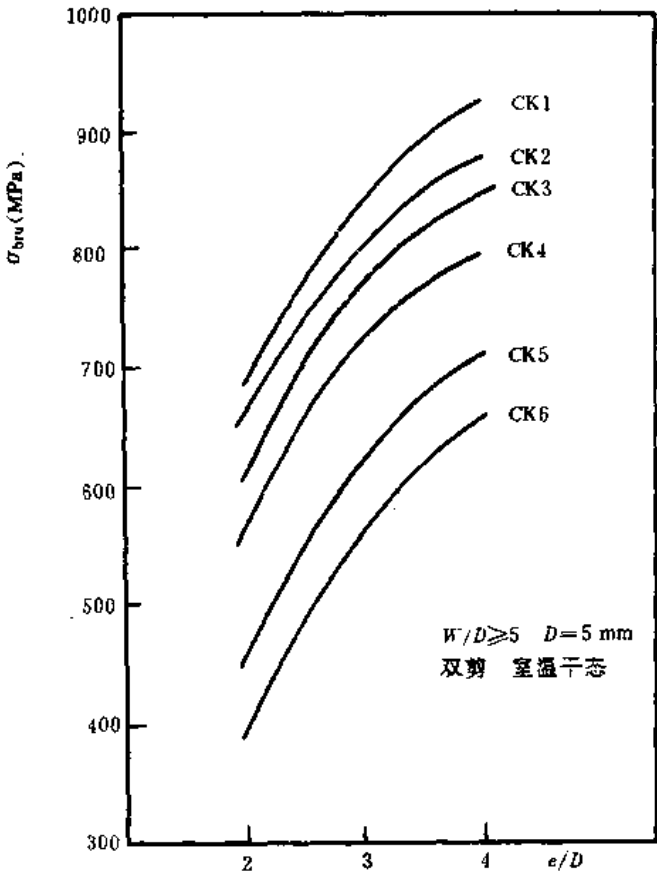


图 5.6 T300-Kevlar49/5222 混杂层压板抗压强度

5.2.2 碳-玻璃混杂复合材料螺栓连接强度

提供本节数据的混杂层压板的铺层方式在表 5.8 中给出,均为层间混杂。所用碳纤维为 T300、玻璃纤维为高强 2 号、基体为 5222。玻璃纤维只铺设在 0° 方向,表中用 0_G 表示,其余层均为碳纤维。图 5.7 示出碳-玻璃混杂层压板当 $W/D \geq 5$ 时的挤压强度随端距 e/D 的变化情况。

表 5.8 T300-Glass/5222 混杂层压板铺层方式

层压板 代号	铺层比例 (%)				铺层顺序
	0°		$\pm 45^\circ$	90°	
	Glass	T300	T300	T300	
CG1	10	40	40	10	$[45/0/-45/0/90/0_G/45/0/-45/0]_s$
CG2	20	30	40	10	$[45/0/-45/0_G/90/0/45/0_G/-45/0]_s$
CG3	20	50	20	10	$[45/0/0_G/0/-45/0/0_G/90/0/0]_s$
CG4	30	40	20	10	$[45/0_G/0/-45/0/0_G/0/90/0_G/0]_s$

当板宽-孔径比 $W/D < 5$ 时,可采用 5.1.1.2 节给出的同样 $\pm 45^\circ$ 层比例的全碳纤维复合材料层压板的宽度修正系数。

由图 5.7 可见,碳-玻璃混杂层压板的挤压强度与全碳纤维层压板的挤压强度基本相当。

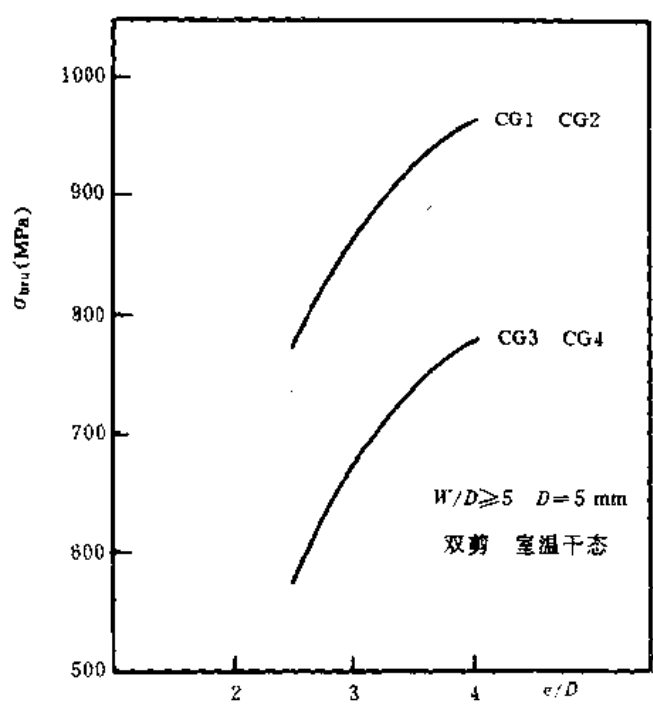


图 5.7 T300-Glass/5222 混杂层压板挤压强度

5.3 连接强度校核方法

5.3.1 单钉连接强度校核

5.3.1.1 被连接板的强度校核

挤压强度按下式校核

$$\sigma_{br} = \frac{P_{br}}{D t_e} \leq [\sigma_{br}] \quad (5.3)$$

式中 P_{br} —— 钉载(N);

D —— 孔径(mm);

t_e —— 板的有效厚度, 定义为:

$$t_e = t, \text{ 当 } t \leq D$$

$$t_e = D, \text{ 当 } t > D;$$

$[\sigma_{br}]$ —— 挤压许用值(MPa)

应当说明, 因为宽度和端距的影响在许用挤压强度值中已经考虑, 因此, 拉伸和剪切强度将自动满足, 不必校核。

5.3.1.2 紧固件的强度校核

单剪连接紧固件的剪切强度按下式校核:

$$\tau = \frac{4P_{br}}{\pi D^2} \leq [\tau] \quad (5.4)$$

式中 $[\tau]$ —— 紧固件的许用剪切强度值。

5.3.2 多排钉连接强度校核

多排钉连接与单排钉连接的不同之处在于钉排所处的剖面不仅有挤压载荷(钉载) P_{br} 而且还有旁路载荷 P_{by} 。各排钉承受的挤压载荷 P_{br} 可由作用于连接上的总载荷 P 乘以各排钉的承载比例得到, 相应剖面的旁路载荷 P_{by} 随之可以得到。旁路载荷对钉的剪切强度没有影响, 因此钉的剪切强度校核方法与单钉连接相同, 不再赘述。校核被连接板强度时必须考虑挤压载荷 P_{br} 和旁路载荷 P_{by} 共同作用的影响。

5.3.2.1 受拉伸载荷情况

a. 挤压强度校核

已知钉载 P_{br} 后, 挤压强度校核同单钉连接情况一样, 按式(5.3)进行校核。对于均匀板厚且紧固件尺寸相同的情况, 只需选择沿载荷方向承载比例最大的钉孔进行挤压强度校核。

b. 拉伸强度校核

受拉多排钉连接的拉伸强度校核按下式进行:

$$K_{bc} \sigma_{br} + K_{tr} \sigma_{net} \leq [\sigma] \quad (5.5)$$

式中 K_{bc} --- 复合材料受载孔挤压应力集中减缩系数, 见式(4.67);

K_{tr} --- 复合材料开孔拉伸应力集中减缩系数, 见式(4.69);

σ_{br} --- 由挤压载荷 P_{br} 产生的挤压应力(MPa);

σ_{net} --- 由旁路载荷 P_{by} 产生的净面积拉伸应力(MPa);

$[\sigma]$ --- 层压板许用拉伸应力(MPa),

$$[\sigma] = E_x [\epsilon];$$

E_x --- 层压板纵向拉伸弹性模量(MPa);

$[\epsilon]$ --- 层压板设计拉伸许用应变。

设计许用应变数值基准可为 A 基准或 B 基准。采用何种数值基准应根据具体工程项目的结构设计准则而定。一般来说, 对于不进行结构试验的构件或单传力结构要求采用 A 基准值; 对于多路传载和破损安全结构采用 B 基准值。对于碳纤维树脂基复合材料, 许用拉伸应变一般采用如下数值: “A”基准, $[\epsilon_A] = 0.0082$; “B”基准, $[\epsilon_B] = 0.0090$ 。

当排距不小于四倍孔径和端距不小于三倍孔径时, 在推荐的连接区铺层范围内不会发生剪切破坏。

5.3.2.2 受压缩载荷情况

受压缩载荷多钉连接的挤压强度校核按下式进行:

$$\sigma_{br} + \sigma_{net} \leq [\sigma_{br}] \quad (5.6)$$

式中 σ_{br} --- 由挤压载荷 P_{br} 产生的挤压应力;

σ_{net} --- 由旁路载荷 P_{by} 产生的净面积压缩应力;

$[\sigma_{br}]$ --- 许用挤压强度值。

5.4 连接设计和强度校核举例

5.4.1 受拉伸载荷连接接头

图 5.8 为一承受拉伸载荷的连接接头, 根据下述已知参数校核接头强度, 确定连接区层压板的厚度。

紧固件: 100°沉头 Ti-22 高锁螺栓, 公称直径 $D = 6 \text{ mm}$ 。

基本板: 材料为 T300/QY8911, 固化后单层厚度为 0.120mm。铺层情况见表 5.9。

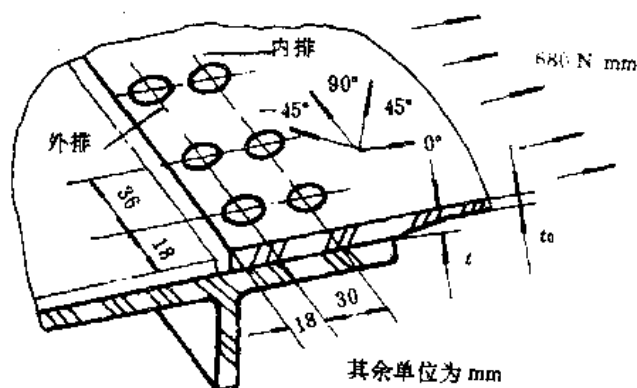


图 5.8 受拉伸载荷连接接头

表 5.9 受拉伸载荷连接接头基本板铺层参数

基本板厚 (mm)	总层数	铺层层数			铺层比例 (%)		
		0°	±45°	90°	0°	±45°	90°
2.40	20	10	8	2	50	40	10

计算步骤如下:

a. 确定许用挤压强度值

由图 5.1a 查得基本板挤压强度 $\sigma_{bru}=975$ MPa;

$W/D=36/6=6.0$, 由图 5.2a 得 $C_w=1.0$;

$e/D=18/6=3.0$, 由图 5.2b 得 $C_e=0.93$ (取较严重的外排钉情况);

载荷方向与 0° 纤维方向一致。由图 5.2c 得 $C_P=1.0$

$D=6$ mm, 由图 5.2d 得 $C_d=0.98$;

板厚 $t<5$ mm, 由图 5.2e 得 $C_e=1.0$;

室温、干态情况, $C_{em}=1.0$;

考虑初始破坏和其他因素的影响, 取 $K=0.55$ 。

由式(5.1)得

$$[\sigma_{br}]=(1)(0.93)(1)(0.98)(1)(1)(0.55)(975)=489 \text{ MPa}$$

b. 确定许用拉伸应力

由单层板力学性质, 用层压板理论计算、得弹性模量 $E_{xt}=79.27$ GPa。取“A”基准许用应变, 于是得许用拉伸应力

$$[\sigma]=(79270)(0.0082)=650 \text{ MPa}$$

c. 计算连接区加厚部位的板厚度

每列钉承受的总载荷为 $680 \times 36=24480$ N;

由图 5.3a 可知内排钉和外排钉分别承受 57% 和 43% 的载荷, 由此得:

内排钉承受的载荷为 $24480 \times 0.57=13954$ N;

外排钉承受的载荷为 $24480 \times 0.43=10526.4$ N, 也是内排钉处的旁路载荷。

从以下两方面的要求计算临界的内排钉处所需的层压板厚度:

• 按照挤压承载计算

$$t=\frac{13954}{6 \times 489}=4.76 \text{ mm}$$

• 按照拉伸承载计算

$$S/D=36/6=6, e/D=30/6=5, C=0.63(\text{图 } 4.23)$$

由式(4.60)

$$K_{be}=1+\frac{2}{6-1}-\frac{1.5(1.5-\frac{0.5 \times 36}{30})}{6+1}=1.2071$$

由式(4.67)

$$K_{bc}=\frac{1+(0.63)[(1.2071)(6-1)-1]}{6-1}=0.8345$$

由式(4.62)

$$K_w=2+(1-\frac{6}{36})^3=2.5787$$

由式(4.69)

$$K_{tc}=1+(0.63)(2.5787-1)=1.9946$$

挤压应力

$$\sigma_{br} = \frac{13954}{6t} = \frac{2325.7}{t}$$

旁路应力

$$\sigma_{net} = \frac{10526}{(36-6)t} = \frac{350.9}{t}$$

代入式(5.5)得

$$(0.8345) \frac{2325.7}{t} + (1.9946) \frac{350.9}{t} = 650$$

$$t = 4.06 \text{ mm}$$

因为外排钉孔处,挤压载荷比内排小,又没有旁路载荷,所以无论挤压或拉伸都不是临界的,无需再进行计算。取许用挤压强度时已经考虑了端距的影响,所以也无需按剪切计算。

连接区加厚部位层压板的厚度,取挤压和拉伸承载所需的较大者,即取 $t = 4.76 \text{ mm}$,选定 $t = 4.80 \text{ mm}$ 。铺层总数 $n = 4.80/0.12 = 40$ 层。各方向的铺层数为

$$n_{45} = n \times 50\% = 20$$

$$n_{\pm 45} = n \times 40\% = 16$$

$$n_{90} = n - n_{\pm 45} - n_0 = 4$$

加厚部位的具体铺层为 $[45/0/-45/0/90/0/45/0/-45/0]_{25}$

板厚 $4.8 > (0.6)(D) = (0.6)(6) = 3.6$, 沉头窝满足要求。

d. 校核接头强度

加厚部位层压板与基本层压板铺层百分比一样,所以许用值仍取: $[\sigma_{br}] = 489 \text{ MPa}$, $[\sigma] = 650 \text{ MPa}$ 。

内排钉孔:

- 加厚部位层压板挤压强度校核

$$\sigma_{br} = \frac{13954}{(6)(4.8)} = 485 \text{ MPa}$$

$$\text{剩余强度系数 } \eta = \frac{489}{485} = 1.01 (\text{通过})$$

- 加厚部位层压板拉伸强度校核

$$(0.8345) \frac{2325.7}{4.8} + (1.9946) \frac{350.9}{4.8} = 550 \text{ MPa}$$

$$\text{剩余强度系数 } \eta = \frac{650}{550} = 1.18 (\text{通过})$$

外排钉孔无需校核。

e. 紧固件剪切强度校核

紧固件单面破坏剪力 $[Q] = 21436 \text{ N}$

内排钉剩余强度系数:

$$\eta = 21436/13954 = 1.54 (\text{通过})$$

外排钉无需校核。

5.4.2 受剪切载荷连接接头

图 5.9 示出沿双排紧固件排列方向承受剪切载荷的连接接头,根据下述已知参数校核接

头强度、确定连接区层压板的厚度。

紧固件:115S、100°沉头钛合金高锁螺栓,公称直径 $D=6\text{ mm}$,单剪强度 15 kN 。

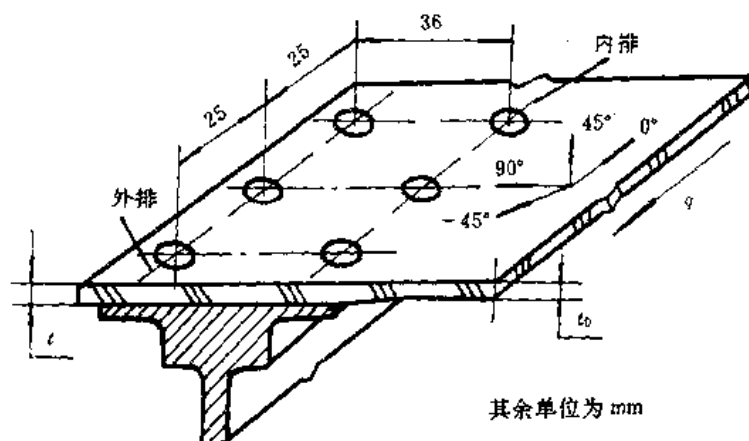


图 5.9 受剪切载荷连接接头

基本板:材料为 T300/5222,固化后单层厚度 0.117 mm ;

板厚 $t_0=4.1\text{ mm}$,共 35 层;

铺层情况为 $[\pm 45/0/\mp 45/\pm 45/0/45_2/-45_2/0/90/0/\mp 45/90]_s$;

承受剪切载荷 $q=700\text{ N/mm}$,方向为 0° 层方向。

通过试验得到该板受载孔处的面内许用剪切强度值 $[\tau]=120\text{ MPa}$,许用挤压强度值 $[\sigma_{br}]=400\text{ MPa}$ 。

计算步骤如下:

a. 计算连接区加厚部位的板厚

• 按面内剪切承载计算

$$q=t[\tau]$$

$$t=q/[\tau]=700/120=5.83\text{ mm}$$

• 按钉孔挤压承载计算

通过试验和测量得知内排孔与外排孔承载按 57 : 43 分配,即内排孔承受 57% 的载荷,求得满足钉孔挤压承载所需层压板厚度为

$$25 \times 0.57 \times q = D \cdot t \cdot [\sigma_{br}]$$

$$t = \frac{25 \times 0.57 \times 700}{6 \times 400} = 4.2\text{ mm}$$

确定连接区加厚部位的层压板厚度按面内剪切承载需 $t=5.8\text{ mm}$,选定 $t=6\text{ mm}$,铺层层数 $n=6/0.117 \approx 51$ 层。

铺层层数比原基本板增加 16 层,考虑到对面内剪切承载有益,可适当扩大 $\pm 45^\circ$ 铺层比例,确定加厚部位铺层为 $[\pm 45/0/90/\mp 45/\pm 45/0/45_2/-45_2/45/0/\pm 45/90/\pm 45/-45/0_2/\mp 45/90]_s$ 。

基本板与加厚部位板的铺层参数见表 5.10。

表 5.10 受剪切载荷连接接头铺层参数

	总厚度 (mm)	总层数	铺 层 层 数			铺 层 百 分 比		
			0°	±45°	90°	0°	±45°	90°
基本板	4.1	35	8	24	3	23	68.5	8.5
加厚部位	6	51	10	36	5	19.5	70.5	10

b. 校核接头强度

由于基本层压板与加厚部位层压板铺层百分比相近,所以二者的 $[\tau]$ 、 $[\sigma_{br}]$ 差别可以忽略。

- 加厚部位层压板剪切强度校核

$$\tau = q/t = 700/6 = 117 \text{ MPa}$$

剩余强度系数 $\eta = [\tau]/\tau = 120/117 = 1.03$ (通过)

- 加厚部位层压板挤压强度校核

$$\sigma_{br} = \frac{25 \times 0.57 \times q}{Dt} = \frac{25 \times 0.57 \times 700}{6 \times 6} = 277 \text{ MPa}$$

剩余强度系数 $\eta = [\sigma_{br}]/\sigma_{br} = 400/277 = 1.44$ (通过)

- 紧固件剪切强度校核

内排每个紧固件承受的载荷为

$$P = 25 \times 0.57q = 10.0 \text{ kN} < 15 \text{ kN (强度足够)}$$

参 考 文 献

[5-1] 谢鸣九. 复合材料多钉连接件强度及载荷分配. 飞机强度研究所, Q/12S-8901-54
 [5-2] 谢鸣九等. T300/5222 复合材料力学性能研究. 飞机强度研究所, Q/12S-9001-11
 [5-3] 谢鸣九等. 碳-芳纶混杂复合材料层压板螺栓连接强度研究. 飞机强度研究所, Q/12S-9001-52.
 [5-4] 谢鸣九等. T300/QY8911 复合材料连接强度(二). 飞机强度研究所, Q/12S-9202-7
 [5-5] 谢鸣九等. 复合材料螺栓连接载荷分配. 飞机强度研究所, Q/12S-9001-53
 [5-6] 谢鸣九等. 复合材料层压板拉脱强度研究. 飞机强度研究所, Q/12S-9001-104, 1990
 [5-7] 航空航天工业部科学技术研究院编. 复合材料设计手册. 北京: 航空工业出版社, 1990
 [5-8] 谢鸣九等. T300/QY8911 复合材料连接强度. 飞机强度研究所, Q/12S-9101-5
 [5-9] 谢鸣九. 影响复合材料机械连接强度的因素研究. 飞机强度研究所, Q/12S-9109-69

第六章 铆接

本章给出复合材料结构铆接设计中应考虑的有关问题。也给出了 T300/5222 复合材料层压板用螺纹抽钉和纯钛 铆钉, T300/4211 复合材料层压板用钛环槽钉和 T300/HD58 复合材料层压板用钛铌铆钉铆接时, 常温干态情况下, 层压板上钉孔挤压强度值。

6.1 铆接设计

复合材料结构铆接设计应按照 3.2 节中所规定的机械连接设计原则进行。同时在设计中还应考虑以下具体问题:

6.1.1 连接参数的选取

铆接设计的连接参数应参照 3.2.1 节规定的范围选取。在结构允许的条件下, 应适当增加边距和端距。

6.1.2 铆钉的选取

铆钉应先选用 11.2 节中推荐的钛合金环槽铆钉、纯钛铆钉、钛合金螺纹抽钉以及在国内研制的复合材料部件上应用比较成功的国产铆钉或可购到的国外新型铆钉^[6-1]。所选用的紧固件直径一般不应超过 4mm, 否则不但成形困难, 复合材料板也容易造成严重损伤。在满足结构要求的条件下, 尽量使用平头或半圆头钉头。复合材料层压板较厚的部位, 一般不宜采用铆接, 而应用螺接。

在可拆卸更换的非受力或次受力构件上, 在某些内部构件上, 从降低重量和成本考虑, 也可以使用少量铝合金铆钉, 但铆接必须强调湿装配, 采取严格的防电位腐蚀措施。

6.1.3 铆钉连接的层压板铺层设计

应按 3.2.5 节规定的原则进行。

6.1.4 提高拉脱强度的措施

在像舵面或口盖等蒙皮较薄的结构外表面, 可采取以下措施提高蒙皮的拉脱强度:

- a. 在铆钉埋头窝上安装钛合金或不锈钢加强窝, 见图 6.1。
- b. 在较薄蒙皮的埋头窝上安装冲窝的钛合金或不锈钢加强板, 见图 6.2。

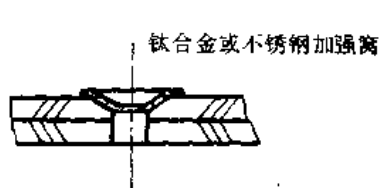


图 6.1 加强窝示意图

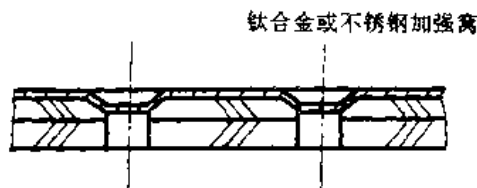


图 6.2 加强板示意图

6.1.5 按规定的铆接工艺方法施工

铆接应按 10.1 和 10.3 节规定的铆接工艺方法。制孔和铆接应符合规定的工艺规范。制孔时孔的钻出部位应粘贴玻璃布或固化胶层,或者垫上工艺垫板以防损伤。复合材料构件和金属构件相连部位,在结构允许的条件下,尽可能在金属表面成形铆头,若在复合材料构件上成形,应加上钛或钛合金垫圈或不锈钢垫圈。

6.1.6 可靠的防电位腐蚀措施

在铆接设计中,应采用可靠的防电位腐蚀措施。应该更重视湿装配的作用,因为湿装配不仅可以防腐,而且对铆接中难以完全避免的工艺损伤有弥补作用。另外应在复合材料与金属构件的接触部位采用垫玻璃布、涂胶或涂漆等防护措施。重要或易腐部位,应该采取接头全密封的方法来防腐。

6.1.7 铆接质量控制

在制孔、铆窝、铆接过程中均应进行严格的质量控制和检查。重要部位还应进行无损检测,并根据结构部位的重要性制订缺陷标准。

6.2 螺纹抽钉连接强度

表 6.1 给出了 T300/5222 复合材料两种层压板(代号 A 和 B)单钉连接挤压强度值^[8-10]。试件为单搭接受拉形式,采用 100°沉头抽钉,孔径 5mm,板宽 30mm,端距 20mm,板厚 2.5mm。破坏形式为层压板孔挤压破坏。

表 6.1 螺纹抽钉连接挤压强度

层压板 代 号	铺层比例 (%)			铺 层 顺 序	σ_{brmax} (MPa)
	0°	±45°	90°		
A	50	40	10	[45/0/-45/0/90/0/45/0/-45/0]	699
B	30	60	10	[45/0/-45/0/45/90/-45/0/45/-45]	702

6.3 纯钛铆钉连接强度

表 6.2 给出了 T300/5222 复合材料两种层压板(代号 C 和 D)单钉连接挤压强度值^[11]。试件为单搭接受拉形式,采用 100°沉头铆钉,孔径 3.5mm,板宽 21mm,端距 14mm,板厚

1. 375mm,破坏形式为层压板孔挤压破坏。

表 6.2 钨钛铆钉连接挤压强度

层压板 代 号	铺层比例 (%)			铺 层 顺 序	σ_{brmax} (MPa)
	0°	±45°	90°		
C	54.5	36.4	9.1	[0/45/0/-45/0/90/0/-45/0/45/0] _s	699
D	36.4	54.5	9.1	[-45/0/45/0/-45/90/45/0/-45/0/45] _s	705

6.4 钛环槽铆钉连接强度

表 6.3 列出了 T300/4211 复合材料材料六种层压板的铺层情况,表 6.4 给出这些层压板用 $\Phi 3.5 \times 120^\circ$ 沉头、 $\Phi 4 \times 120^\circ$ 沉头和 $\Phi 4 \times 100^\circ$ 沉头钛环槽铆钉单钉连接的层压板孔挤压强度值。对于铆钉直径为 3.5mm 的试件,其板宽 20mm,端距 9mm;对于铆钉直径为 4mm 的试件,其板宽 20mm,端距 10mm。

本节试验数据由成都飞机工业公司提供。

表 6.3 钛环槽铆钉连接试件铺层情况

层压板 代 号	铺层比例 (%)			铺 层 顺 序
	0°	±45°	90°	
E	28.6	57.1	14.3	[45/0/-45/90/45/0/-45] _{2s}
F	31.0	69.0		[±45/0/±45/0/±45/0/±45/0/±45/0] _s
G	30.8	61.5	7.7	[45/0/-45/90/45/0/-45/0/45/-45/0] _s
H	33.3	66.7		[45/0/-45/45/0/-45/45/-45/0] _s
I	29.4	70.6		[45/0/-45/45/0/-45/45/-45/0] _s
J	33.3	44.5	22.2	[45/0/-45/90/0] _s

表 6.4 钛环槽铆钉连接挤压强度

$\Phi 3.5 \times 120^\circ$ 埋头		$\Phi 4 \times 120^\circ$ 埋头		$\Phi 4 \times 100^\circ$ 埋头	
层压板 代 号	σ_{brmax} (MPa)	层压板 代 号	σ_{brmax} (MPa)	层压板 代 号	σ_{brmax} (MPa)
H ^①	828	F	645	E	487
H	723	G	580	G	536
I	655	H	663	H	645
J	696	I	634	I	637

① 此组试件在夹具上德埋头窝。

6.5 钛铌铆钉连接强度

表 6.5 给出了 T300/HD58 中温固化环氧树脂复合材料层压板单钉和四钉美国钛铌铆钉

CSR903B5-6 连接强度^[6-4],名义层压板厚度 2mm,铆钉直径 4mm,单钉和四钉铆接试件的几何尺寸分别见图 6.3 和图 6.4。

表 6.5 钛铌铆钉连接强度

试件名称	铺 层	破坏载荷 (kN)
I 型	[45/0/-45/0/90/0/45/0] _s	4.77
II 型	[45/0/-45/0/90/0/45/0] _s	19.18

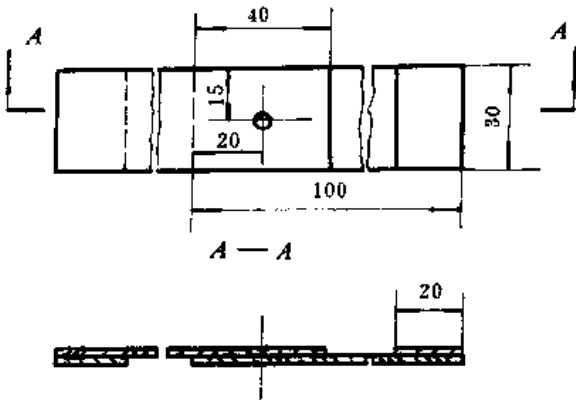


图 6.3 I 型试件

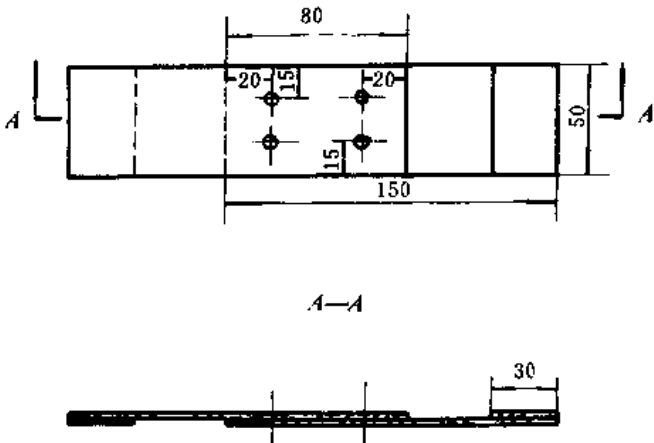


图 6.4 II 型试件

参 考 文 献

[6-1] 航空航天工业部科学技术研究院编. 复合材料设计手册. 北京: 航空工业出版社, 1990. 319~360
 [6-2] 谢鸣九, 王洪珠等. 复合材料铆接强度研究. 飞机强度研究所, Q/12S-9001-07, 1990
 [6-3] 汪裕炳, 张全纯. 复合材料结构连接. 北京: 国防工业出版社, 1992
 [6-4] 谢鸣九, 窦润龙, 王少妮. 复合材料混合连接. 飞机强度研究所, Q/12S-9001-41, 1994

第七章 机械连接的疲劳

本章内容限于复合材料层压板机械连接的疲劳,包括机械连接疲劳试验方法、影响机械连接疲劳的因素、室温和湿热环境下的机械连接疲劳强度、疲劳后的剩余强度、疲劳失效准则和工程设计建议等,给出了 T300/4211 和 T300/QY8911 复合材料层压板机械连接的一些疲劳性能,但由于数据不足,为了定性地阐明一些因素对连接疲劳强度的影响,引用了较多的国外试验数据和曲线,供使用时参考。

7.1 概述

机械连接是复合材料主承力结构的主要连接形式。为满足结构完整性要求,除静强度和刚度外,机械连接还必须满足疲劳、损伤容限和功能要求。机械连接部位较大的应力集中使它成为主承力结构的重要疲劳薄弱环节之一。由于复合材料连接的寿命预估方法尚未成熟,目前工程上确定疲劳强度的主要手段是试验,尤其在复杂环境条件下更是如此。

复合材料机械连接的基本破坏模式,除钉杆剪断外,主要有三种:一是净面积拉断,二是端距剪切,三是钉孔挤压,见图 7.1。比较常见的还有拉伸-剪切、挤压-拉伸等组合型破坏模式

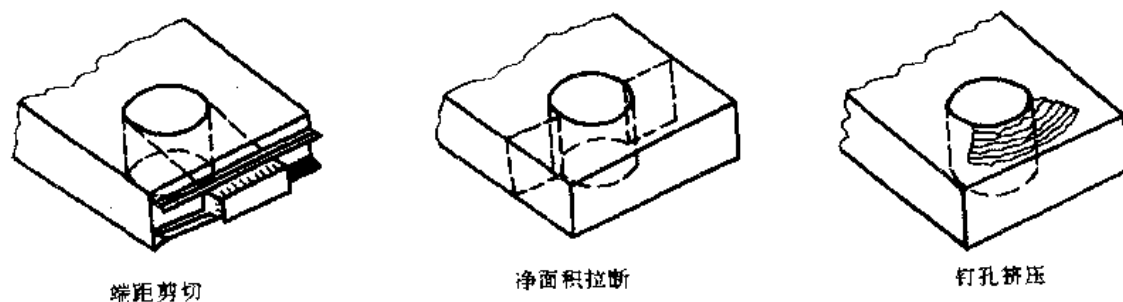


图 7.1 机械连接基本破坏模式

静强度设计合理的复合材料对称机械连接,在轴向疲劳加载下的破坏大部分都从钉孔挤压损伤开始。与常见的金属连接孔两侧孔边裂纹扩展,最后边距疲劳断裂的典型形式不同,复合材料钉孔受紧固件压迫一侧的基体材料逐渐产生裂纹、纤维-基体界面脱胶、纤维局部屈曲、扭折和剪切,伴随着基体局部压损和分层,钉孔处逐渐累积产生宏观的永久伸长变形。随着载荷循环次数增多,局部压损区扩大,孔永久伸长变形增大,可能超出通常结构的失效许用限值 $5\%D$,但连接的剩余强度并未因此明显降低。当分层与压损伴随着纤维断裂扩展到端距材料难以承受的程度,连接在少量循环中急剧地破坏。少部分情况下,挤压破坏前孔永久伸长变形并不大,由内部损伤累积而发生急剧破坏。

7.2 复合材料机械连接疲劳试验方法

目前尚未建立复合材料机械连接疲劳试验的标准方法,GB7559-87中所建议的连接试件形式,是针对静强度试验的,对疲劳试验并不合适。

7.2.1 试件及夹具

疲劳试件应模拟飞机实际结构连接的参数和工艺状态。为研究连接的结构和工艺参数对疲劳的影响,常采用的基准连接试件为简单的单钉双剪形式,如图7.2(a)所示,这种试件也常被静挤压强度试验所采用[7-1]。连接板的刚度应远大于试件刚度。孔与螺栓的配合应符合

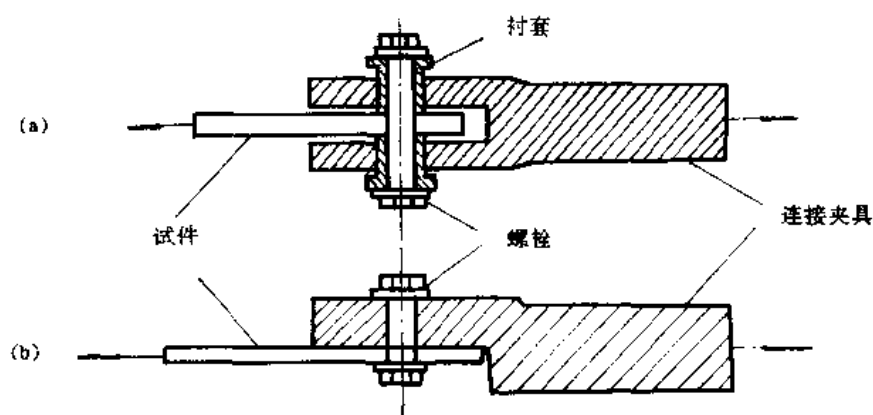


图 7.2 典型螺栓连接的试件与夹具形式

实际结构,一般常用 H8/h8 配合。图 7.2(a)和(b)分别表示双剪和单剪连接夹具形式。

7.2.2 试验加载

连接疲劳试验常在等幅加载下进行,根据实际结构工作状态选择应力比 R 。复合材料连接对 $R=-1$ 的拉-压循环最为敏感,其次是小于-1 的拉-压循环与压-压循环。复合材料双剪机械连接对试验中常用的 $R=0.05\sim 0.10$ 的拉-拉疲劳并不敏感。

为检查机体连接的实际疲劳寿命,常在该部位的实际载荷谱下进行疲劳试验。

疲劳加载的频率一般不大于 10Hz,当载荷幅值较小时也可选择 10~30Hz。频率较高时,应采取有效措施确保连接区不升高温度,在有拧紧力矩时更要注意。

7.2.3 试验环境

一般取温度 $23\pm 2^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $50\pm 5\%$ 作为标准的室温试验环境。考虑到较高湿度与温度对机械连接疲劳性能的重要影响,疲劳试验中有时同时施加恒定的湿热环境或湿热环境谱(见 7.5 节)。

7.2.4 孔径变形监控

复合材料机械连接孔在疲劳加载下的永久伸长变形将改变接头中的应力分布和多钉间的载荷分配比例,并恶化结构的动力特性。当孔永久伸长变形超过结构允许的限值时,连接就已

经失效。因此钉孔永久伸长变形的跟踪是复合材料机械连接疲劳试验的重要内容。定期中断试验,分解试件,测定孔伸长变形是可行的方法,但给试验工作增加了困难。国外常安装引伸计测定钉孔与选定基准之间的永久变形,并要求引伸计具有良好的疲劳性能和环境耐力。

7.2.5 条件疲劳极限

除了经受振动、噪声等高频载荷的少部分构件外,承受机动和突风载荷谱的机体主承力结构,经常使用 $10^4 \sim 10^6$ 周范围内的 $S-N$ 曲线, 10^7 周疲劳极限的实际工程应用并不多,因此常用 10^6 周不发生破坏或孔永久变形不大于失效值($>5\%$ 直径)的条件疲劳极限。

7.3 影响机械连接疲劳的因素

7.3.1 疲劳试验破断与孔永久变形间的关系

在说明影响因素前,首先要确定连接疲劳两种失效模式破断与孔永久伸长变形间的关系。这里破断是指孔拉断、剪豁或压损,而失去承受疲劳载荷的能力。

本章以下各节所用层压板代号见 1.3 节。如不加特殊说明,均为 $D=5\text{mm}$ 、 $W/D=6$ 、 $e/D=4$ 的对称连接件在拧紧力矩 $4\text{N}\cdot\text{m}$ 和室温干态下的试验结果。

所谓纤维主控层压板是指 0° 层比例不小于 40% 的层压板,而基体主控层压板是指 0° 层比例不大于 25% 的层压板。

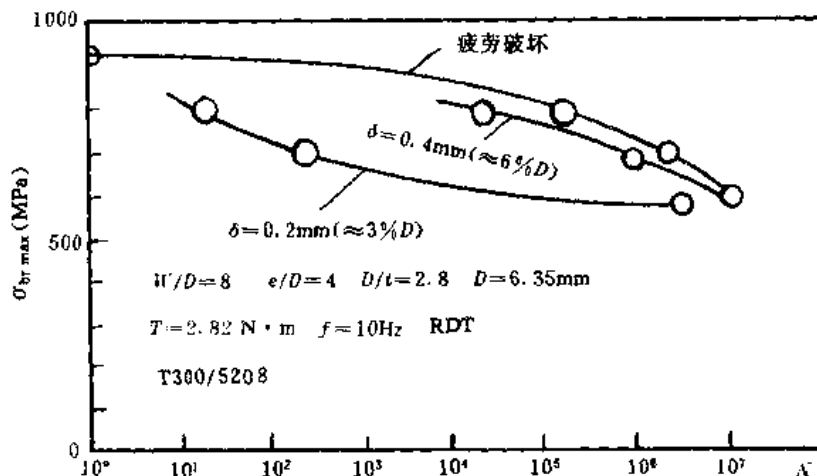


图 7.3 室温自然干态 $S-N$ 曲线^[7-2]

图 7.3 表示拉-拉疲劳($R=0.05$)下,基体主控准各向同性层压板 25/50/25,挤压失效模式占主要地位的试件疲劳性能。

图中给出永久伸长变形 δ 接近 $3\%D$ 、 $6\%D$ 及疲劳破断三条 $S-N$ 曲线。 0° 层等于 25% 的基体主控层压板较早开始孔伸长变形,由 $3\%D$ 伸长到 $6\%D$ 经历了漫长的缓慢增长历程,当伸长变形超过 $6\%D$ 时,离破断就不远了。当 K 值($\sigma_{brmax}/\sigma_{bro}$)降到 0.65 时寿命超过 10^5 周,即为条件疲劳极限。图 7.3 也表明,长寿命区($>10^6$ 周)可能出现伸长曲线与疲劳破断曲线的重

合,即在沒有較大的孔伸長變形時,就發生突然的疲勞破斷。因此,多數情況下可以通過孔伸長變形來檢查連接的損傷程度,但少數情況下也出現沒有明顯伸長變形的其它模式突然破斷。圖 7.4 自然干態及濕態(含濕量 1.8%)試件在室溫水浸中疲勞試驗所得的 $S-N$ 曲線也表現出同樣的規律,只是壽命明顯縮短了,條件疲勞極限大幅度降低了。

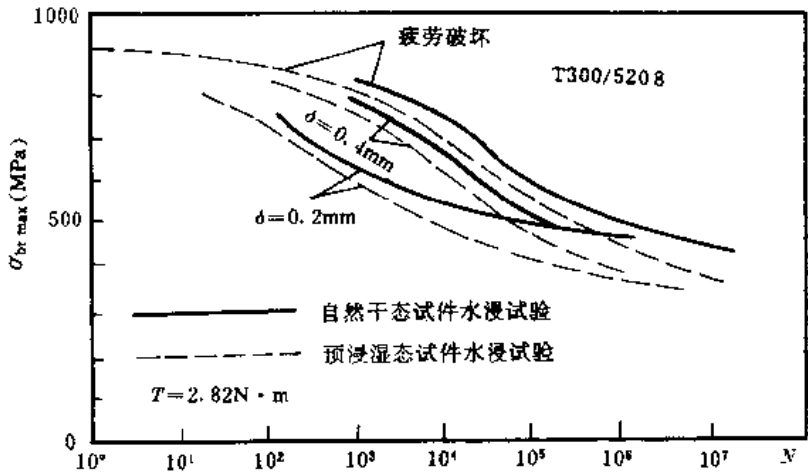


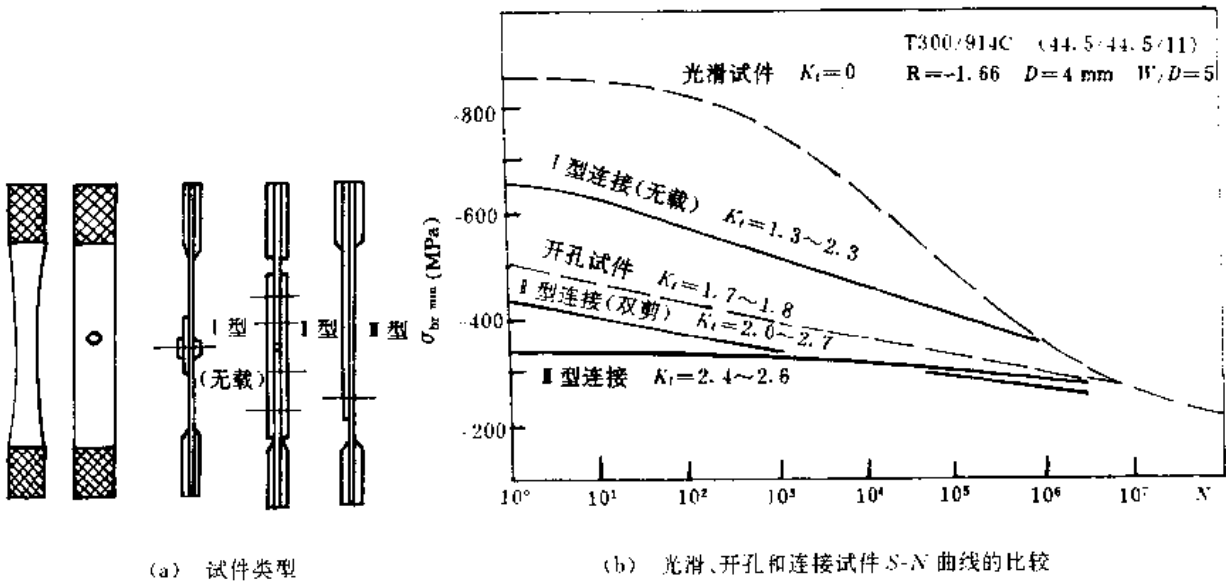
圖 7.4 自然干態及濕態試件水浸疲勞 $S-N$ 曲線^[7-2]

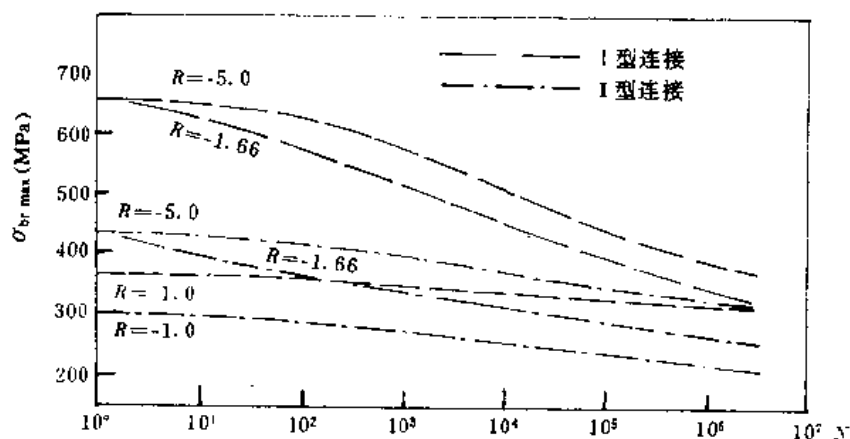
7.3.2 機械連接形式對連接疲勞性能的影響

不同的機械連接形式對疲勞性能有重要的影響,圖 7.5 表示幾種常用螺栓連接的 $S-N$ 曲線,並與光滑及開孔試件的 $S-N$ 曲線相對照。

由圖可見,應力集中愈大,靜強度愈降低,疲勞強度也相應地降低。但應力集中愈大, $S-N$ 曲線愈平,疲勞對應力集中的敏感程度逐漸降低。無載填充孔的疲勞強度高於開孔件,對稱連接的疲勞強度低於開孔件,而不對稱連接的疲勞強度最低。

圖 7.6 表示孔伸長變形隨破斷循環數的百分比的變化。





(c) 不同 R 值的 $S-N$ 曲线

图 7.5 典型机械连接的 $S-N$ 曲线^[2-3]

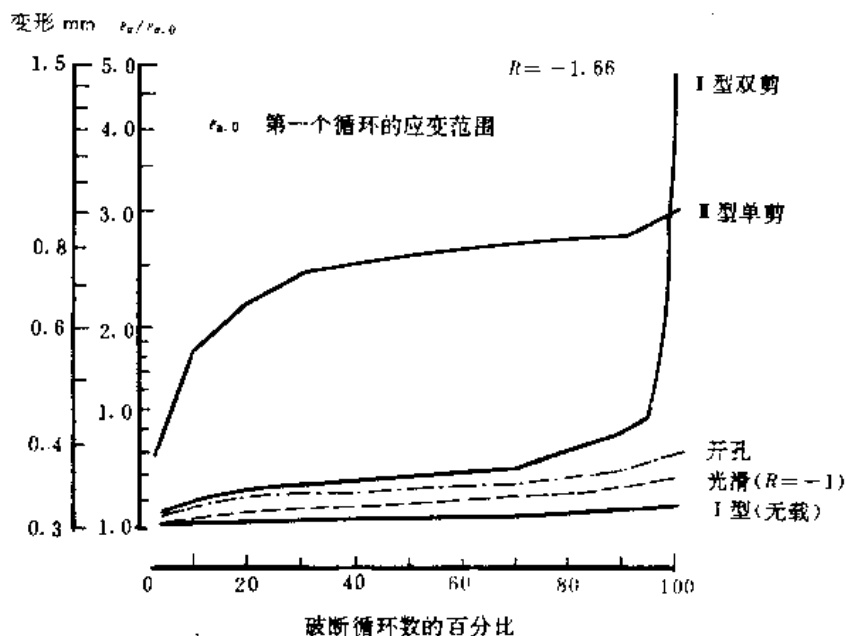


图 7.6 三种螺栓连接的孔疲劳伸长变形^[2-3]

由图可见,对于常用的双剪螺栓连接,在破坏寿命的 95%处,孔变形急剧增大直到破坏;对于带有附加弯曲的单剪连接,开始疲劳到 40%寿命段,孔变形增长较快,而后则较平缓。不对称加载的螺栓倾度变化和孔壁局部高应力使孔伸长迅速提高到最终值的 80%,随着钉孔伸长,钉传载荷减小,孔变形减缓直到破坏,形成与双剪连接十分不同的变形曲线。I 型无载钉孔的变形量很小。

7.3.3 拧紧力矩对疲劳性能的影响

紧固件的拧紧力矩提供了钉孔附近的侧向约束,阻止并延缓了局部开裂和分层,使连接静强度与疲劳强度均有明显的增加,见图 7.7。

拧紧力矩的大小对钉孔伸长有明显的影响。拧紧力矩小时,随着疲劳过程钉孔逐渐伸长:

拧紧力矩过大时,钉孔常常表现出突然伸长的趋势,围绕钉孔的损伤面积较大。

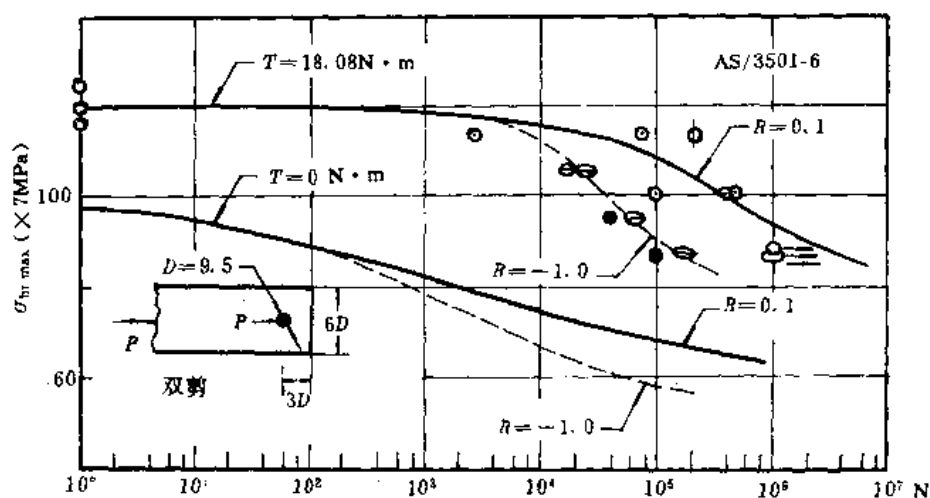


图 7.7 拧紧力矩对连接疲劳性能的影响^[7-4]

对 T300/5208, 铺层比例 25/50/25 的层压板, 厚 2.24mm, 螺栓直径 6.35mm, $W/D=8$, $e/D=4$, 孔间隙不大于 0.15mm 的双剪连接研究拧紧力矩对孔伸长变形的影响^[7-2]。试验了四种典型情况: 即不加垫圈孔侧边有自由间隙的销钉挤压情况; 加垫圈孔侧边有约束但螺母只用手拧住的 $T \approx 0$ 的情况; 一般拧紧力矩 $T=2.82 \text{ N} \cdot \text{m}$ 情况和大拧紧力矩 $T=5.65 \text{ N} \cdot \text{m}$ 情况, 它们取不同的最大疲劳应力, 却刚好都在 2×10^5 加载循环数下破坏。图 7.8 给出了 $\delta-N$ 曲线, 图 7.9 给出了 $S-N$ 曲线。

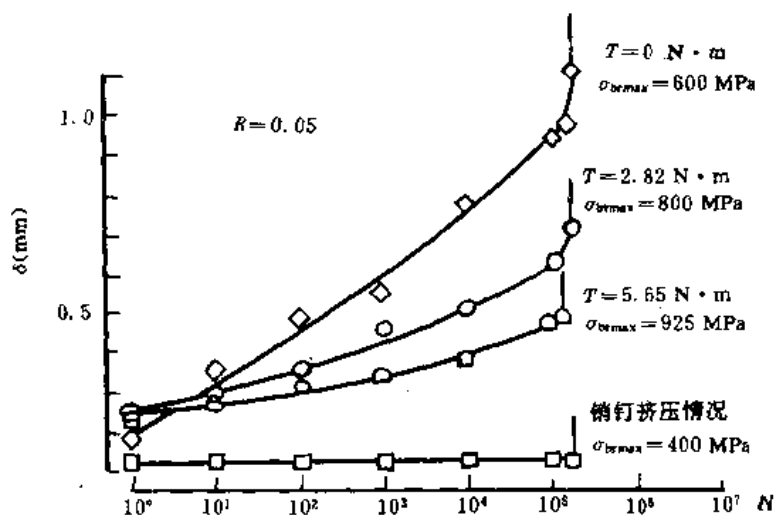


图 7.8 不同拧紧情况下的孔挤压变形-寿命曲线^[7-2]

由图可见, 同样疲劳破坏寿命下, 销钉挤压情况的承载能力最低, 达到 2×10^5 周寿命的疲劳最大挤压应力仅 400MPa, 但破坏前的孔变形量很小, 仅 0.2mm, 相当 3% 直径。 $T \approx 0$ 情况, 侧向支持提高了承载能力, 也使达到 2×10^5 周的最大挤压应力提高到 600MPa, 但孔伸长变形增长最快, 破坏前达 16% 直径, 接近于 1mm。增加拧紧力矩, 提高静强度的同时, 使达到 2×10^5

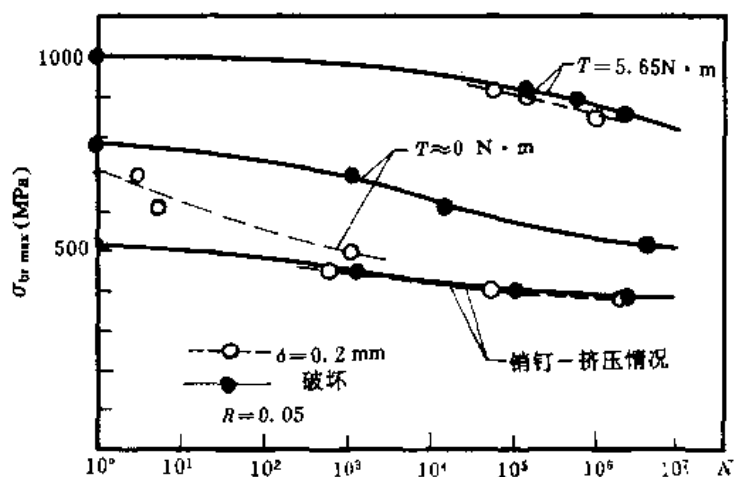


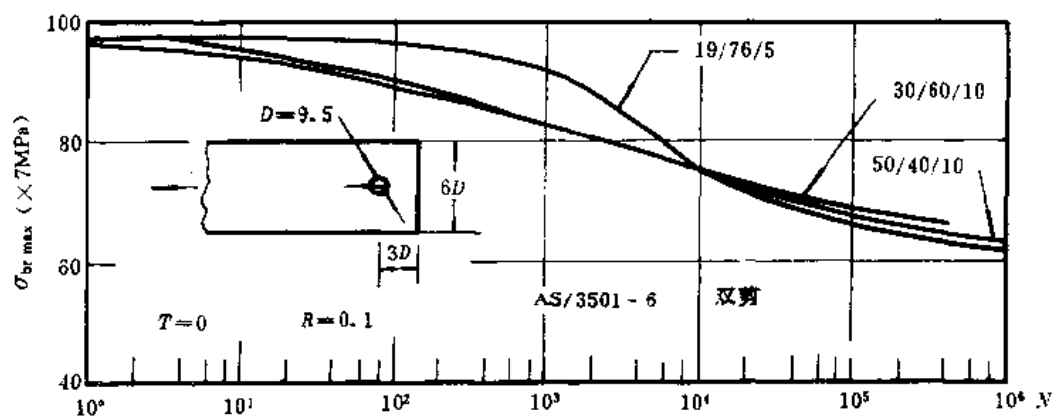
图 7.9 不同拧紧情况下的 S-N 曲线^[7-2]

周的最大挤压应力提高到 800 及 925MPa,而破坏前的孔伸长变形降至 10%和 5%直径。

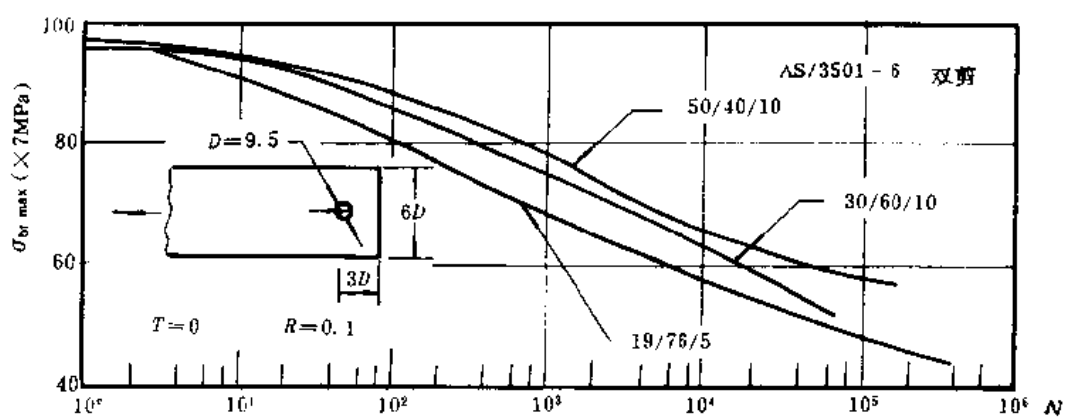
7.3.4 铺层对疲劳性能的影响

图 7.10 比较了三种层压板的螺栓连接疲劳性能。对于拉-拉疲劳,三种层压板的疲劳性能相似;对于拉-压疲劳,0°层比例为 40%以上的纤维主控 50/40/10 层压板的连接疲劳性能最好。

无拧紧力矩下基体主控层压板(19/76/5)与纤维主控层压板(50/40/10),在拉-拉疲劳($R=0.1$)下不同孔伸长变形时的 S-N 曲线,分别见图 7.11 及 7.12。基体主控层压板试件最早发生孔伸长,但累积速率较低。纤维主控层压板起始伸长晚而累积速率高,三条曲线几乎重合。



(a) 应力比 $R=0.1$ 条件下的比较



(b) 应力比 $R=0.1$ 条件下的比较

图 7.10 三种层压板的连接疲劳性能比较 AS/3501-6^{双剪}

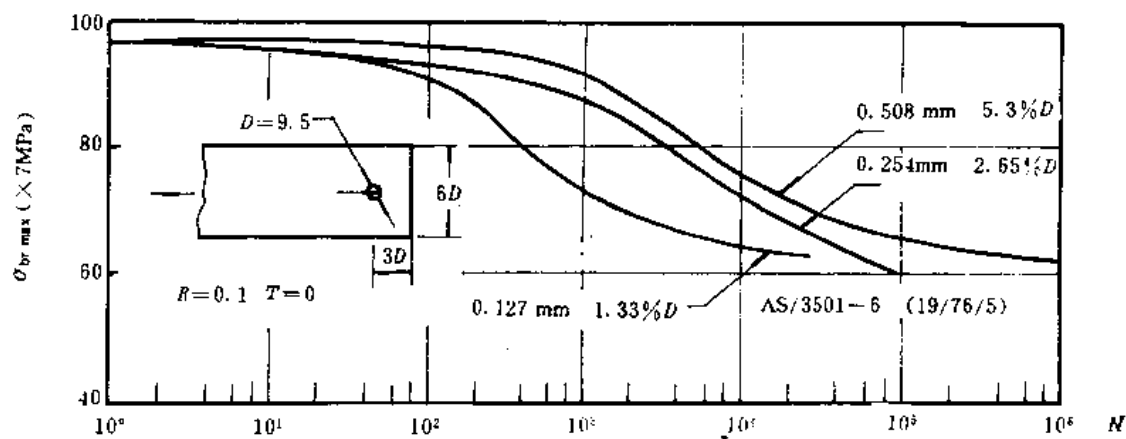


图 7.11 19/76/5 层压板孔伸长与寿命的关系

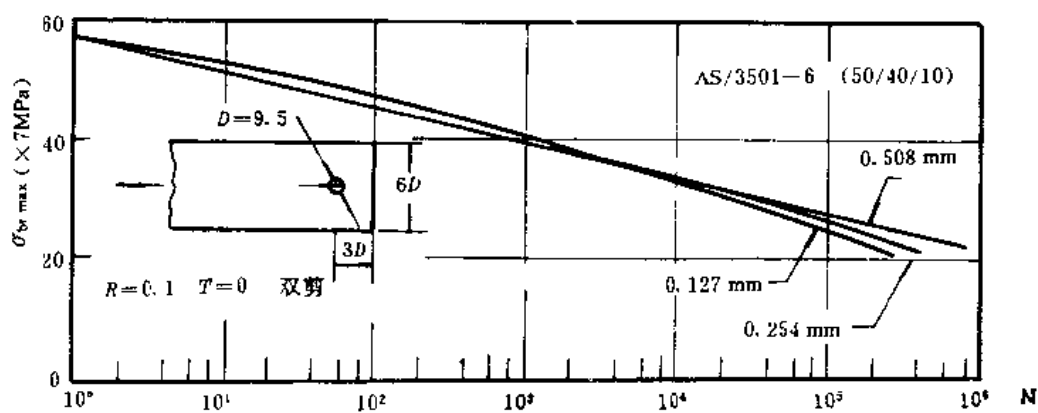
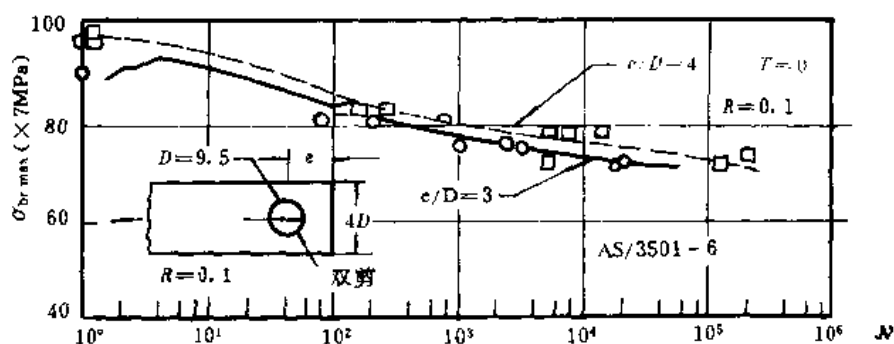


图 7.12 50/40/10 层压板孔伸长与寿命的关系

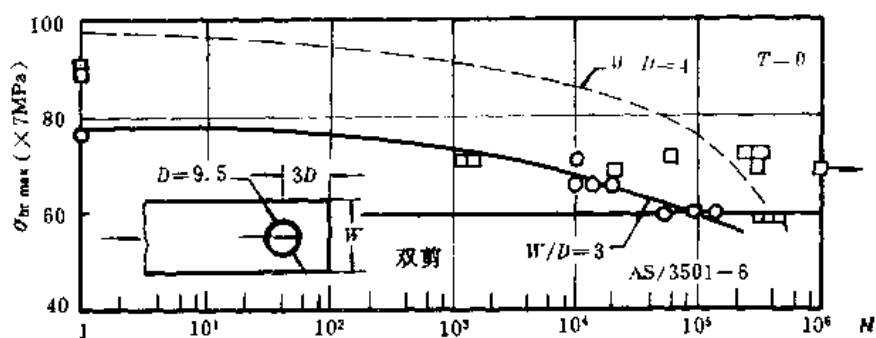
改变层压板铺层顺序,将 $\pm 45^\circ$ 方向层布置在层压板的表面,对疲劳性能的影响不明显。

7.3.5 连接几何尺寸对疲劳性能的影响

图 7.13 给出的疲劳试验结果表明:50/40/10 层压板试件在 $e/D=3\sim 4$ 、 $W/D=3\sim 4$ 范围内,对疲劳性能的影响不明显;19/76/5 层压板试件 $W/D=3$ 和 $W/D=4$ 的 S-N 曲线却有明显的差别, $W/D=4$ 时为挤压型破坏,而 $W/D=3$ 时改为拉伸型破坏。



(a) e/D 对疲劳性能的影响



(b) W/D 对疲劳性能的影响

图 7.13 e/D 及 W/D 对疲劳性能的影响

7.3.6 干涉配合对疲劳性能的影响

图 7.14 给出 AS/3501-6(L4)层压板(50/40/10),单钉双剪连接,不同拧紧力矩下1.34%干涉配合与滑配合的疲劳性能比较。拧紧力矩为零时干涉配合的数据分散度较大。

用 T300/4211 层压板(46/46/8)铺层,单钉双剪连接, $D=5\text{mm}$, $W=30\text{mm}$, $e=20\text{mm}$,名义板厚 3.125mm,拧紧力矩 $3.92\text{N}\cdot\text{m}$,在室温干态情况下,按 $K=0.4$ 进行 $R=-1.0$ 的拉-压疲劳试验,以 $6\%D$ 孔永久变形的对应循环次数作为失效寿命。在相同孔永久变形下,2号干涉配合的寿命 95900 次,大于滑配合的 40100 次。T300/QY8911(25/50/25)层压板的相同连接件,在 $R=0.1$ 的条件下试验,滑配合与干涉配合的疲劳试验数据给在图 7.15 中。

上述结果表明,在适当干涉量与拧紧力矩同时采用的条件下,才有可能提高复合材料机械连接的疲劳寿命。

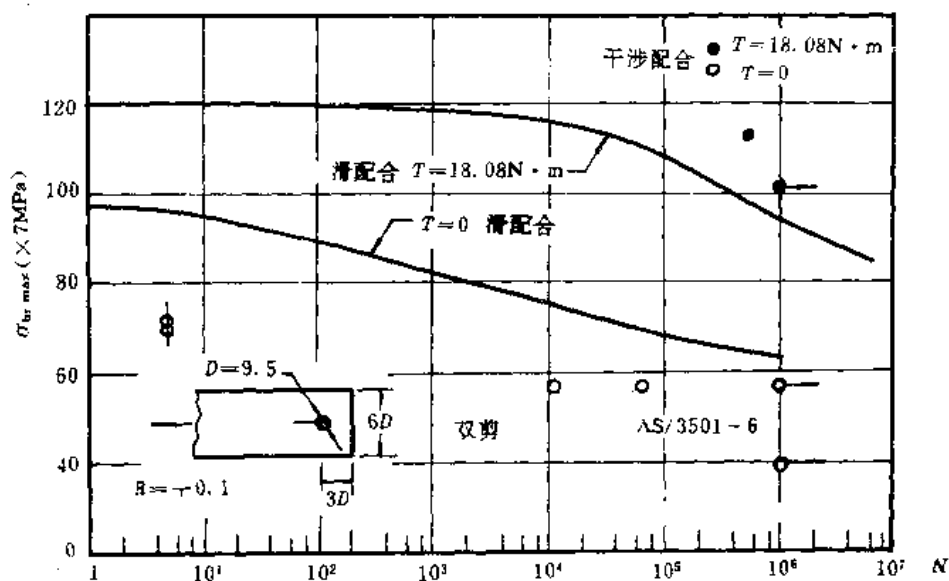


图 7.14 干涉配合对连接拉-拉疲劳性能的影响^[7-4]

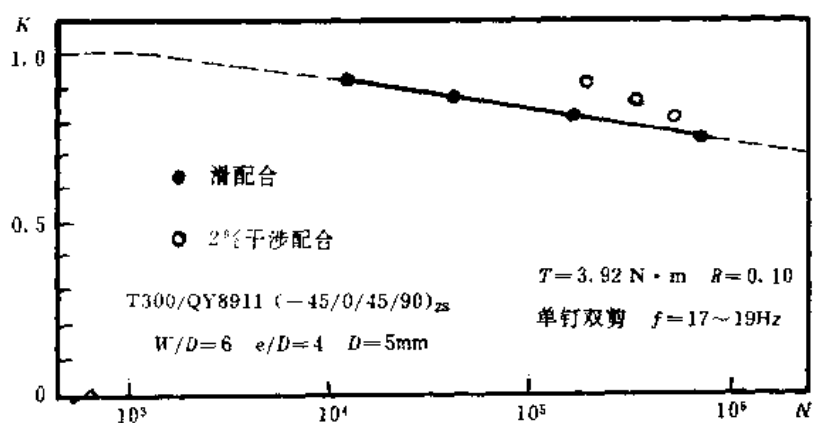


图 7.15 T300/QY8911 螺栓连接滑配合与干涉配合疲劳性能比较^[7-5]

7.4 室温自然干态下机械连接的疲劳

7.4.1 等幅拉-拉疲劳的试验结果

T300/QY8911 层压板, (25/50/25) 铺层, 单螺栓双剪连接, 当 $R=0.1$ 时, 对应孔永久变形 $6\%D$ 的疲劳 $S-N$ 曲线给在前图 7.15 中, 变形 $\delta-N$ 曲线见图 7.16。

T300/4211B4 层压板, (50/40/10), 单钉单剪螺栓连接, 当 $R=0$ 时, 对应孔永久变形 $4\%D$ 的疲劳 $S-N$ 曲线给在图 7.17 中。

试验结果表明, 连接寿命随挤压应力幅值降低而延长, $S-N$ 曲线比金属连接平坦, 表现较好的抗疲劳能力。

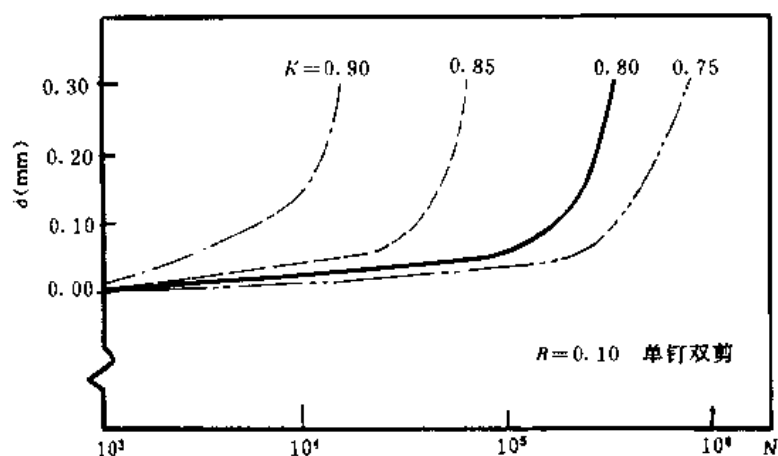


图 7.16 钉孔永久变形 δ - N 曲线^[7-3]

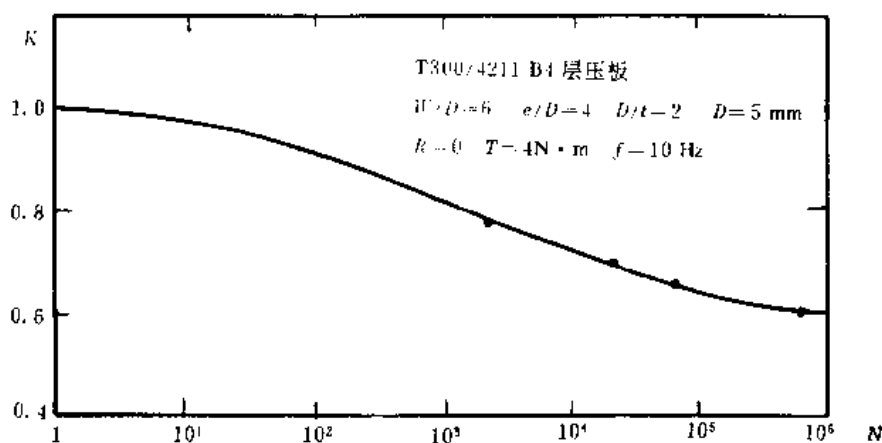


图 7.17 T300/4211 螺栓连接疲劳性能

7.4.2 拉-压对称循环等幅疲劳试验结果

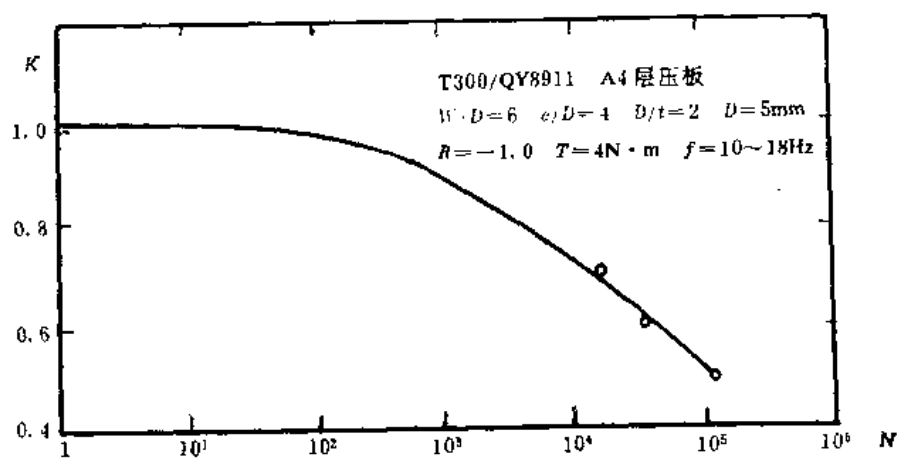
T300/QY8911 层压板 A4 螺栓连接, 在 $R=-1.0$ 时的疲劳性能见图 7.18。

T300/4211(46/46/8) 层压板, 单钉双剪连接, 当 $R=-1.0$ 和 $K=0.4$ 时, 循环次数达 40100 次的对应孔永久变形为 0.11mm, 远小于 5% D (0.25mm)。

T300/4211B4 层压板(50/40/10), 单钉双剪螺栓连接, 经 10^6 周加载, 对应孔伸长变形小于 1% D 的疲劳应力, 对拉-拉疲劳($R=0$)和拉-压疲劳($R=-1.0$), 分别为静挤压强度的 60%和 38%。所以拉-压加载比拉-拉加载产生更大的孔伸长变形。

AS1/3501L4 层压板(50/40/10), 单钉双剪螺栓连接, 在拧紧力矩 11.3N·m 下, 达到 10^6 周不破坏的条件疲劳极限, 对于拉-拉和压-压循环($R \approx 0$), 分别相当于 K 值 0.9 和 0.85。但对于 $R=-1.0$ 的拉-压对称循环, 试件寿命远低于前两种情况, K 值为 0.5 时的疲劳寿命约为

10^5 周。



7.18 T300/QY8911 螺栓连接疲劳性能

7.4.3 机械连接在载荷谱作用下的疲劳

T300/4211 层压板 $[0/90/\pm 45/0_3/90/\pm 45/0_2]_s$ 厚 3.0mm 的铆钉连接, 钛钉直径 D 为 4mm, $e/D=5$, $W/D=9.25$, 在表 7.1 所示的歼击机载荷谱下进行拉-拉疲劳试验, 取 K 值为最大峰值应力与破坏应力之比。试验测得的钉孔变形 $\delta \sim$ 寿命(飞行小时)曲线见图 7.19。湿热条件下孔永久变形明显增大。

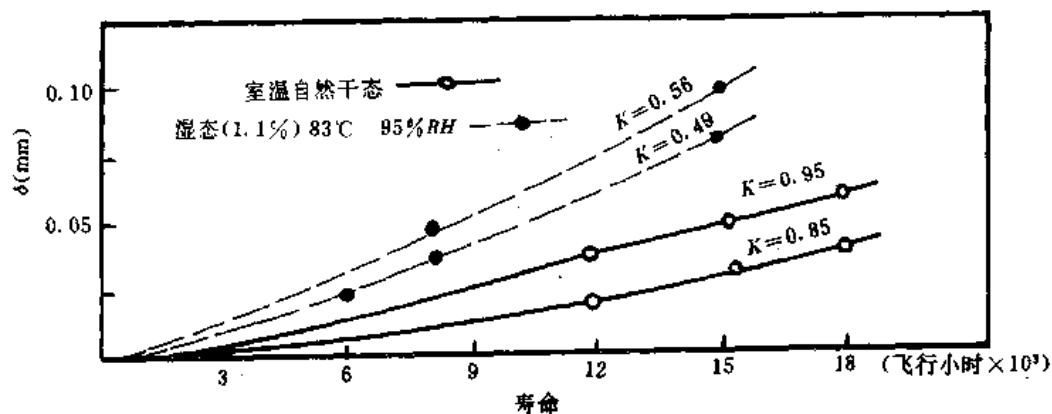


图 7.19 谱载荷下的铆钉孔伸长变形曲线

表 7.1 歼击机 100 飞行小时试验载荷谱

序号	过载(g)	作用频数	序号	过载(g)	作用频数
1	2.7/1.8	466	9	6.1/0.4	12
2	3.7/2.8	77	10	5.3/3.2	6
3	4.7/0.2	44	11	4.9/1.6	107
4	4.7/3.8	15	12	4.3/2.2	74
5	5.5/1.0	76	13	3.9/0.6	223
6	5.9/2.6	12	14	3.3/1.2	435
7	6.5/2.0	5	15	2.3/0.2	336
8	7.1/1.4	1	Σ		1889

试验结果表明:加载频率 10Hz 下, K 值达 1.1, 连接在 12000 飞行小时前破断; 在 5g 以上高载用加载频率 3Hz, 5g 以下载荷用 10Hz 的情况下, K 值 1.0, 连接在 12000 飞行小时左右发生破断; 在 K 值 0.95 条件下 5 个试件经过 12000 飞行小时均未破断。实际飞机铆接连接不可能用到 K 值 0.76 以上, 所以在拉-拉疲劳载荷下复合材料连接的疲劳性能比常用金属连接要优越得多。

由于典型载荷谱中的高载数量不像等幅疲劳试验中的那么多, 所以谱载荷在室温自然干态下造成的孔伸长变形, 在 $K=0.95$ 高值下仍是有限的, 经 18000 飞行小时疲劳, 仅达 1.5% 直径。

T300/5222 盒段壁板试验件, 铺层比例 40/40/20, 薄弱环节为直径 5mm 的双排交错排列螺栓连接, 按表 7.2 的歼击机载荷谱进行疲劳试验^[7-8]。第 1、2 号试件取 K 值 0.712, 经 3.81 及 6 倍寿命期(寿命按 3000 飞行小时)未发生破坏, 后者的最大孔伸长变形达 0.32mm。第 3 号试件增大 K 值到 0.783, 经 12.7 个寿命期, 试件未发生破坏, 但钉孔最大伸长变形达 2.66mm, 已由于变形而失效。同一试件上 K 值相当 0.5 的另一螺栓连接, 经 12.7 寿命期后钉孔未发生伸长变形, 也没有发现任何明显的损伤。

表 7.2 歼击机盒段 312 飞行小时载荷谱

过载 g	7.0	6.4	5.4	4.4	4.2	3.4	2.4
频数	12	30	141	372	171	1515	3930

盒段试验表明:与静拉伸试验边距断裂的模式不同, 谱载荷作用下多由孔挤压变形导致失效, 钉孔永久伸长变形是失效的主要判据; 在 K 值小于 0.5 时, 歼击机典型载荷谱作用下钉孔的永久伸长变形不明显; 当 K 值为 0.67 时, 经谱载荷作用 4 倍寿命期(12000 飞行小时)钉孔永久伸长变形未达到失效限值 5% 孔径; 当 K 值大于 0.7 后需考虑 4 倍寿命期末钉孔超出永久伸长变形限值而失效的可能性; 螺栓排各钉间的载荷分配是不均匀的, 各钉孔的永久伸长变形也是不均匀的, 一般差 2~3 倍, 个别可差 5 倍, 并且随着疲劳过程载荷分配会有所变化; 当 K 值大于 0.5 后, 谱中高载会引起孔边伸长变形和微小的劈裂、分层, 并随加载次数增多而加重。

国外按 F-15 飞机机翼实测载荷谱,经 16000 飞行小时(相当四倍寿命期)不同 K 值的疲劳试验后,钉孔的永久伸长变形见表 7.3 所示,所用试件的材料为 AS/3501-6。

表 7.3 谱载荷疲劳试验后的孔伸长量^[7-10]

铺 层	谱载荷 (飞行小时)	疲劳加载后的孔伸长量 (mm)		
		$K=0.7525$	$K=0.8596$	$K=0.95$
50/40/10	16000	0	0~0.889	0.457~1.47
19/76/05	16000	0	0~0.0254	0.33~0.559

7.5 湿热环境下机械连接的疲劳

1985 年出版的美国军用标准 MIL-A-87221“飞机结构通用规范”^[10-12],对于飞机复合材料结构,要求通过典型结构件试验,验证环境与疲劳间的相互影响。

7.5.1 飞机复合材料结构的含湿量

碳/树脂复合材料内的树脂基体在大气环境温度与湿度作用下具有吸收湿气增加复合材料含湿量的特性。吸湿导致树脂塑性化,降低玻璃态转变温度 T_g 及相应的材料允许使用温度,并影响依赖于树脂基体及纤维-基体交接面的一系列强度、耐久性及损伤抗力。

复合材料的吸湿是一个缓慢的湿度弥散过程,其含湿量为结构重量中所含水分重量的百分比。吸湿的速率受环境温度、相对湿度、不同材料体系、层压板厚度和基体含湿量的影响。经过长期吸湿,复合材料内的水分达到平衡状态,称为饱和含湿量,饱和含湿量主要取决于环境相对湿度和不同的材料体系。

飞机复合材料的含湿量主要取决于飞机场站停放与贮存环境。在阳光照射下,不同结构部位的含湿量有所变动,一般夏季减少,冬季增加,白天减少,夜晚增多。背阴面结构含湿量略高,而且波动要小一些。亚音速飞行中随高度增加,大气相对湿度及温度逐渐降低,吸湿速率降低,甚至变成脱湿过程。超音速飞行导致的高温剖面,使复合材料短时间脱湿,但冷热冲击可能使某些复合材料产生微裂纹,增加随后的含湿量。

含湿量是影响结构力学性能的主要因素。大量试验表明,复合材料强度试验中起主要作用的试验环境并不是相对湿度与温度的组合,而是含湿量与温度的组合。因此,确定预计日历寿命期(一般用 20 年)末的含湿量是重要的。国外在不同地区进行的长期户外暴露试验结果表明^[7-10],2~5mm 双面暴露板的饱和吸湿量,对于常用碳/树脂复合材料约为 0.6~1.2% 范围内。涂漆飞行结构件比不涂漆户外暴露件的吸湿量要低,约为 0.4~1.0% 范围内;厚度 4mm 以下的层压板在双面暴露下,一般 3~5 年达到饱和,8mm 厚板或 4mm 单面暴露板在 20 年寿命期末尚未达到饱和含湿量。试验室强度试验的预浸润板含湿量常为 0.8~1.0%。气候环境统计分析表明,我国主要地区的湿热环境与上述户外暴露环境相近。在缺乏实测数据时,可以参考国外相近环境下的研究结果。

7.5.2 湿热下机械连接的等幅疲劳

研究了 T300/4211 层压板螺栓连接的疲劳 S-N 曲线,连接试件有两种铺层比例,44.5/44.5/11 及 ±45°,在四种环境条件下进行对比试验,结果见图 7.20 及 7.21。这次试验以连接

失去承载能力作为破坏。

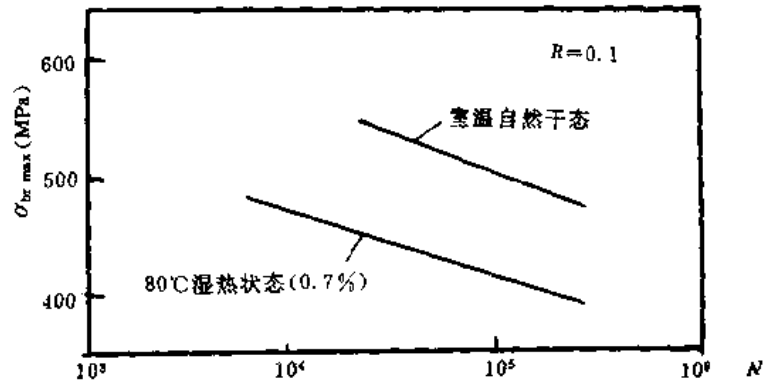


图 7.20 T300/4211 螺栓连接 44.5/44.5/11 的疲劳曲线^[7-10]

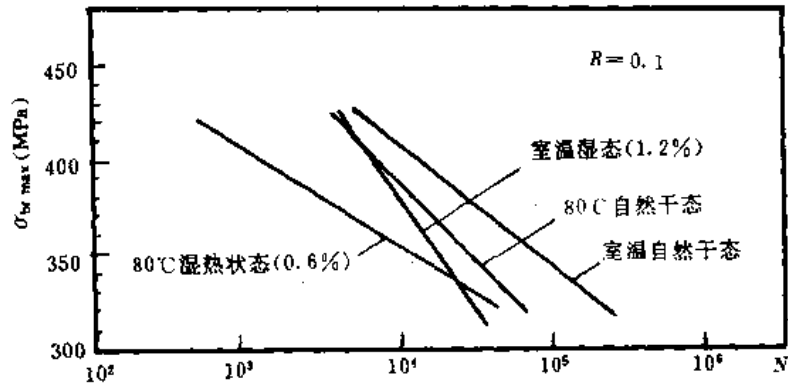


图 7.21 T300/4211 螺栓连接 $[\pm 45^\circ]_s$ 的疲劳曲线^[7-10]

由图可见,吸湿导致疲劳性能下降,而湿热同时作用使疲劳性能降低很多,不同铺层比例的复合材料层压板的螺栓连接具有不同的湿热疲劳曲线,44.5/44.5/11 层压板的连接疲劳性能明显地优于 $[\pm 45^\circ]_s$ 层压板。

曾进行 T300/5208 螺栓连接的水浸疲劳试验,其 S-N 曲线见图 7.22。试验也以失去承载能力作为破坏。水中试验导致疲劳性能降低。

采用 $[0/90/\pm 45/0_3/90/\pm 45/0_2]_s$ 的 T300/4211 厚 3.0mm 的铆钉连接进行拉-拉 ($R=0.06$) 疲劳试验。铆钉直径 4mm, $W/D=9$, $W/D=5$ 。得到图 7.23 的 δ - N 曲线和图 7.24 的 K - N 曲线。

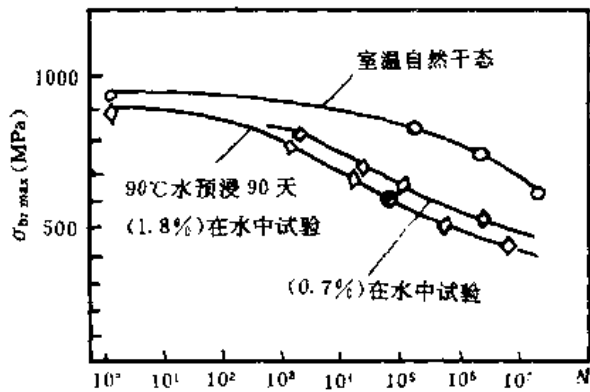


图 7.22 T300/5208 连接水浸疲劳 S-N 曲线^[7-10]

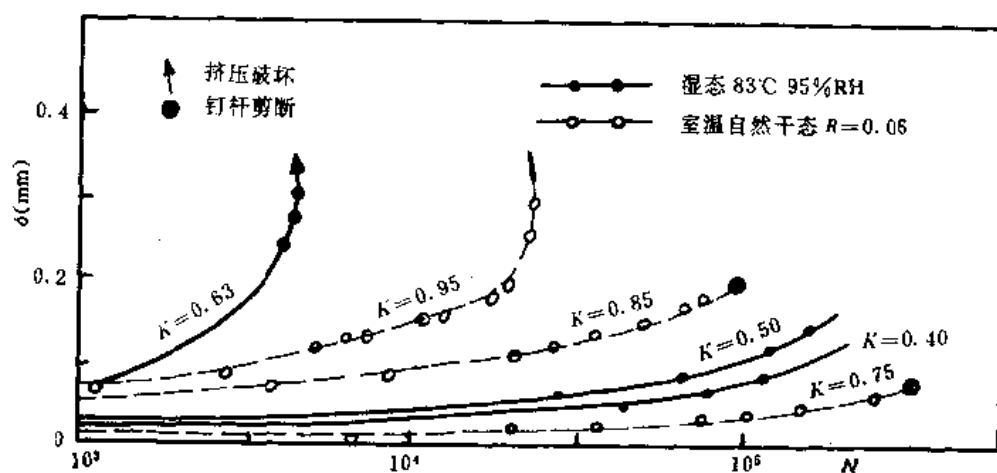


图 7.23 孔伸长变形随循环数增长的曲线

由图可见,湿热环境与疲劳循环的综合作用严重加大孔伸长变形和加速疲劳破断,随着加载循环数的增加,钉孔伸长变形由慢到快逐渐增加,在临破断之前变形急剧增加。室温自然干态的条件疲劳极限约在 $K=0.7$ 的应力水平上,而 83°C 湿态(含湿量 1.1%) $95\%\text{RH}$ 状态的条件疲劳极限不明显,不可能大于 $K=0.5$ 的应力水平。

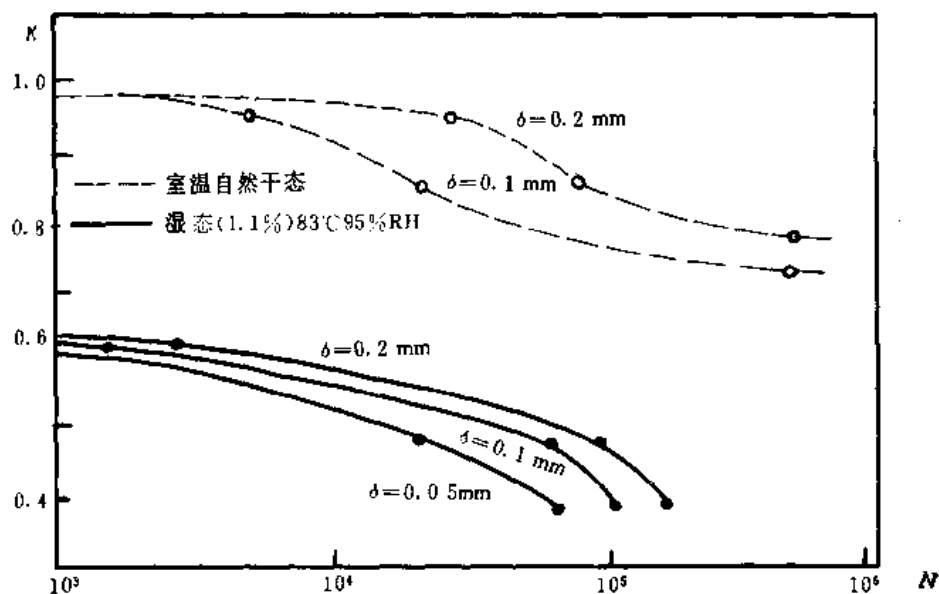


图 7.24 对应不同孔伸长的 $K-N$ 曲线^[7-7]

7.5.3 湿热/温载谱作用下机械连接的疲劳

高速飞机受热结构的连接并不总在恒定湿热条件下工作,实际上在 83°C 、 $95\%\text{RH}$ 下工作的时间并不长。因此设计部门更关心实际湿热/温载谱下机械连接的疲劳寿命。湿热·温载谱是湿热环境谱、飞机载荷谱与高速大 M 数飞行温度谱的组合。对于亚跨音速飞机和低超

音速飞机只需考虑湿热/载荷谱。

湿热环境取决于飞机预期使用地域内平均偏重代表区的地面气象数据。我国长江以南高湿热地区的代表性温湿度为 22℃ 和 82%RH^[7-12]。世界严重湿热地区的平均温湿度为 28~30℃、85%RH。温度谱取决于 M1.6 以上的大 M 数飞行,对歼击机来说一般不超过起落数的 5%。

实际湿热/温载谱是复杂、漫长的,试验中常提高相对湿度到 90~95%,以加速试验进程(见表 7.4)。

表 7.4 高速歼击机壁板试验湿热/温载谱(312 飞行小时)^[7-10]

类型	相对湿度 %	温度 C	过载 g	频次	环境影响系数	破坏载荷 kN	作用载荷 kN	考核螺栓接头相当破坏载荷的 %	次考核螺栓接头相当破坏载荷的 %
亚音速谱	70	室温	7.0	5	1.0	45.08	35.3	78.3	49.6
			6.4	13			32.1	71.2	45.1
			5.4	63			27.2	60.3	38.2
			4.4	164			22.2	49.2	31.2
			4.2	76			21.2	47.0	29.8
			3.4	663			17.1	39.3	24.9
			2.4	1661			12.0	26.6	16.9
	90	60	7.0	7	0.843	38.00	35.3	92.9	58.8
			6.4	17			32.1	84.5	53.5
			5.4	78			27.2	71.6	45.3
			4.4	205			22.2	58.4	37.0
			4.2	95			21.2	55.8	35.3
			3.4	828			17.7	46.6	29.5
			2.4	2077			12.0	31.6	20.0
超音速谱	20	100	5.4	1/4	0.68	30.65	27.2	88.7	56.2
		120	4.4	3	0.60	27.05	22.2	82.1	52.0
			3.4	24			17.7	65.4	41.4
			2.4	126			12.0	44.4	28.1
		150	2.4	66	0.47	27.18	12.0	56.7	35.9

铺层比例 40/40/20 的 T300/5222 盒段壁板试件带有直径 5mm 双排交错排列螺栓连接(同 7.4.3 节),按表 7.4 的湿热/温载谱以最大湿热 K 值 0.929,进行先后两件疲劳试验^[7-8],第一件达到 1.52 寿命期,第二件 2.08 寿命期,均因孔变形过大,加不上载荷而失效。第二件的孔伸长变形达 2.12~3.61mm。与室温载荷谱下第三试件最大孔变形 2.66mm 和 12.7 寿命期相比,湿热/温载谱使孔变形增大约 1mm,且寿命降低 6 倍。但按最大湿热 K 值 0.6 进行湿热/温载谱试验的另一排螺栓连接的所有钉孔均未发生永久伸长变形。试验结果表明,只要恰当地控制应力水平,即使在湿热/温载谱条件下,也能把孔伸长限制在要求的范围内。

7.6 疲劳后机械连接的剩余强度

美国 85 年版军用标准 MIL A-87221“飞机结构通用规范”要求给出湿热与疲劳载荷作用后螺栓连接的剩余强度。为了更好地模拟使用情况,我们在载荷谱及湿热载荷谱下试验测定了连接的剩余强度。

7.6.1 载荷谱作用后机械连接的剩余强度

采用 $[0/90/\pm 45/0_2/90/\pm 45/0_2]_S$ 的 T300/4211 厚 3mm 的铆钉连接以 $K=0.95$ 按表 7.1 冲击机试验载荷谱进行 12000 飞行小时试验后,测试剩余强度见表 7.5,剩余强度略高于原始强度。

表 7.5 载荷谱作用 12000 飞行小时后的剩余强度^[7-13]

试件	静拉伸强度 (kN)	拉伸剩余强度 (kN)	影响率 %	试件	静拉伸强度 (kN)	拉伸剩余强度 (kN)	影响率 (%)
铆接件 A $\delta=3\text{mm}$	12.35	12.96		铆接件 B	5.77	6.51	
	12.21	12.88		接件	6.07	6.02	
	12.53	12.96		件	6.12	6.80	
	11.35			B	5.95		
	11.16			$\delta=3\text{mm}$	6.08		
平均	11.92	12.93	8.5↑	平均	6.00	6.44	7.3▲

国外按 F-15 机翼实测综合载荷谱,截去小于 55%设计限制载荷的小载荷,对 AS/3501-6 复合材料三种铺层比例 50/40/10,30/60/10,19/76/5 的螺栓连接分别用不同的 K 值进行 16000 飞行小时的谱载荷试验后^[7-14],发现剩余强度均大于疲劳试验前的原始强度值。部分试验结果见表 7.6。

表 7.6 连接经历机翼谱载荷后的剩余强度^[7-14]

铺层	谱载荷 (飞行小时)	谱载荷作用后的剩余强度 (kN)			接头静 拉伸强度
		$K=0.7525$	$K=0.8596$	$K\geq 0.95$	
50/40/10	16000	38.61	37.10	39.85	32.16
19/76/5	16000	46.08	50.17	49.82	35.90

7.6.2 湿热/载荷谱作用后机械连接剩余强度

上节 T300/4211 铆接接头在 83℃、95%相对湿度下以 K 为 0.85 及 0.95 的载荷条件下,按表 7.1 的载荷谱进行 12000 飞行小时的疲劳试验后,分别在室温湿态与 83℃、吸湿量 1.1% 的条件下测试拉伸剩余强度,试验结果见表 7.7。这里 K' 为载荷谱最大峰值载荷与 83℃湿态

(1.1%)拉伸破坏载荷之比,而对应的 K 是载荷谱最大峰值载荷与室温自然干态拉伸破坏载荷之比, K' 0.85 及 0.95 对应 K 为 0.56 及 0.66。表 7.7 可见,湿热/载荷谱 12000 飞行小时试验后,连接剩余强度在原强度值左右,没有明显变化。

表 7.7 湿热/载荷谱 12000 小时后的剩余强度

试件	室温湿态 (1.1%) 静拉伸强度 (kN)	室温湿态 (1.1%) 拉伸剩余强度 (kN)	谱影 响率 %	83℃湿态 (1.1%) 静拉伸强度 (kN)	83℃湿态 (1.1%) 拉伸剩余强度 (kN)	谱影 响率 %
铆接 连接 A $K'=0.85$ $\delta=mm$	11.76	11.72		7.39	7.11	
	11.64	11.23		8.32	8.20	
	11.61	10.97		8.00	7.82	
		10.98				
平 均	11.67	11.225	3.8↓	7.90	8.05	1.9▲
铆接 连接 B $K'=0.95$ $\delta=2mm$	6.59	5.65		4.21	4.54	
	6.19	5.90		4.11	4.50	
	6.43	6.25		4.20	4.54	
		6.30			4.53	
平 均	6.33	6.025	4.7↓	4.16	4.53	8.9▲

经高 K 值谱载荷及湿热/载荷谱作用四倍寿命期后,由于应力集中的缓和,复合材料机械连接强度并不明显降低且可能提高,这是不同于金属的一个特性。复合材料连接在疲劳加载的早期钉孔附近就开始出现劈裂与损伤了,谱中的高载对初始损伤起着重要的作用。由于复合材料抵抗损伤的能力比金属强得多,这些损伤的累积并不逐渐降低材料的强度,只是在临破断前少量循环中才急剧地表现出剩余强度的降低,并最后导致破坏。除非对小试件的寿命后期采取细致的跟踪检测措施,一般很难发现剩余强度降低过程而试件就已经破坏了。

7.7 机械连接疲劳失效准则和工程设计建议

7.7.1 疲劳失效准则

合理设计的机械连接要考虑三条疲劳失效准则,在湿热/温载谱作用下:

- a. 钉孔拉伸、剪切或挤压破坏;
- b. 钉孔永久伸长变形超过允许值;
- c. 连接剩余强度低于设计要求值。

三条中任何一条最先达到,连接的寿命就终结。多数情况下往往钉孔永久伸长变形最先达到限值,所以成为很重要的失效准则。

7.7.2 确定钉孔永久伸长变形限值的依据

钉孔永久伸长变形的限值取决于其可能损及结构完整性的后果。按照美国军用标准 MIL-A-87221 的变形规定,“航空器在任何允许的使用和维护中,由温度、载荷及其它因素引起的结构变形不应:

- a. 妨碍或降低航空器的机械操作,或在操纵面与相邻结构之间引起卡死或干扰;
- b. 影响航空器的气动特性,以致不能达到保证的性能或飞行品质要求;
- c. 在任一零件、组件或部件上产生有害的变形、有害的失稳、或者超出屈服点,以致需要随后的维修;
- d. 要求修理或更换任一零件、组件或部件”。

钉孔变形作为结构变形的一种类型必须遵循上述变形规定。也就是要根据连接接头在具体结构部位上变形所引起的危害程度来控制变形的具体量值。例如因气动弹性而对刚度有严格要求的结构,则应严格控制钉孔挤压应力,保证寿命期内湿热/温载谱作用下复合材料的刚度降低和钉孔变形间隙及结构弹性变形和永久变形的总和仍在结构刚度要求的范围内。又如可能导致有害振动、噪声效应、运动机构卡死、受阻、表面不贴合、锁不到位和密封结构漏泄等故障的具体部位,也应按具体情况限制钉孔永久伸长变形。而对于钉孔变形并不引起明显不利后果的结构部位,则可以适当放宽限值。

7.7.3 碳/树脂层压板机械连接的工程设计建议

a. 层压板机械对称连接在一般机动谱及突风谱作用下,如果限制载荷对应的 K 值小于 0.67,则拉-拉和压-压疲劳并不严重,可按静强度准则设计。高速飞机湿热/温载谱和 K 值较高的拉-压疲劳作用下或不对称连接设计必须注意疲劳问题。承受重复量较大、 K 值较高的疲劳载荷的个别连接应考虑疲劳强度。

b. 复合材料主承力结构机械连接经过四倍设计使用寿命期内湿热/温载谱的作用后,钉孔永久伸长变形一般不应超过 5%直径。直径大于 10mm 的螺栓连接,限制孔永久伸长变形不大于 0.5mm。

对于具有专门刚度要求的结构,其机械连接的孔变形限值应根据总刚度要求制订具体的专门规定。对于钉孔伸长变形并不引起不利后果的结构部位,可以适当放宽孔伸长限制。

对于各种形式的不对称连接,要考虑局部弯曲引起的寿命降低,不宜直接用对称双剪连接的孔伸长变形曲线来预估四倍寿命期末的孔伸长变形。

c. 要考虑多钉机械连接在疲劳过程中因钉孔伸长变形的变化而引起的载荷分配的变化。

d. 在当前制造工艺条件下一般不推荐使用干涉配合。

e. 螺栓连接设计中采用中等拧紧力矩,将有助于提高连接的疲劳寿命。考虑到拧紧力矩产生的有利的孔侧压紧,在使用过程中可能松弛,从安全起见,寿命分析中仍应按零拧紧力矩和小拧紧力矩考虑。不宜使用过大的拧紧力矩,避免垫圈与复合材料间磨损加剧,而对疲劳性能产生不利影响。

f. 在分析预估方法尚不成熟的情况下机械连接的寿命主要靠试验研究确定。在全尺寸结构寿命试验中监控钉孔永久伸长变形较为困难,钉孔变形的细致研究与验证,很大程度上要依靠机械连接元件的试验研究。

g. 机械连接疲劳与湿热环境作用后剩余强度不低于原静力强度。疲劳对工艺缺陷、表面与内部分层不敏感,表现出较强的抗损伤扩展能力。疲劳加载下基体主控层压板的高周范围及纤维主控层压板,在发生急剧破坏前,损伤的宏观标志不明显,为使用中提前检测损伤、防止破坏造成了困难,应加以注意。

参 考 文 献

- [7-1] 蔡为伦著,陈绍杰等译. 复合材料设计. 沈阳飞机研究所, 1988
- [7-2] Crew Jr J H. Bolt-Bearing fatigue of a Graphite/Epoxy Laminate. In: ASTM STP 749, 1981
- [7-3] Schütz D, Cerharz J J, Alschweig E. Fatigue Properties of Unnotched, Notched and Joint Specimens of a Graphitel Epoxy Composite. In: ASTM STP 723, 1979
- [7-4] Garbo S P, Ogorowski J M. Effect of Variances and Manufacturing Tolerances on the Design Strength and Life of Mechanically Fastened Composite Joints. AFWAL-TR-81-3041 VOL. 1-2
- [7-5] 刘萍、张开达. 干涉对复合材料叠层板螺栓连接强度的影响. 航空学报, 1991, 12(12): 545~548
- [7-6] 谢鸣九、朱立平. 复合材料挤压疲劳强度. 飞机强度研究所, Q/12S-8901-05, 1989
- [7-7] 俞树奎、张懿、胡杰. 上舱口盖复合材料元件湿热下静力与疲劳试验研究. 飞机强度研究所, 1992. 6
- [7-8] 俞树奎、和润忠、郑锡涛. 湿热环境下碳/树脂复合材料结构强度与寿命的研究. 飞机强度研究所, 1992. 7
- [7-9] 马保林等译. 飞机结构通用规范 MIL-A-87221. 航空工业部飞机强度规范编写办公室, 1987. 10
- [7-10] Dexter H B. Long-term Environmental Effects and Flight Service Evaluation of Composite Materials. NASE TM 89057 1987. 1
- [7-11] 和润忠. 湿热环境对碳纤维复合材料连接件拉伸疲劳性能的影响. 飞机强度研究所, 1989
- [7-12] 安顺清、吴其匡等. 中国十一城市低空气温、相对湿度资料. 北京: 气象出版社

第八章 胶铆(螺)混合连接

8.1 概述

采用胶铆(螺)混合连接的目的一般是出于破损-安全的考虑,想要得到比只有机械连接或只有胶接时更好的连接安全性和完整性,但是要根据具体情况应用得当,设计合理,否则将得不偿失。

混合连接可以兼有机械连接和胶接之所长,存在互补的可能性,也可以兼有两者之所短。在胶接连接中采用紧固件加强,一方面可以阻止或延缓胶层损伤的发展,提高抗剥离、抗冲击、抗疲劳和抗蠕变等性能;另一方面也有孔应力集中带来的不利影响,且增加了重量和成本。胶接和机械连接的应力集中不在同一部位,胶接连接的应力集中发生在被胶接件端部的胶层和附近的复合材料,机械连接的应力集中发生在孔附近。采用混合连接,一方面使被胶接件端部局部应力集中得到缓和,同时又产生新的应力集中源。采用混合连接是比较复杂的问题,主要与胶粘剂和被胶接件的强度有关,与紧固件的数量、大小和位置等也有关系。可以分为以下三种情况:

a. 薄板情况:如果胶层强度高于被胶接件的强度,破坏发生在胶接区域之外,那么在胶接区域设置紧固件是不起任何作用的,此时不需要附加紧固件来提供破损-安全的传载路线,只需采用胶接连接。如果纯胶接连接的破坏形式为层压板的层间破坏,采用适当的机械连接作为补充,将会是有益的。

b. 厚板情况:由于要求传递载荷大,胶层成为薄弱环节。胶接传递的载荷很有限,何况在胶层失效后,最终还得靠机械连接承担全部载荷。因此对于厚板情况只需采用机械连接,而无需再用胶接。

c. 中等厚度板情况:要求传递载荷适中,可望通过混合连接提高连接强度。胶接连接是一种连续的连接,而对于通常采用滑配合的机械连接总是有间隙的,故一般认为,在胶层完好时,紧固件基本上是不受力的,一直到胶层发生损伤引起载荷的重新分配,损伤区域的紧固件才参与受载。在这种情况下,机械连接阻止了初始损伤的扩展,这种损伤如不得到抑制,将迅速扩展导致灾难性破坏,也就是说机械连接起了破损-安全传载路线的作用。

设计混合连接时应注意到:

- 选用韧性胶粘剂,尽量使胶接的变形与机械连接的变形相协调。通常机械连接的变形总是大于胶接的变形(指面内变形),要满足这一要求是相当困难的。

- 机械紧固件与孔的配合要很精密。如果胶层很脆,且紧固件与孔的配合又不够精密,那么连接试件的剪切变形就较大,将先引起胶层的剪切破坏,继而引起紧固件的剪切破坏或孔的挤压破坏,达不到预期的效果。

8.2 胶铆(螺)混合连接强度

表 8.1 给出了国外碳纤维环氧树脂复合材料胶螺混合连接和螺栓连接的试验结果,从表中可知在大多数情况下,胶螺混合连接强度显著高于螺栓连接强度。

表 8.1 国外碳纤维/环氧树脂复合材料胶螺连接强度

层压板层数 (0/±45/90)	层 压 板		加 载 板		螺栓直径 (mm)	破坏载荷 (kN)	
	宽度 w_1 (mm)	厚度 t_1 (mm)	宽度 w_2 (mm)	厚度 t_2 (mm)		胶 螺	螺 接
0/16/0	47.75	2.65	38.10	2.03	7.94	25.776	24.464
0/16/0	31.75	2.64	38.10	20.3	7.94	20.029	17.484
4/12/0	47.75	2.63	38.10	2.03	7.94	46.393	28.067
4/12/0	31.75	2.63	38.10	2.03	7.94	30.802	18.574
6/8/0	50.80	2.27	50.80	2.03	7.94	46.370	24.798
6/8/0	25.40	2.36	50.80	2.03	6.35	26.132	14.056
10/4/0	50.80	2.34	50.80	2.03	6.35	52.042	20.584
10/4/0	25.40	2.31	50.80	2.03	6.35	31.581	16.602

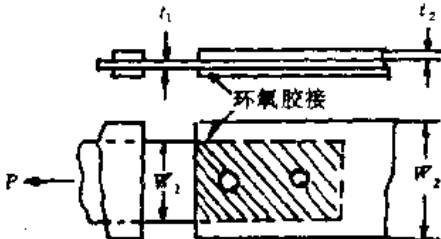


表 8.2 列出了国产 T300/HD58(中温固化环氧树脂材料)胶铆混合连接和胶接连接的破坏载荷。铺层为 $[45/0/-45/0/90/0/45/0]_s$,采用美国生产的 REDUX312L 胶和 CSR903B5-6 钛铌铆钉,铆钉直径 5mm。试件形状见图 8.1 和图 8.2。同样试件形状的纯铆钉连接试件的强度见表 6.5。

表 8.2 T300/HD58 环氧树脂材料胶铆连接强

试件名称	破坏载荷 (kN)	
	胶 铆	胶 接
I 型	19.17	20.16
II 型	36.13	31.24

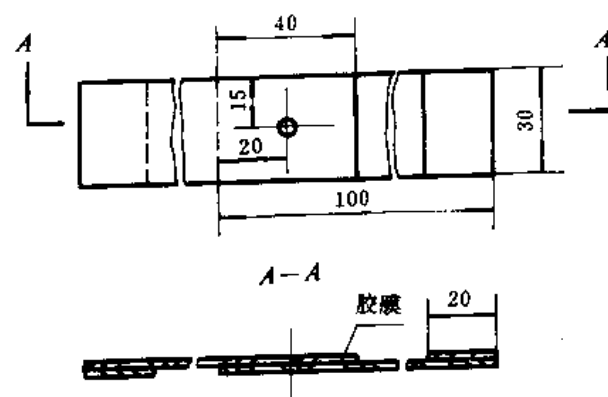


图 8.1 I 型试件

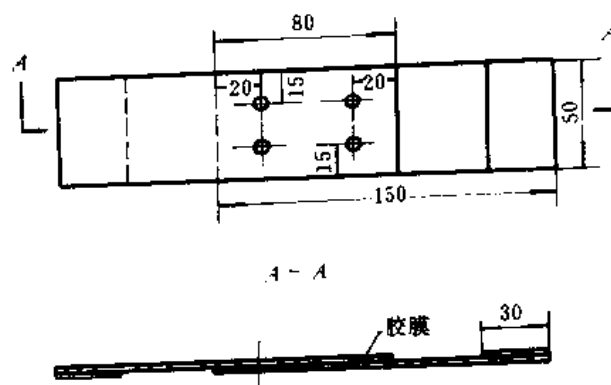


图 8.2 II 型试件

参 考 文 献

- [8-1] Hart, Smith L J. Design Methodology for Bonded-Bolted Composites. AD A117342. 1982 ,
- [8-2] 谢鸣九, 窦润龙, 王少妮. 复合材料混合连接. 飞机强度研究所, Q/12S-9001-41, 1994

第九章 特殊连接

本章介绍复合材料夹层板和层压板结构的特殊连接方式和特殊紧固件,包括镶嵌件、尼龙铆钉、弹簧夹式游动自锁螺母和快卸承力锁等的连接,并对带安装片的盲孔螺母设计作了具体介绍。

9.1 夹层板结构的特殊连接

夹层板结构通常是由薄面板和软夹芯组成的,由于抗弯刚度质量比高,在航空结构中得到广泛应用。但要传递集中载荷是很困难的。由于设计需要,传递集中载荷又是不可避免的,为提高夹层板结构局部的抗挤压和抗拉脱能力,通常采用各种形式的镶嵌件进行局部加强。本节将给出各种局部加强方法和镶嵌件连接的形式以供选用。

9.1.1 镶嵌件连接形式及示例

按照镶嵌件在夹层结构中的固定方法,镶嵌件可分三种类型:

A 型:镶嵌件与夹层结构共固化,称为前置式;

B 型:在已压制好的夹层结构上制孔,将镶嵌件放入后用充填胶固定,称为后置式;

C 型:用机械夹持或带有螺纹的衬套拧入已生产好的夹层结构中。

类型 A 和 B 用得广,尤其类型 B 当需要增加连接部位时特别方便,很适合改装设计。而类型 C 因不与芯子直接胶接,承载能力低,应用受到限制。这三种类型的镶嵌实例详见本节以下各表。

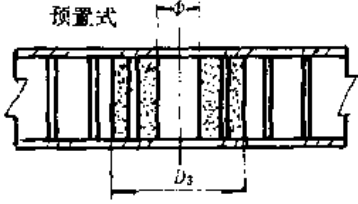
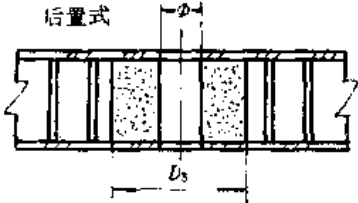
按照形状划分,镶嵌件主要包括充填混合物、镶嵌垫块、镶嵌杯形件及碗形件、镶嵌衬套、镶嵌螺母和一些特殊用途的镶嵌件。对用于碳纤维面板的镶嵌件,为防电偶腐蚀,材料宜选用钛合金或不锈钢。

鉴于目前国内各种镶嵌件尚未标准化、系列化,为适应复合材料连接设计的需要,本节给出工程应用中各种镶嵌件的实例和镶嵌方式。实际应用应根据具体承载大小和使用要求选择相应参数。

9.1.1.1 充填混合物

对承载不大的连接部位,直接在其周围充填强度与之相适应的混合物,又称充填胶、混合胶、填充料等。这种方法工艺实施简单,只是孔的挤压强度受到充填胶的限制,一般只用于受载不大的部位。充填形式见表 9.1,充填胶的选取见 9.1.3.3 节。

表 9.1 局部充填胶加强

名 称	镶 嵌 形 式	说 明
夹芯连续型		(1) 在局部蜂窝中充填胶,夹芯连续、协调性好; (2) D_3 尺寸按 9.1.3 节的要求确定; (3) 允许按需要镗成杯形或碗形沉头窝进行连接
夹芯间断型		(1) 局部蜂窝切除后充填胶、夹芯间断,强度和刚度不如夹芯连续型好; (2) D_3 尺寸按 9.1.3 节的要求确定; (3) 允许按需要镗成杯形或碗形沉头窝进行连接

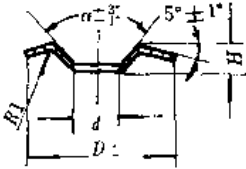
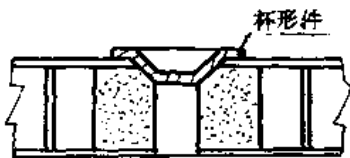
9.1.1.2 镶嵌杯形件、碗形件

为了提高局部承载能力,在充填胶固化之后可镶嵌杯形件或碗形件,以利于载荷的扩散,改善受力状态,防止孔边面板铺层的损伤或开胶。

a. 镶嵌杯形件

杯形件用于安装沉头螺栓,改善气动外形,适合机体外表面使用。表 9.2 提供了几种规格的杯形件尺寸。

表 9.2 镶嵌杯形件

零件图示	镶嵌形式																
杯形件尺寸: 材料 1Cr18Ni9Ti, 80.3 钝化处理 																	
<table><tr><th>螺栓直径</th><th>$D \pm 0.5$</th><th>$d \pm 0.1$</th><th>H</th></tr><tr><td>4</td><td>14</td><td>4.1</td><td>1.8</td></tr><tr><td>5</td><td>16</td><td>5.1</td><td>2.2</td></tr><tr><td>6</td><td>18</td><td>6.1</td><td>2.7</td></tr></table> α 角按需取 90°, 100° 和 120°; 表中 H 值对应 $\alpha=100^\circ$;	螺栓直径	$D \pm 0.5$	$d \pm 0.1$	H	4	14	4.1	1.8	5	16	5.1	2.2	6	18	6.1	2.7	
螺栓直径	$D \pm 0.5$	$d \pm 0.1$	H														
4	14	4.1	1.8														
5	16	5.1	2.2														
6	18	6.1	2.7														

b. 镶嵌碗形件

碗形件用于安装承受拉力较大的六角头螺栓,防止螺栓头露出夹层板平面,在座舱地板上用得较多。

碗形件有冲压的和机加的两种,镶嵌形式在表 9.3 中给出,冲压碗形件和机加碗形件的几

何尺寸分别在表 9.4 和 9.5 中给出。

表 9.3 镶嵌碗形件

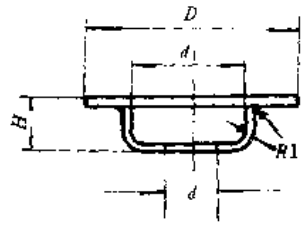
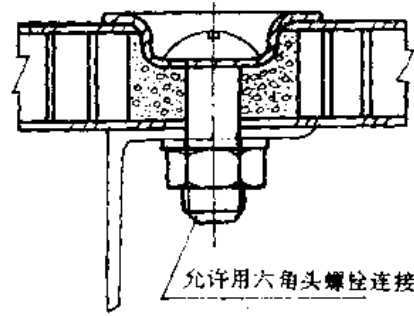
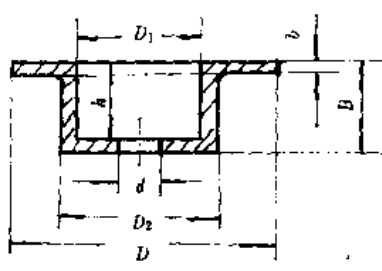
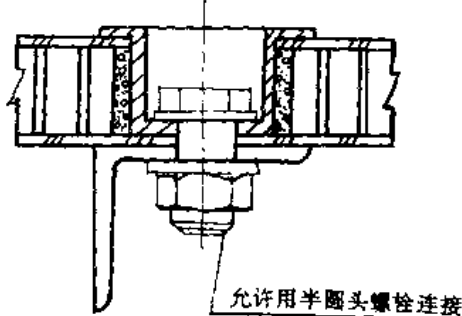
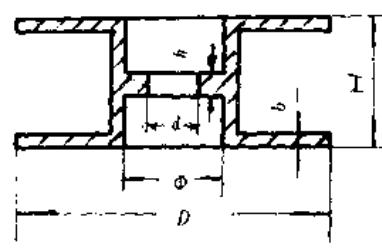
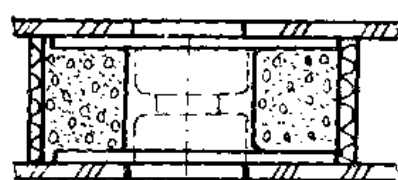
名 称	零件图示	镶 嵌 形 式
冲 压 碗 形 件		
机 加 碗 形 件		
特 殊 碗 形 件		

表 9.4 冲压碗形件参数

螺栓直径	d	d_1	D	H
5	5.2	14	20	4.2
6	6.2	17	26	5
8	8.2	21	33	6

表 9.5 机加碗形件参数

d	3	4	5	6	8	10	12	14	16
D_1	6	9	11.4	14	16	20	24	30	34
D_2	7.6	10.6	13	16	18	22	26.4	32.4	36.4
D	12	16	20	24	26	30	36	42	46
b	0.8	0.8	0.8	1	1	1	1.2	1.2	1.2
B	4	5	5	6	6	6	7	7	7

表 9.3 给出的机加特殊碗形件是由两个碗形件对称组合而成的,用于特殊需要的部位。当用在载荷较小的场合时,允许用两个冲压碗形件背靠背胶合起来。

从减轻重量的角度出发,碗形件应尽量设计得深一些,以减少充填胶的用量,若碗底能和面板胶接,如表 9.3 中机加碗形件那样,可提高承剪能力。为提高抗拉强度,碗底可酌情增厚。

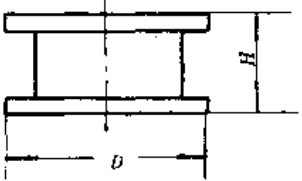
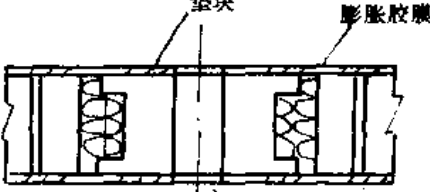
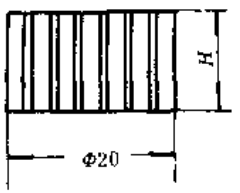
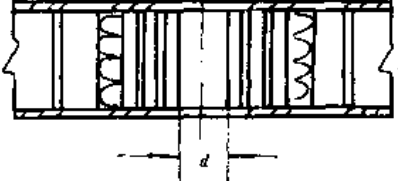
碗形件材料一般选用 TC4 或 ICr18Ni9Ti。

9.1.1.3 镶嵌垫块

镶嵌垫块主要是为了提高夹层板的局部承压能力。垫块有金属、非金属、高密度蜂窝等材料制成。高密度蜂窝块由铝箔、钛箔或不锈钢蜂窝等制成,其特点是质量小,刚度大,但工艺复杂,成本高。高密度铝箔蜂窝块(880Kg/m³)的挤压强度达 109MPa。非金属块包括层压板、硬质泡沫塑料等,层压板的特点是强度、刚度高,质量大,硬质泡沫塑料的特点与之相反。金属垫块一般用铝制造,连接区质量容易保证,但夹芯高度与镶嵌垫块高度较难协调。

镶嵌垫块一般采用预置式,为减轻重量和提高胶接强度,对面积较大的实心垫块可升减轻孔,如表 9.6 所示。对于未钻孔无定位器的垫块,其直径应稍大些,以便考虑孔中心的偏移,一般允许偏 3~6mm。

表 9.6 镶嵌垫块

名 称	零件图示	镶嵌形式
垫 块		
高 密 度 蜂 窝 块	 $H=8,10,12,13,8,15,19,2,30$ 按需取。	 一般 $d \geq$

9.1.1.4 镶嵌衬套

镶嵌衬套主要用来提高挤压强度,拉脱强度也有提高。常用镶嵌衬套有单管衬套、沉头衬套、凹窝衬套、双凸缘衬套等,见表 9.7。

单管式衬套制造最简单,可提高孔的挤压强度,适合于受剪切载荷的场合,但承受拉压载荷不利,故使用受到限制。

沉头衬套适于承受较大剪切载荷的沉头螺栓连接,也可用于为保持外表面平滑、受拉伸载荷连接。

凹窝衬套适于为保持工作面平滑,需用六角头或半圆头螺栓连接,承受较大拉伸载荷的场合,如地板的固定。

双凸缘衬套有两种,一种是后置式,上凸缘有两个分别供注胶和排气用的通孔;另一种是预置式,上凸缘设有两个小孔,其几何尺寸在表 9.8 中给出。

表 9.7 镶嵌衬套

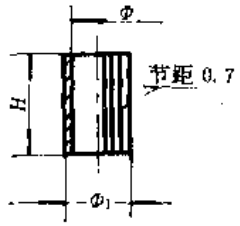
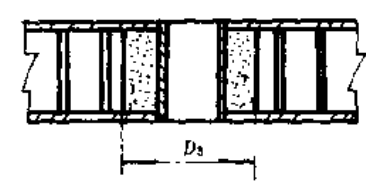
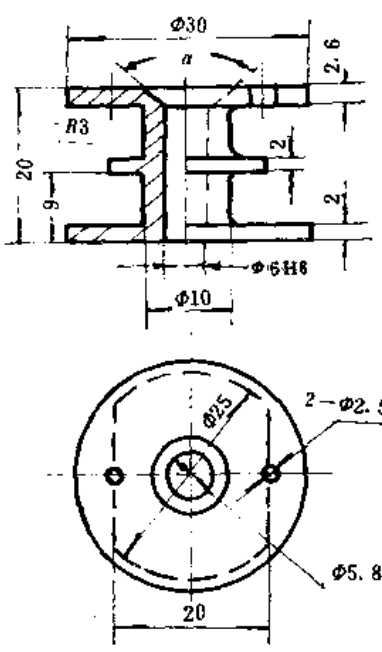
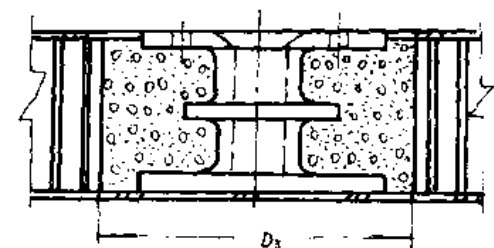
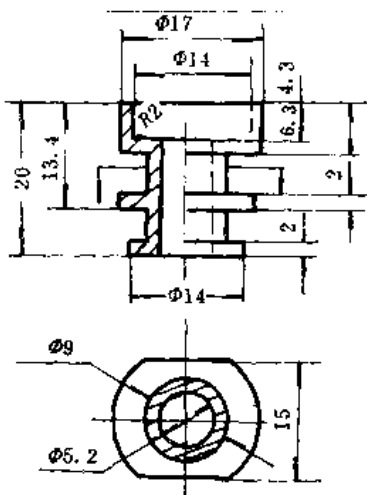
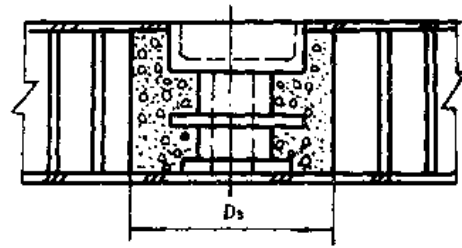
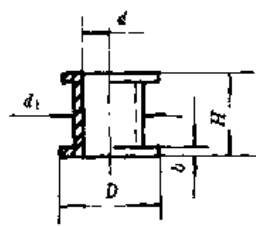
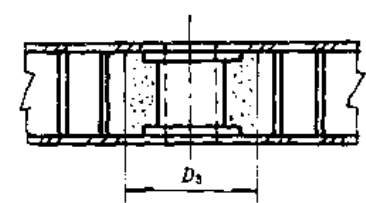
名 称	零件图示	镶嵌形式
单管衬套		
沉头衬套		
凹窝衬套		
双凸缘衬套		

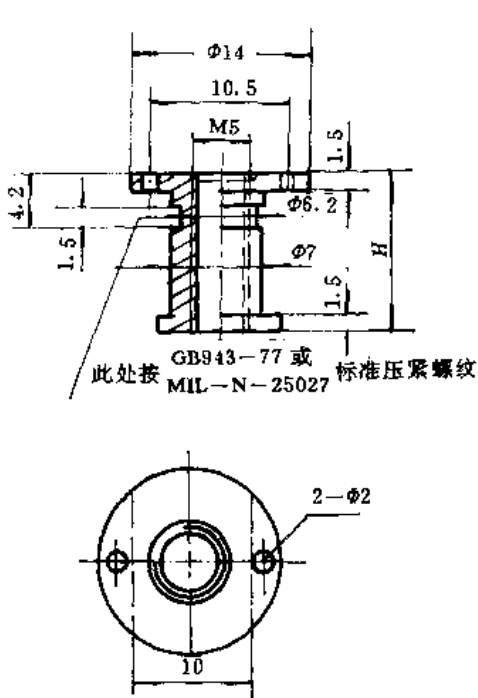
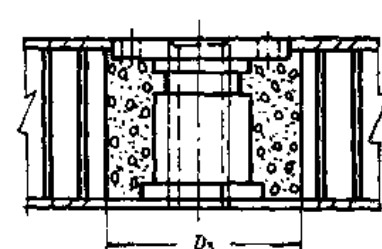
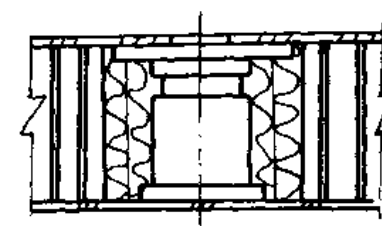
表 9.8 镶嵌双凸缘衬套参数

d	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
d_1	4	5	7	8	10	12	14.4	16.4	18.4	20.4	23	25	27
b	0.5	0.5	1	1	1	1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.5	1.5	1.5
H	3~15												
D	6	7	9	12	14	16	20	22	24	26	30	32	34

9.1.1.5 镶嵌螺母

镶嵌螺母不仅具有较高的抗挤压和抗拉脱能力,且有自锁功能,使用中起托板螺母的作用,固定可靠,使用方便。用于夹层结构的镶嵌螺母有通孔型和盲孔型两种。通孔型螺母中有双凸缘的和带大底盘的。盲孔型螺母规格多且应用广,故在 9.1.2 节详细介绍其设计和分析。各种镶嵌螺母的形状和镶嵌形式在表 9.9 中给出。

表 9.9 镶嵌螺母

名 称	零件图示	镶 嵌 形 式
通孔螺母	 此处按 GB943-77 或 MIL-N-25027 标准压紧螺纹 注:尺寸 H 由夹层板厚度选定。	I 型:用充填胶镶嵌  II 型:用膨胀胶膜镶嵌 

9.1.1.6 镶嵌凸桩、螺栓等

为了固定设备,常在夹层板内镶嵌凸桩、凹窝、螺栓或带凸缘螺栓等,其镶嵌形式见表 9.10。

表 9.10 镶嵌凸桩、螺栓等

名 称	零件图示	镶 嵌 形 式
凸 桩		
凹 窝		
螺 桩		

表 9.10(续)

名 称	零件图示	镶嵌形式
有凸缘螺栓		

9.1.1.7 特殊用途的镶嵌件

为了某种需求或传递大载荷需要设计特殊的镶嵌件,如系留环、座椅固定接头等,其形式繁多。表 9.11 示出一种带大底盘的货物系留环,镶嵌在 19mm 厚铝蜂窝、面板为 0.4mm 铝板的夹层板上,能承受使用载荷达 14kN。

表 9.11 特殊镶嵌件示例

名 称	零件图示	镶嵌形式
系留装置		

表 9.11(续)

名 称	零件图示	镶 嵌 形 式
座椅固定接头	注:1.一般 $R=2$; 2.仅示出座椅嵌入件,座椅接头和固定螺母未示出	
带螺栓的镶嵌件	注:螺纹连管螺栓未示出	

9.1.1.8 机械夹持镶嵌

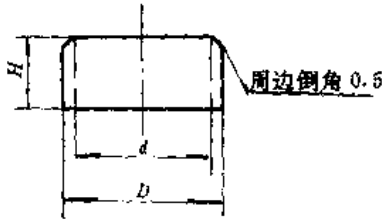
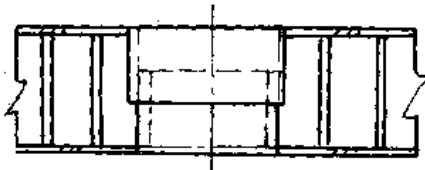
在夹层板上制孔,直接插入衬套或带螺纹的衬套,因未用充填胶与芯子胶接,故拉脱强度较低,用得较少。一般只用于导线、导管通过孔的加强。

衬套形式有单管式、带凸缘的,或上、下衬套配合用螺纹连接的,镶嵌形式见表 9.12。

表 9.12 机械夹持镶嵌

名 称	零件图示	镶 嵌 形 式
凸缘衬套		

表 9.12(续)

名 称	零件图示	镶嵌形式
单管衬套		

9.1.2 带安装片的盲孔自锁螺母的分析和设计

带内螺纹自锁盲孔螺母是用于夹层结构的典型镶嵌件,它类同于常规结构用的自锁托板螺母,使用方便,连接可靠。

9.1.2.1 带安装片盲孔自锁螺母的典型形式

带安装片盲孔自锁螺母由盲孔自锁螺母和安装片两部分组成,其典型形式见图 9.1。

盲孔螺母由上、下凸缘和中间为空心带内螺纹的圆柱体组成。上、下两个凸缘(或称圆盘)与树脂固化后使镶嵌得更为牢靠,避免只靠树脂和盲孔螺母之间的胶接来传递载荷。上凸缘有两个小通孔,一个用作注射充填的树脂,另一个用作排气和溢胶,并供检查胶是否充满。下凸缘两侧切去一部分,以形成反旋面,克服拧紧力矩,防止盲孔螺母随之转动。圆柱体上部的凹槽是易于产生螺纹局部变形,使螺纹起自锁作用,从而防止使用过程中螺栓松动而自动脱出,影响安全。

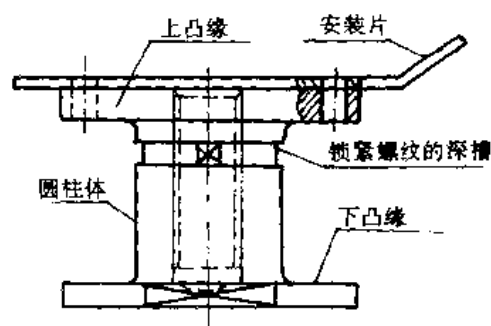


图 9.1 带安装片的盲孔螺母

安装片主要起方便安装、易于定位的作用。安装片与盲孔螺母相接触的一面涂有不干胶,未镶嵌前和配套的盲孔螺母贴合在一起,起保护内螺纹清洁和防锈蚀的作用。当盲孔螺母进行镶嵌时,利用涂有不干胶的安装片,盲孔螺母就不会掉进夹芯的窝内,可使盲孔螺母与夹层板的面板齐平,起定位作用;另外还起到密封作用,以免喷注胶时胶溅到内螺纹中。安装片上也有两个与盲孔螺母一样的小孔。作用相同。

9.1.2.2 盲孔螺母承力分析^[2]

a. 基本承力情况

盲孔螺母的承力分析,要考虑实际使用时载荷的性质、方向和大小。其承载能力通常受充填胶、芯子和面板力学性能的限制。基本承力情况和夹层板不同元件对盲孔螺母承载能力的贡献见表 9.13。

表 9.13 夹层板元件对镶嵌件承载能力的贡献

载 荷		夹 层 板 元 件		
类 型	方 向	芯 子	面 板	充 填 物 / 胶 粘 剂
垂直于面板的载荷	拉伸	主要	小	很小
	压缩	主要	小	很小
在面板内的载荷	全部	很小	主要	很小
垂直于面板的力矩	全部	重要	小	重要
面板平面内的力矩	全部	主要	小	小

b. 盲孔螺母承受垂直于面板载荷的情况

盲孔螺母在承受垂直于面板载荷情况下,夹层板各元件承载情况的定性分析如下所述。

• 芯子中的应力

盲孔螺母当承受垂直于面板的载荷 P 时,其承载能力主要由芯子的剪切强度所决定,具体承载比例取决于芯子和面板的相对刚度,芯子剪应力 τ 的分布如图 9.2 所示

• 面板的应力

在垂直面板法向载荷作用下,面板对盲孔螺母承载能力的贡献很小,然而面板对芯子起支撑作用,正如图 9.2 所示,考虑面板后剪应力分布就明显得到改善,因此有时为了提高面板的局部刚度,对重要承力部位上、下面板内局部增加了垫板。如表 9.11 中的最后一图所示。

• 充填物中的应力

充填物的应力通常很低,在垂直于面板载荷作用下,多数是充填物与芯子胶接处的芯子被剪断^[6],因此充填物不会成为盲孔螺母的薄弱环节。可以认为仅有的高应力发生在盲孔螺母的下凸缘边缘处。

c. 盲孔螺母承载能力计算

盲孔螺母自身的强度计算和普通自锁螺母没有原则区别,根据选用的材料种类和几何尺寸不难确定。盲孔螺母镶嵌后的强度值与诸多因素有关,主要有:

- 盲孔螺母自身的几何尺寸;
- 充填胶的性能和几何尺寸;
- 夹芯的性能和几何尺寸;
- 面板的材料、厚度及开口直径。

也就是说不同规格的盲孔螺母,如采用不同的充填胶和夹芯组合,其拉脱强度是不同的。拉脱强度值一般应由试验来确定,在无试验数据可利用时,可按下述公式^[1]求破坏拉脱力:

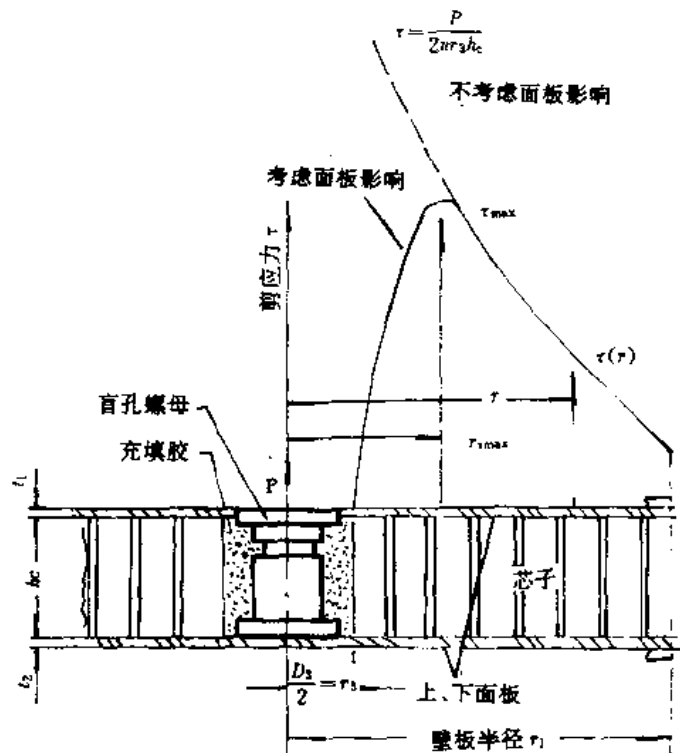


图 9.2 全部充填的盲孔螺母,芯子的剪应力分布

$$P = \frac{1}{2} \pi (D + 2S) h (\tau_L + \tau_T) \quad (9.1)$$

式中 τ_L ——夹芯的纵向剪切强度(MPa);
 τ_T ——夹芯的横向剪切强度(MPa);
 h ——夹层板两面板的中面距离(mm);
 S ——蜂窝孔格边长(mm);
 D ——充填胶的外径(mm)。

由此可见,夹层板参数确定后, P 几乎是定值。

9.1.2.3 盲孔螺母的设计

a. 盲孔螺母设计要求

• 几何参数要匹配,以便保证各部分都能满足强度和刚度要求。

• 选取的外形应使镶嵌后不易拔出或转移。

• 螺纹符合国家标准,具有互换性,并符合自锁标准要求。

• 选材要合理,符合成本低、重量轻的原则。

• 表面有完整的表面保护层,避免电偶腐蚀。

• 安装片上涂的胶应长期不固化。

b. 盲孔螺母几何参数的确定

• 高度 H 和直径 D 的关系

盲孔螺母几何参数的定义见图 9.3。影响盲孔螺母拉脱强度最重要的两个参数是直径 D 和高度 H 。

H 和 D 的关系可用图 9.4 表示。通常可参照本图进行选用,结合实际需要可进行必要的调整。

• 柱体参数的确定

柱体是盲孔螺母的主要部分,柱体参数主要考虑直径 d 、螺纹高度 h 和开槽直径 d_1 。

螺母高度 H 值由受载大小决定,受夹层板高度和螺纹大小的限制。

圆柱直径 d 取决于螺纹 M 的大小,其值可参照一般常用自锁螺母的外径选取。

开槽处直径 d_1 的选取不容忽视,选得太小影响强度,太大则很难使螺纹变形,从而影响自锁性能,通常可参照六角自锁螺母 G1337-77 收口处的直径取值。槽宽可取 $F=1.5 \sim 2\text{mm}$ 。槽的位置主要决定于螺钉或螺栓拧入后的有效螺距数,一般取 C 大于 4 个螺距,并考虑螺纹的倒角长度。

全螺纹深度一般可取 $h=H-t_2$,但底部座留出退刀槽,一般不大于 M10 的用粗牙,等于或大于 M12 的用细牙。

凹槽、圆柱体与凸缘相交的内圆角可取 $R=0.5 \sim 1$ 。

• 凸缘参数的确定

一般常用直径的盲孔螺母,当高度 $H < 20$ 时,宜选用上、下两个凸缘,必要时也可选三个凸缘。

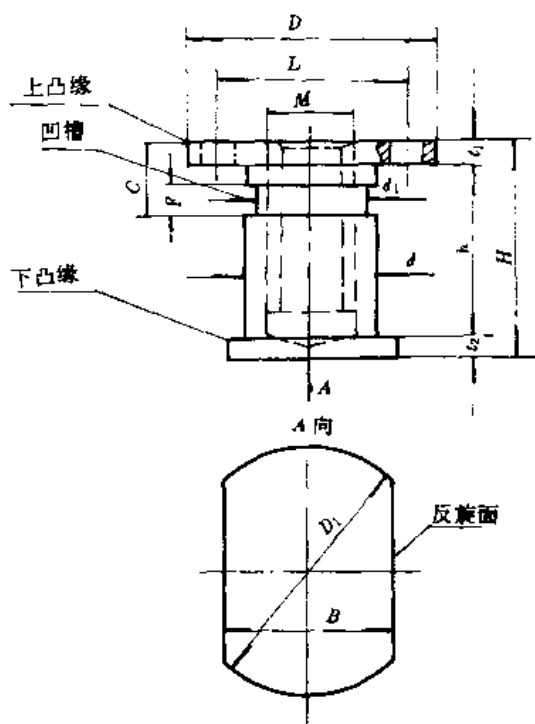


图 9.3 盲孔螺母的几何参数

凸缘的厚度最好相等,其值视螺纹直径而定,允许 $t_2 \geq t_1$,但不允许 $t_2 < t_1$ 。

凸缘的直径一般均相同,其中必须有一个凸缘在两侧切去一扇形面积作为反旋面,剩下的宽度可取 $B=d+2.5$ 。

上凸缘的两个小孔位置应布置在与反旋面平行的两侧,孔径一般为 $\phi 2$,大号为 $\phi 3$,间距 $L=d+3$ 。

以上各种几何参数的选取原则也适用于通孔螺母、双凸缘衬套等。

安装片几何参数的确定

安装片的几何参数定义在图 9.5 中给出。安装片的直径 D_2 要比与其配套的盲孔螺母直径约大 10mm,即取 $D_2 \approx D+10$ 。根据规格大小的不同,在其上钻有两个 $\phi 2$ 或 $\phi 3$ 的孔。两孔间距 L 与配套的盲孔螺母一致。其余尺寸已在图 9.5 中给出。

c. 推荐的盲孔螺母的几何参数

鉴于国内外目前还没有统一的盲孔螺母标准,为方便设计,推荐一些规格供选用,其主要参数见表 9.14 和 9.15,表中几何尺寸的定义见图 9.3。相配套的安装片和自锁参数可参照本章进行设计。

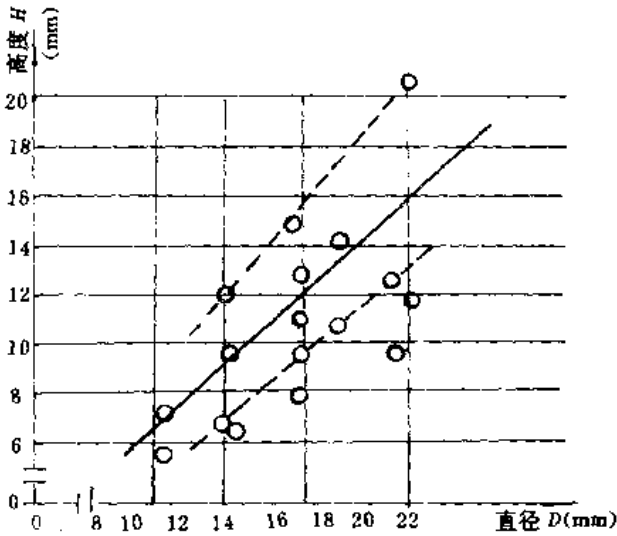


图 9.4 盲孔螺母的优选高度序列

表 9.14 盲孔螺母参数

	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M14	M16	M18	M20	M22	M24
d_1	4	5	6.2	7.6	10	12	14	16	18	20	22	24	26
d	5	6	7	9	12	14	16	18	21	23	25	27	29
t_1	0.8	1	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.6	2.8	3
t_2	1.2	1.5	1.5	1.8	2.0	2.2	2.4	2.5	2.8	3	3.2	3.5	3.5
B	7	8	9.5	11.5	14.5	16.5	18.5	20.5	24	26	28	30	32
D	9	11	14	16	20	22	24	26	28	30	32	34	36
C	4.2												
F	2												
d_2	$\phi 2 \sim \phi 3$												

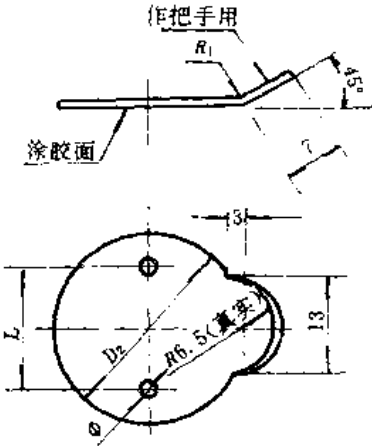


图 9.5 安装片的几何参数

表 9.15 部份系列化的盲孔螺母主要几何参数

序 号	螺纹(ISO)	D (最大)	C	h_1 (最小)	H (最小)
1	M4	14.2	3.2	6.3	9.4
2					12.7
3					15.9
4	M5	17.4	4.2	7.9	9.4
5					12.7
6					15.9
7	M6	17.4	5.1	7.9	12.7
8					15.9
9					19.1
10	M8	17.4	5.6	7.9	15.9
11					19.1

d. 材料选择和表面处理

用于制造盲孔螺母的材料有铝、碳钢、钛合金和不锈钢等。国内常用的是碳钢、其实选用比铝合金强度更高、更耐高温的材料制造是没有必要的,因组件系统的强度受到充填胶的限制。常用的材料和表面处理方法见表 9.16。

表 9.16 盲孔螺母材料选择和表面处理

材料名称	材料牌号	表面保护	特征性能
铝合金	Ly12CZ	铬酸阳极化	
碳 钢	20.45	镀锡钝化	由于升华问题,不许在宇宙飞船结构中的应用。
钛合金	TA1,TA6	钝化	很适合碳纤维面板结构中用。
不锈钢	OCr18Ni9Ti	钝化	

安装片一般选用防锈铝,如 LF5、LF6,板厚 0.5mm 即可,可不进行表面处理,更不宜涂漆。

粘在安装片下表面的长期不固化胶,要求粘结性好。

e. 盲孔螺母的自锁技术标准

盲孔螺母的自锁方法是在圆柱体的开槽处即螺纹外径最薄处,两边加一定压力使螺纹变形达到自锁的目的,如图 9.6 所示。其锁紧性能要求和试验方法应符合 GB943-77 或 MIL-N-25027D 标准的规定。

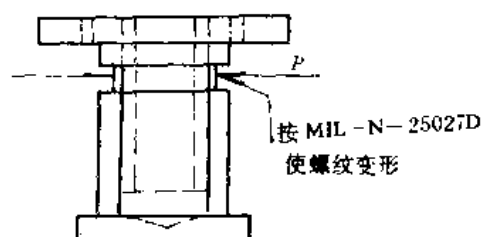


图 9.6 螺纹锁紧方法

9.1.3 镶嵌设计

9.1.3.1 镶嵌方式

对于常用的镶嵌件,镶嵌方式主要有预置式和后置式两种,这里以盲孔螺母为例予以说明。

a. 预置式(图 9.7)

镶嵌件在夹层结构成形前埋入,与夹层板共固化。预埋前镶嵌件四周用膨胀胶膜包住或涂上发泡胶。这种方式适合于组合件装配前已确定孔位的单钉连接,或用定位器成组定位的场合。其拉伸、剪切强度和刚度较高。

b. 后置式(图 9.8)

镶嵌件在夹层板成形后置入,然后用充填胶填充。可在已固化的夹层板任意位置上镶嵌,使用方便,但性能不如预置式的好。

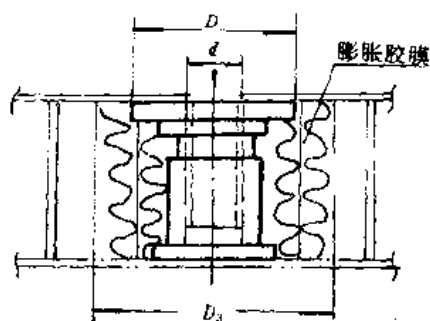


图 9.7 预置式

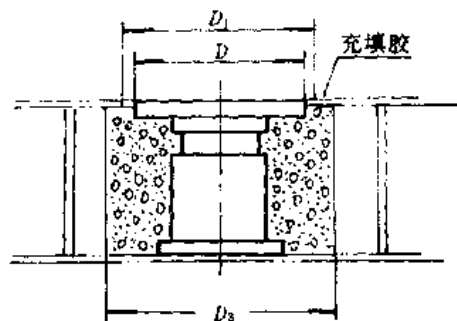


图 9.8 后置式

9.1.3.2 镶嵌的几何尺寸选取

a. 充填直径 D_3 和面板开口直径 D_1 的确定

镶嵌的几何尺寸,主要是指面板开口直径 D_1 和夹芯开孔直径 D_3 ,且 D_3 对承载能力的影响更大。

由于夹芯剪切强度较低,要传递足够大的剪切载荷,一方面要保证充填胶与面板间有足够的胶接面积和胶接强度,另一方面要保证连接螺栓能把剪力有效地传递给充填胶。这就必须扩大剪切面积,亦即扩大充填胶的填充范围。一般来说,镶嵌件直径 D 越大,则充填直径 D_3 也越大,相应的抗拉脱能力也越大。但太大的充填直径从受力观点而言没有必要,也失去匹配;另外充填胶的密度比蜂窝夹芯大得多,必然会增加重量。合适的几何尺寸应由设计载荷来确定。对一般情况可参照下式进行计算。

$$R \geq \frac{P}{\pi h (\tau_L + \tau_T)} \quad (9.2)$$

$$\tau_P \geq \frac{P}{\pi D h} \quad (9.3)$$

$$\sigma_P \geq \frac{4P}{\pi (D^2 - d^2)} \quad (9.4)$$

式中 $R = D_3/2$, D_3 为充填直径(mm);

P ——紧固件的拉伸设计载荷(N);

h ——夹层板两面板的中面距离(mm);

τ_L ——夹芯的纵向剪切强度(MPa);

τ_T ——夹芯的横向剪切强度(MPa);

τ_p ——充填胶的管剪强度或垫块的剪切强度(MPa);

σ_p ——充填胶或垫块的抗压强度(MPa);

d ——紧固件直径(mm);

D ——紧固件钉头(或钉头下面的垫圈、杯形件、碗形件、衬套凸缘、螺母凸缘、垫块等)的外径(mm)。

当充填胶的压缩强度 $\geq 35\text{MPa}$ 时,对于一般的设计载荷,允许参照表 9.17 中的经验公式选取 D_3 和 D_1 的值。

b. 充填高度 h 的确定

充填高度与盲孔螺母高度所需承载能力有关,并受夹芯高度 h_c 限制,根据设计需要,可取 $h \leq h_c$ 。

c. 边距、间距和行距要求

边距应不小于夹芯开孔直径 D_3 的一半。间距、行距不宜太密,一般可参照螺栓连接的要求,有时要受设备安装支架孔的限制,在使用载荷许可情况下,间距、行距应尽可能选大些。

表 9.17 推荐的镶嵌几何参数

$D(\text{mm})$	$D_3(\text{mm})$	$D_1(\text{mm})$
≤ 14	$D+2$	$D-G_5$
≤ 17	$D+3$	
30~50	$D+6$	
50~60	$D+10$	

注: G_5 为基孔制公差代号。

9.1.3.3 充填胶的选取

a. 充填胶的要求

- 具备足够的管剪强度和抗压强度,以确保镶嵌件在使用中不拉脱;
- 应具有良好的工艺性,以利施工;
- 应无毒,耐老化性能优良。

b. 充填胶的分类

按镶嵌方式划分,目前有两种类型的充填胶,一类是膨胀胶膜,另一类是液体状具有流动性的混合胶,包括发泡胶、树脂与空心酚醛微球混合充填胶、树脂与空心玻璃球充填胶等。

充填胶的密度不同,一般用的密度在 $0.6 \sim 1.5\text{g/cm}^3$ 之间,常温抗压强度在 $23 \sim 80\text{MPa}$ 范围内。充填胶的固化温度有常温和加温固化两种。充填胶的颜色有白色、黑色、浅栗色、深栗色、浅绿色和粉红色等。

c. 充填胶的构成

充填胶多数是用环氧树脂和酚醛空心微球和固化剂组成。不同的配方可获得不同的性能,因此必须严格按各组分规定的重量或体积比份充分地混合。用压枪注入镶嵌件四周,按要求进行常温或加温固化。

在树脂基体中加入的微球量决定其强度和比重。微球含量大,重量就轻,但强度则降低。微球含量应根据强度要求来确定,但应少于混合重量比份的 40%。

d. 常用的充填胶

- 基胶为 J22-1,填料为空心玻璃球

通过密度、灌注工艺、力学性能测试,各种配比的常温性能在表 9.18 中给出。

- 其它发泡封边充填胶

为适应多方需要,这里另推荐一些可供蜂窝结构局部充填、封边、粘结的发泡胶,见表 10.19,以供选用。

表 9.18 充填胶性能

胶料与填料 重量比	密度(g/cm ³)	抗压强度(MPa)	管剪强度(MPa)
1:0	$\frac{1.03 \sim 1.09}{1.05}$	$\frac{59.0 \sim 62.5}{60.7}$	$\frac{16.4 \sim 21.6}{19.0}$
6:1	$\frac{0.93 \sim 0.95}{0.94}$	$\frac{59.8 \sim 63.0}{61.9}$	$\frac{14.9 \sim 21.7}{18.4}$
5:1	$\frac{0.89 \sim 0.91}{0.90}$	$\frac{48.8 \sim 50.8}{49.6}$	$\frac{15.0 \sim 20.4}{18.2}$
4:1	$\frac{0.87 \sim 0.89}{0.88}$	$\frac{55.5 \sim 61.3}{58.0}$	$\frac{14.7 \sim 21.7}{18.3}$
3:1	$\frac{0.84 \sim 0.86}{0.85}$	$\frac{52.4 \sim 56.8}{54.0}$	$\frac{18.1 \sim 21.7}{19.4}$
2.5:1	$\frac{0.84 \sim 0.86}{0.85}$	$\frac{48.7 \sim 50.4}{49.5}$	—
2:1	$\frac{0.83 \sim 0.85}{0.84}$	$\frac{54.8 \sim 57.0}{56.0}$	$\frac{14.1 \sim 19.0}{16.2}$
1.5:1	$\frac{0.83 \sim 0.84}{0.83}$	$\frac{37.9 \sim 41.6}{40.3}$	—

表 9.19 蜂窝充填、封边发泡胶

胶牌号名称	主要特点和性能	生产厂家
SY-P1 高温带状 发泡结构胶	该胶系单组分改性环氧胶。有一定的自粘性,可在室温下进行封边及蜂窝芯子拼接组装。可在-55~150℃长期使用。室温性能:压缩强度 ≥ 14.7 MPa,管剪强度 ≥ 5 MPa,密度 $0.4 \sim 0.53$ g/cm ³ 。	北京 621 所
J-29 带状发泡结 构胶粘剂	该胶系单组分环氧-酚醛型发泡胶。有填充、密封、连接及补强等多种功能,耐湿、热老化及耐化学介质性能良好。适于蜂窝结构的拼接和封边。可在-60~175℃长期使用。室温性能:管剪强度 ≥ 3.5 MPa,密度 $0.6 \sim 0.7$ g/cm ³ 。	黑龙江省 石化所
SLP-1 发泡胶粘 剂	该胶系环氧树脂型,固化时膨胀发泡,有强度高、密封性好,耐冲击、热、湿、大气、油及海水等特点。适于金属非金属等结构件的发泡胶接。可在-120~175℃长期使用。室温性能:管剪强度 ≥ 7.8 MPa(175℃时 ≥ 2.9 MPa),密度 0.5 g/cm ³ 。	上海橡胶制品 研究所
SY-P2 中温带状 发泡结构胶	系改性环氧单组分中温固化发泡胶。密度小、强度高、泡孔均匀,耐水、油、湿热老化,工艺简便。用于蜂窝结构边缘连接及封边。有不同密度和颜色,可在-55~100℃长期使用。其室温性能:压缩强度 ≥ 9.8 MPa,管剪强度 ≥ 3.9 MPa,密度 $0.4 \sim 0.5$ g/cm ³ 。	北京 621 所
ZWD-1 中温固 化带状发泡胶	系环氧胶。有良好粘合性能及填充性能,密度小、力学性能好,耐水、油、湿、热老化及耐多种化学介质、工艺简便。可在-60~130℃长期使用。其室温性能:管剪强度 ≥ 5 MPa,密度 0.55 g/cm ³ 。	黑龙江省 石化所

表 9.19(续)

胶牌号名称	主要特点和性能	生产厂家
FFP-125 中温固化粉状发泡胶粘剂	系改性环氧胶。有良好粘合性能、耐水、油和耐湿、热老化及耐多种化学介质、无毒。用于蜂窝芯子局部填充和边缘封边。可在 $-60\sim 125^{\circ}\text{C}$ 长期使用。其室温性能:压缩强度 $\geq 15\text{MPa}$,管剪强度 $\geq 4.5\text{MPa}$,密度 $0.55\sim 0.65\text{g}/\text{cm}^3$ 。	黑龙江省石化所
J-59 粉状发泡胶粘剂	系环氧单组分发泡胶。压缩强度高,有填充、密封粘合及补强等作用。可在 $-60\sim 150^{\circ}\text{C}$ 长期使用。其室温性能:压缩强度 $\geq 25\text{MPa}$,管剪强度 $\geq 8.0\text{MPa}$,密度 $0.75\sim 0.95\text{g}/\text{cm}^3$ 。	黑龙江省石化所
J-60 耐高温粉状发泡胶粘剂	系单组分改性环氧胶。耐热、水及各种化学介质,工艺简便。有填充、补强粘合及密封等作用,用于蜂窝结构的局部补强。可在 $-60\sim 175^{\circ}\text{C}$ 长期使用。其室温性能:压缩强度 15MPa (175°C 时 $\geq 8\text{MPa}$),管剪强度 $\geq 4.5\text{MPa}$ (175°C 时 $\geq 2\text{MPa}$),密度 $0.55\sim 0.62\text{g}/\text{cm}^3$ 。	黑龙江省石化所
REDUX212NA 中温带状发泡胶膜	该胶为热固性环氧泡沫胶膜。用于蜂窝板对接、边缘封边和嵌入件镶嵌。固化温度 $120\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。在湿度 $45\sim 75\%$ 、温度为 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 时,剪切强度 $\geq 4.5\text{MPa}$ (用胶膜厚 1.6mm 校准测试)。	CIBA GE Gr DUXFORD CAMBRIDGE (英国)
REDUX219 高温带状发泡胶膜	该胶为热固性环氧泡沫胶膜。用于蜂窝板对接、边缘封边和嵌入件镶嵌。固化温度为 $175\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。在湿度 $45\sim 75\%$ 、温度为 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 时剪切强度 $\geq 6.9\text{MPa}$ (用胶膜厚 1.6mm 校准测试)	CIBA GE Gr DUXFORD CAMBRIDGE (英国)

9.1.3.4 盲孔螺母镶嵌后的强度值

影响盲孔螺母镶嵌后拉脱破坏力的因素已在 9.1.2.2 节描述,计算公式见(9.1)。为提供参考数据,这里给出特定条件下的拉脱试验结果。试验参数为:

a. 夹层板——上、下面板均为 0.3mm 厚的铝板,蜂窝芯为 Nomex,芯高 15mm ,孔格边长 4.76mm 。

b. 充填胶——有两种充填胶,一种是 618 混合胶,用 A 表示;另一种是双组份环氧胶,用 B 表示。两种充填胶均按比份混入酚醛微球,获得的胶性能值见表 9.20,表中给出的是平均值。

表 9.20 充填胶性能

充填胶名称	密度(g/cm^3)	压缩破坏载荷(N)	压缩强度(MPa)	备注
A	0.7	9854	31.5	
B	0.9	8942	28.6	压缩强度理论值为 35MPa

c. 盲孔螺母——螺母的规格有 M4、M5 和 M6 三种,M4 的高度为 10mm ,D 为 14mm ,M5

和 M6 的高度和直径应按 9.1.2.3 节的要求相应变化。

在上述条件下,盲孔螺母镶嵌后的拉脱破坏平均载荷在表 9.21 给出。

9.1.4 夹层板的单面连接

在结构通路不好的情况下,需要采用单面连接。夹层板可卸单面连接分两种情况:一种情况是夹层板承载大,连接点起传递载荷作用,对于这种常用的紧固件在此不作介绍;另一种情况是夹层板自身较弱,只起装饰或保护作用,而不传递载荷。如油箱舱的保护板、设备舱隔板、座舱内装饰板等的固定,只要考虑固定牢靠、连接方便、拆卸容易、不磨损油箱和装饰美观即可。对于这种情况可采用形式简单且可拆卸的特殊尼龙钉来有效地进行单面连接。表 9.22 例举的是其典型形式之一。

表 9.22 中例举的尼龙钉有两种类型。类型 I 是用一圆的尼龙芯杆插进空心尼龙钉内,插到底后,尼龙钉端头爪子胀开并扣紧结构件,便能达到锁紧的目的,如要拆卸,只需将尼龙芯杆冲出。

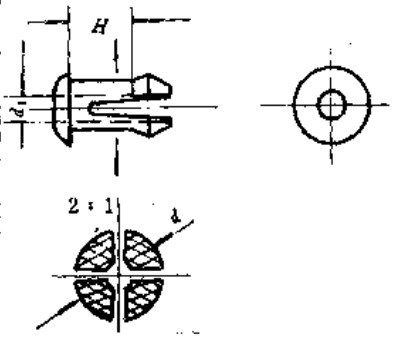
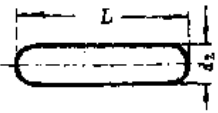
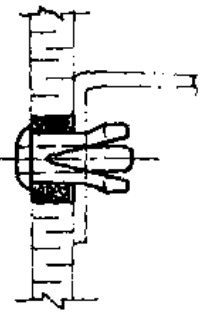
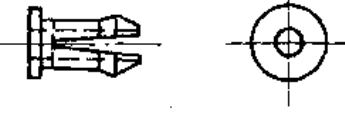
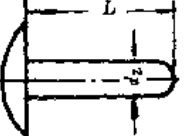
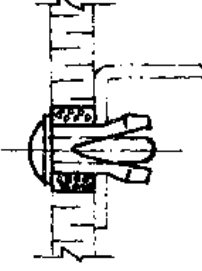
Ⅱ 型的应用原理与 I 型相似,所不同的是将芯杆做成扁圆头的,拆卸方法与 I 型略有不同,先将尼龙钉从空心尼龙钉中拔出或拧出(若用螺钉时),然后取出空心尼龙钉即可。

尼龙钉(芯杆)与空心尼龙钉的配合有一定紧度,保证在飞行中不会松动脱出。只要配合合适,不损坏可重复使用。

表 9.21 盲孔螺母拉脱试验结果

充填胶名称	螺母规格	拉脱破坏载荷(N)
A	M4	2211
B	M4	2069
B	M5	2930
B	M5	3218
A	M6	2786

表 9.22 尼龙钉单面连接形式

类 型	空心尼龙钉	尼龙钉	连接形式
I			
Ⅱ			

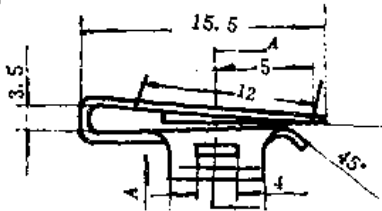
若软油箱周边不是保护板,而是承力的夹层板,要将软油箱固定到夹层板上,也是一种单面连接。此时就不能用尼龙钉来固定承载了,而需由软油箱自身设计一特殊金属制快卸锁闩,并在夹层板的相应连接处设计一经局部加强的支座,连接时让锁闩伸进支座内牢牢的锁住,从而达到单面连接要求。

9.2 层压板的特殊连接

9.2.1 弹簧夹式游动螺母连接

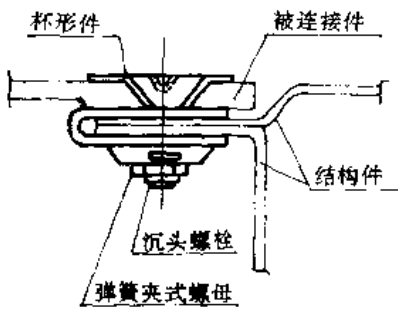
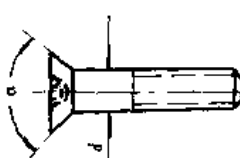
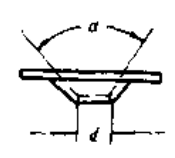
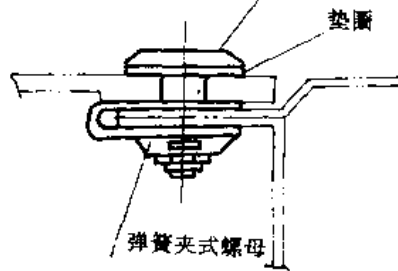
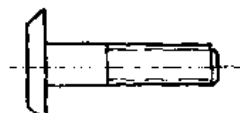
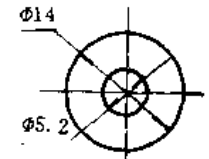
弹簧夹式游动螺母是一种适合于薄层压板(厚度一般不超过 3mm)边缘连接的特殊紧固件,其作用和普通游动托板螺母相似。弹簧夹式游动螺母由弹簧夹式支架和双耳自锁螺母两部分组成,结构形式如表 9.23 中的图所示。

表 9.23 弹簧夹式游动螺母

弹簧夹式游动螺母组合示图	弹簧夹(支架)	双耳自锁螺母
 双耳自锁螺母		Ø5.8 M5×0.8 按标准收口

沉头螺栓带杯形件的;另一种是用特殊螺栓带特制垫圈的。图 9.9 示出了 M5 特殊螺栓的几何尺寸。

表 9.24 弹簧夹式游动螺母装配连接形式及其配套零件

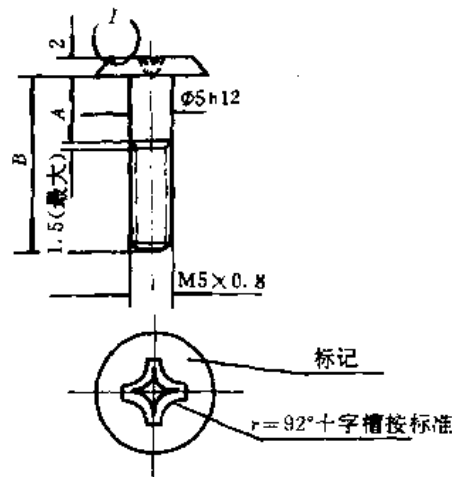
类型	装配连接形式	装配协调要求的特制件		说明
I		沉头螺栓 	杯形件 	1. 沉头螺栓的 α 角应与杯形件一致,选用的螺纹应与弹簧夹式螺母一致。 2. 沉头螺栓可选合适的标准件;杯形件尺寸另见表 9.2。
II		特殊螺栓 (螺栓头大而扁平) 	特殊垫圈 棉纶制 $\delta 1$ 	1. 特殊螺栓尺寸见图 9.9。 2. 适用于外形允许凸出螺栓头的部位

9.2.2 快卸承力锁

复合材料快卸承力锁主要用于经常打开的口盖与机体的连接,连接后使口盖成为机体的一部分,即能承受局部气动力,又能参予总体受力。可满足快速、方便拆装的使用要求,避免在多次拆装过程中复合材料孔边出现损伤。

复合材料快卸承力锁连接构造主要由快卸锁和复合材料快卸锁接头组成。快卸锁连接的主要工作有两个方面。其一是用于复合材料口盖的快卸锁的设计或选用;其二是复合材料快卸锁接头的设计。

快卸锁主要由上、下锁座和衬盘组成。上锁座与锁钉之间有一弹簧使开锁时锁钉即时弹出,以确保口盖的迅速拆装,并在上锁座设有一挡圈防止弹簧掉出。



材料: 10CrNiMoA
表面处理: 镀锌钝化
尺寸 A 和 B 按夹紧厚度选取。

图 9.9 M5 特殊螺栓

本节给出的快卸承力锁,是在用于金属结构上的快卸锁的基础上,按照复合材料结构的特点和要求进行改进设计而成的,主要是选用钛合金或不锈钢材料,加大了铆钉间距和壳体的锥角。

9.2.2.1 一般设计原则

快卸承力锁连接一般应遵循下列原则:

- a. 边距和端距应符合 3.2 节对复合材料连接的要求;
- b. 铺层设计应遵循 3.2.4 节关于连接区铺层的要求,尤其是对铺层比例的要求, $\pm 45^\circ$ 层不少于 40%, 0° 不少于 25%, 90° 不少于 10%;
- c. 应该尽量使复合材料层压板与被连接构件在连接部位的载荷方向的局部刚度接近一致,以便使钉载趋于均匀,一般情况下,当接头区层压板厚度为 3mm,上下排钉载分配比例约为 5:4。
- d. 与复合材料接触的锁座、衬盘等材料应满足防腐、防电偶腐蚀的要求。一般选用钛合金或不锈钢制造。
- e. 防雨水渗入。

9.2.2.2 I 型快卸锁

a. I 型快卸锁结构

I 型快卸锁是在 Q/1A2-83-87 的基础上改进而成的,是一种能防雨用钛合金制的快卸承力锁,其结构和安装见图 9.10。

该锁由衬盘、锁钉和上弹簧组成上锁体,由壳体、支承环、下弹簧和支撑罩组成锁座。

该锁安装比较简单,用 2 个 HB6478.4 $\times$ 1B 钛铆钉将上锁体铆接在口盖安装边上,用 2 个 HB6478.4 $\times$ 1 钛铆钉将锁座铆接在口框上。安装时保证上锁体和锁座同心,并使锁钉头的螺丝刀槽顺航向放置。当衬盘、壳体端面与口盖、口框表面不齐平时,可选用适当厚度的垫片进行调整使其齐平。

锁中各零件的主要作用简介如下:

锁钉主要承受拉力,将口盖锁在口框的锁座上;衬盘将锁钉和上弹簧组成上锁体,然后铆接在口盖上,通过与壳体的配合锥面传递剪切力;上弹簧的作用是在打开口盖时,当锁钉转 90° 将锁钉从壳体内弹出;壳体将支撑环、下弹簧和支撑罩组成锁座,然后铆接在口框上,通过与衬盘的配合锥面传递剪加力,锁钉下端头穿过其上的长孔转 90° 后卡在壳体底面上传递拉力;支撑环随锁钉一起转 90° ,在下弹簧压力下使其在使用条件下不能转动,以防止锁钉转动发生开锁;支撑罩用来支撑下弹簧,同时也使沿锁孔进入的雨水不能流入设备舱内,起到防雨作用;垫片厚度可按需要选择,在安装时起调整作用,以保证衬盘、壳体端分别与口盖、口框表面齐平。

由于壳体高度和锁钉长度不同而形成不同序号的锁,分 1,2,3,4 号锁,详见表 9.25。

表 9.25 锁中各零件的用材和尺寸(具体图号略)

件号 名称 锁号	H/h (mm)		1 锁钉	2 衬盘	3 上弹簧	4 壳体	5 支撑环	6 下弹簧	7 支撑罩	8 垫片
1	30	2								
2	32	4								
3	34	6								
4	36	8								
材 料			TC4R φ12	ZT4 (热等静压)	1Cr18Ni9 d0.8(冷拉)	ZT4 (退火)	ZT4 (退火)	1Cr18Ni9 d1.5(冷拉)	0Cr18Ni9 d0.5	TA2M d0.3~1.5
垫处理 σ_s (MPa)			≥895	≥835	—	≥835	≥835	—	—	—

注:表中 H, h 符号见图 9.10

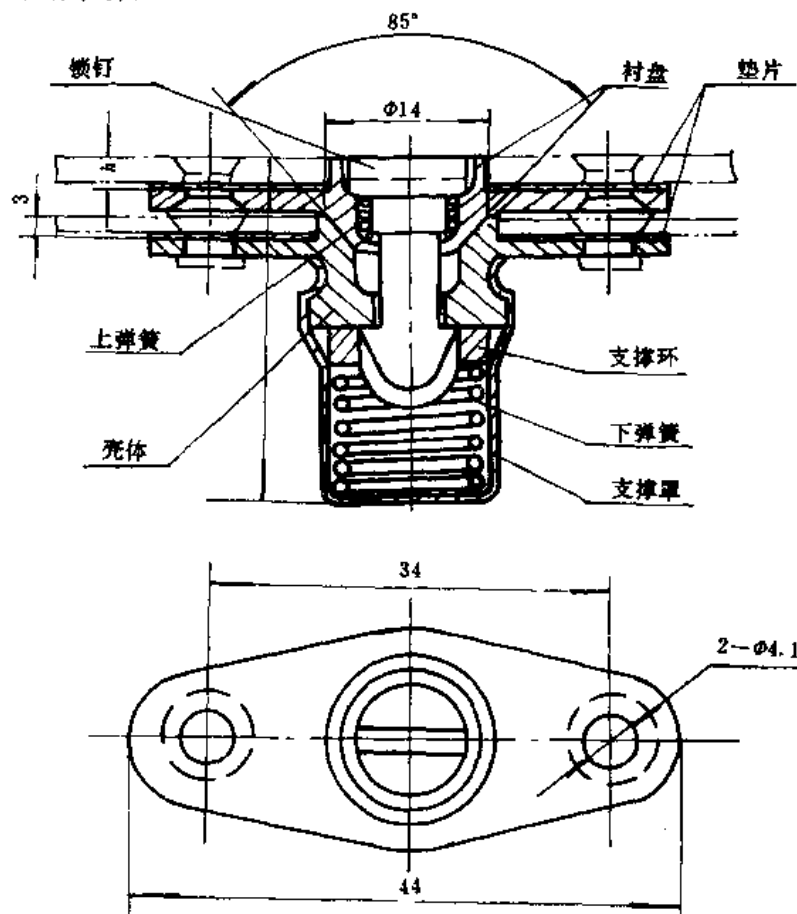


图 9.10 I 型快卸锁

b. I 型快卸锁的连接强度

I 型快卸锁连接强度的设计值和试验值在表 9.26 中给出。

9.2.2.3 I 型快卸锁

a. II 型快卸锁结构和强度

II 型快卸锁是由 HB2-45-76 改进而成的,主要在衬盘材料选用和铆钉孔布置上做了修改。修改后的快卸锁结构如图 9.11 所示。衬盘材料为 Cr17Ni2 不锈钢,衬盘零件表面钝化处理,与复合材料接触的表面进行隔离防护。

表 9.26 I 型快卸锁连接强度

拉 脱(kN)		剪 切(kN)	
设计值	试验值	设计值	试验值
2.63	3.68	7.5	11.28

按照航标 HB2-45-76, 衬盘上四个铆钉孔距中心大孔边缘仅只约 8mm, 不符合复合材料连接要求。故将四个钉孔相对于中心大孔的位置进行了调整, 使铆钉孔的中心距自由边缘的距离基本上在 3 倍钉孔直径。

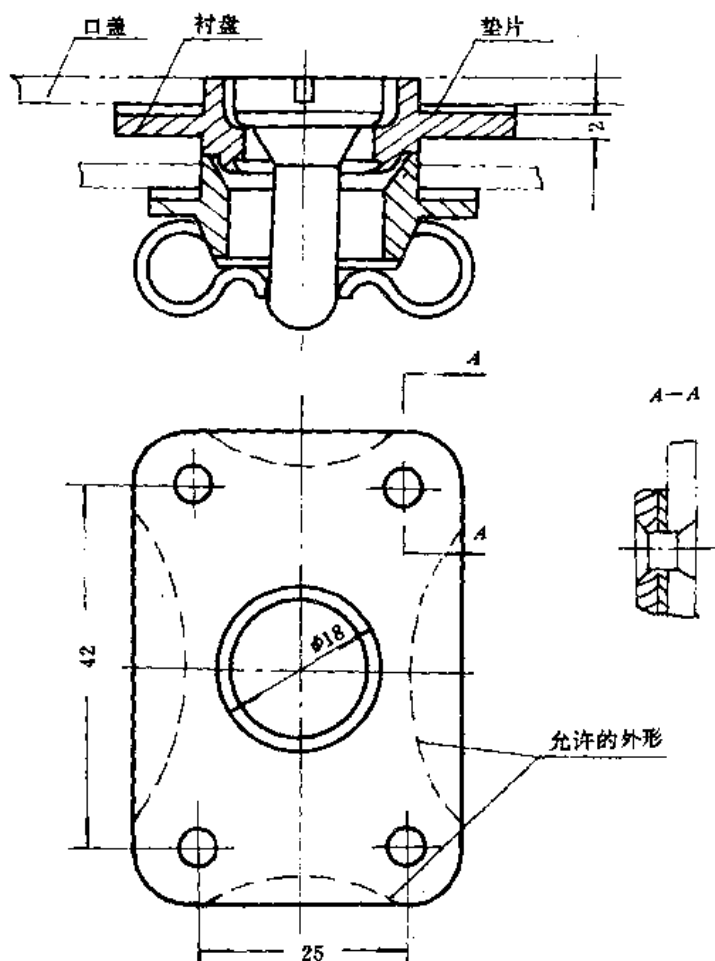


图 9.11 I 型快卸锁及安装示意图

在实际飞机结构应用中, 衬盘的形状可做成如图 9.11 中虚线所示的形状, 以减轻重量。试验中使用的衬盘重量约为 40 克。

快卸锁自身的承载能力见表 9.27。

b. 复合材料快卸锁接头设计和强度

快卸锁接头构造中的中心开孔, 四个铆钉的直径和位置在前述快卸锁设计中已经确定。所以, 快卸锁接头实际上就是一种具有特定构造的四钉接头。选用铆钉为大扁圆头 GB1011。接头区铺层: $[\pm 45^\circ_k / \pm 45^\circ / 0^\circ / 90^\circ / 0^\circ_2 / \pm 45^\circ / 0^\circ / 90^\circ_2 / 0^\circ]_s$

其中: 下标 k 代表 Kevlar-49, 120 织布/QY8911, 其余为 T300/QY8911。

快卸锁接头强度列于表 9.28。

表 9.27 I 型快卸锁破坏载荷

载荷种类	剪切	拉脱
破坏载荷(kN)	>24	>12

表 9.28 I 型复合材料快卸锁接头破坏载荷

载荷种类	剪切	拉脱
破坏载荷(kN)	>24	>12

9.2.2.4 Ⅲ型快卸锁

a. Ⅲ型快卸锁结构:

Ⅲ型快卸锁是在 HB2-46-89 基础上改进而成的。考虑到机身结构外形大曲度的特点,上、下锁体结合面的锥度设计成 90° ,上、下锁座配合处的直径为 $\phi 15$ 。上锁座与锁钉之间有一弹簧使开锁时锁钉即时弹出,以确保口盖的拆装和快卸,并在上锁座设有一挡圈防止弹簧掉出,其快卸承力锁结构简图见图 9.12。

考虑结构重量和电化腐蚀问题,上、下锁座必须选用钛合金,相应的内部构件也采用钛合金或不锈钢制造。

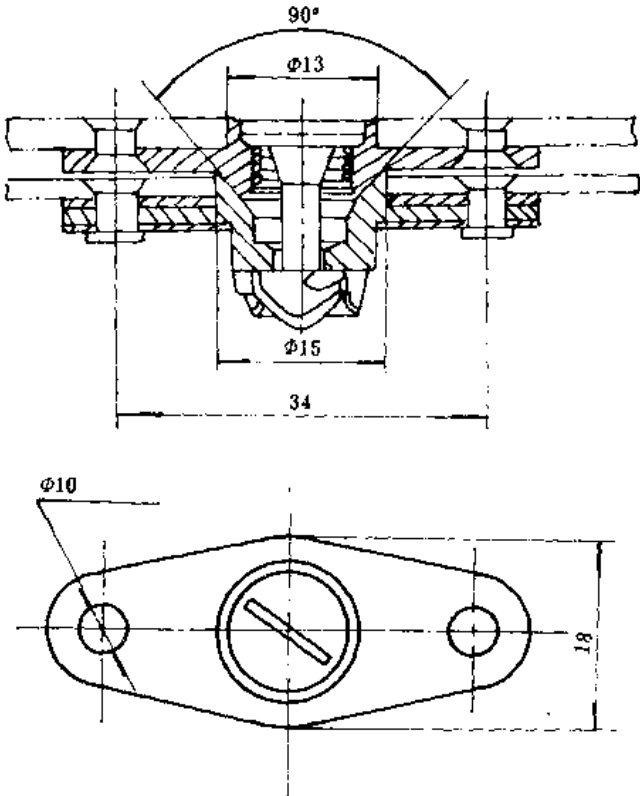


图 9.12 Ⅲ型快卸锁

由钛合金制的 Ⅲ型快卸锁和 HB2-46-76 的强度值比较见表 9.29。

由表 9.29 可见,钛合金制快卸锁的强度优于 HB2-46-76,满足设计要求。

b. Ⅲ型快卸锁连接强度

试件面板铺层: $[\pm 45^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ_2/0^\circ/90^\circ_2/0^\circ]_s$, 表面两层材料为 Kevlar-49/QY8911, 其余均为 T300/QY8911。快卸锁接头的破坏载荷见表 9.30。

表 9.29 快卸锁承载能力比较

锁的种类	剪切(kN)	拉脱(kN)
钛合金快卸锁	11.652	12.828
HB2-46-76	9.806	5.884

表 9.30 Ⅲ型复合材料快卸锁接头破坏载荷

载荷种类	剪切	拉脱
破坏载荷(kN)	11.60	4.04

试验中发现破坏均发生在复合材料层压板与上锁体连接的两只铆钉处,铆钉拉脱,复合材料板在铆钉拉脱处分层。

承剪时出现拉脱破坏形式,是由于承剪面间隙大,引起了过大的附加弯矩造成的。铆钉拉脱是由于复合材料层压板铆钉连接拉脱强度较低的原因。设计时必须注意薄弱环节。

参 考 文 献

- [9-1] 航空航天工业部科学技术研究院编,复合材料设计手册。北京:航空工业出版社,1990,282~293
- [9-2] Hexcel, Design Handbook for Honeycomb sandwich Structures
- [9-3] Insert Design Handbook, ESA PSA-03-1202
- [9-4] 黄承恭,复合材料夹层板嵌入件拉脱试验研究,见:第七届全国复合材料学术会议论文集,大连 1992
- [9-5] 黄承恭,嵌入件设计值得注意的新问题。直升机技术,1994,1

第十章 连接工艺

连接强度与工艺质量密切相关,本章将给出制孔、螺接和铆接方面的主要工艺要求。连接设计中必须满足这些要求,否则不宜应用本手册所给数据及图表。

10.1 制孔工艺及要求

制孔工艺包括钻孔、铰孔、镗孔三项内容。

10.1.1 制孔的专用刀具和工具

推荐的专用刀具和工具见表 10.1 和表 10.2。

表 10.1 制孔的专用刀具

名 称	规格 mm	制造单位 (供参考)	配套工具(供参考)	
			型号	转速, r/min
Y330 硬质合金麻花钻	$\phi 3 \sim \phi 6$	3147 厂	Z6-1	4000
Y330 硬质合金铰刀	$\phi 4 \sim \phi 6$	3147 厂	Z8-1	1800
Y330 硬质合金镗孔钻	$\phi 3.5 \sim \phi 6 \times 100^\circ$ 120°	3147 厂	Z8-1	1800
金刚石镗孔钻	$\phi 4 \sim \phi 6 \times 100^\circ$ 120°	625 所	Z8-1	1800
镶片硬质合金麻花钻	$\phi 8 \sim \phi 13$	上海工具厂	Z13	460
金刚石套料钻	$> \phi 12$	625 所	Z8-1	1800
四直槽钻铰复合钻头	$\phi 4 \sim \phi 6$	320 厂	Z5K	4000
金刚石磨轮	$\phi 10 \sim \phi 50$	625 所	Z6-1	4000
金刚石砂轮片 (网眼型)	$\phi 110 \times \phi 16 \times 2$	北京人工 晶体研究所	PDP 100C	11000
80~120" 金钢石砂轮片	$\phi 100 \times \phi 16 \times 1$	北京 金钢石厂	Z6- $\frac{2}{3}$	17500

表 10.2 制孔的专用工具

名 称	型号与规格	转速, r/min	制造单位(供参考)
高速手风钻	Z6- $\frac{2}{3}$	17500	前哨机械厂
电动砂轮切割机 (角向磨光机)	PDP100C	11000	闽日电动工具公司
可控进给钻	Z5K	4000	前哨机械厂

10.1.2 钻孔

10.1.2.1 在碳纤维复合材料构件上钻孔

钻 $\phi 3 \sim \phi 12$ 的通孔应使用硬质合金麻花钻, 钻头的几何参数见表 10.3。推荐转速为 $800 \sim 2800 \text{ r/min}$, 进给量为 $0.01 \sim 0.06 \text{ mm/r}$ 。为了避免出口面产生分层, 一方面当接近钻透时应放慢进给速度, 另一方面应在出口面加垫板(硬塑料板、夹布胶木板或铝板)、粘贴可剥布或固化胶层。

钻大于 $\phi 12$ 的孔, 应采用 $80 \sim 100$ 粒度的金刚石套料钻(图 10.1), 转速为 $500 \sim 2800 \text{ r/min}$ 。为防止孔出口面劈裂, 应采用两面钻孔, 每面各钻一半。如无法两面钻孔, 应在孔出口面加垫板支撑。

表 10.3 钻头的几何参数

锋角	后角	横刃宽, mm	螺旋角
$110 \sim 120^\circ$	$10 \sim 25^\circ$	$(0.1 \sim 0.3)d$	$25 \sim 30^\circ$



图 10.1 金刚石套料钻

10.1.2.2 在碳纤维复合材料与铝或钛组合的构件上钻孔

从复合材料面钻入, 可不加垫板支撑, 用硬质合金麻花钻按钻铝或钛的转速钻削, 直至钻通为止(图 10.2)。为防止金属切削划伤复合材料孔壁, 应注意断屑。钻铝或钛的推荐转速见表 10.4。

表 10.4 钻铝或钛的转速

孔径 (mm)	钻铝 (r/min)	钻钛和钢 (r/min)
$\phi 3 \sim \phi 8$	$1500 \sim 3500$	$500 \sim 1800$

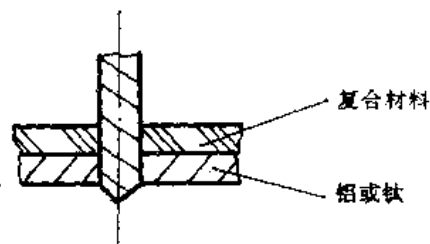


图 10.2 从复合材料面钻入

从铝或钛面钻入, 用硬质合金麻花钻, 钻速见表 10.4, 但在孔出口面应加垫板支撑, 以防止出口面劈裂(图 10.3)。

用可控进给钻配上钻模板钻孔, 应采用四直槽钻铰复合钻头, 转速为 4000 r/min , 进给量控制在 $0.007 \sim 0.02 \text{ mm/r}$ 时可不加垫板支撑。

10.1.3 铰孔

如需铰孔, 钻孔时应留出铰孔余量 $0.15 \sim 0.4 \text{ mm}$, 然后用硬质合金铰刀铰至最后尺寸, 推荐转速为 500 r/min 。

10.1.4 铤窝

a. 应尽量将钻孔出口面放于铤窝面。

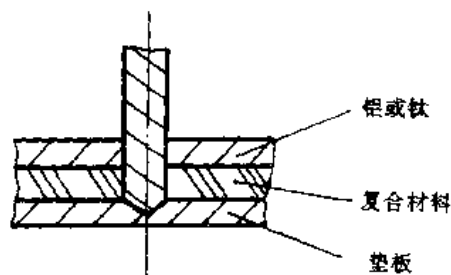


图 10.3 从铝或钛面钻入

- b. 对碳纤维复合材料构件的镗窝应使用硬质合金镗窝钻或金刚石镗窝钻。
- c. 使用硬质合金镗窝钻转速为 500~800r/min, 金刚石镗窝钻的转速为 800~1400r/min。为防止表面纤维劈裂, 镗窝钻必须在旋转以后接触工件。
- d. 镗窝深度应用镗窝限位器控制, 试镗合格后方可使用。
- e. 孔需要倒角时, 用金刚石镗钻(见图 10.4), 倒角转速为 500r/min

10.1.5 制孔质量验收标准

- a. 孔径、沉头窝的尺寸及公差要求、钻孔和镗窝表面粗糙度, 应符合设计图样、技术条件或紧固件安装生产说明书的要求与规定。
- b. 钻孔和镗窝表面粗糙度不低于 $R_a6.3$, 铰孔不低于 $R_a3.2$ 。
- c. 孔与板的垂直度偏差通常不大于 2° 。
- d. 孔各部位的质量要求见图 10.5 和表 10.5。
- e. 由于分层、劈裂和掉渣引起的孔边损伤允许范围见图 10.6 和表 10.6。

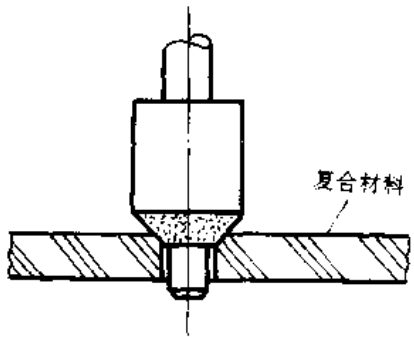


图 10.4 用金刚石镗窝钻倒角

表 10.5 孔的损伤要求

部 位	要 求
1	孔入口处不应有分层, 孔边缘的毛刺应清除
2	沉头窝与孔的同轴度不大于 0.08mm
3	孔壁损伤允许范围见(f)
4	孔出口边损伤允许范围见表 11.6, 损伤包括分层、劈裂和掉渣, 孔边缘的毛刺应清除

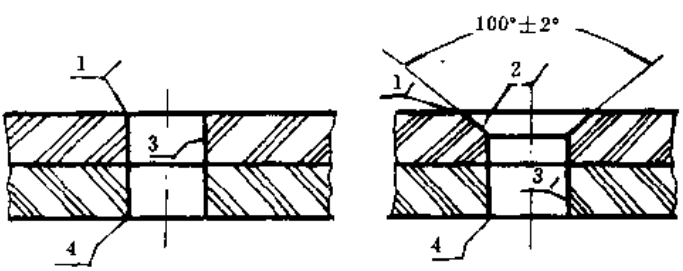


图 10.5 有质量要求的部位

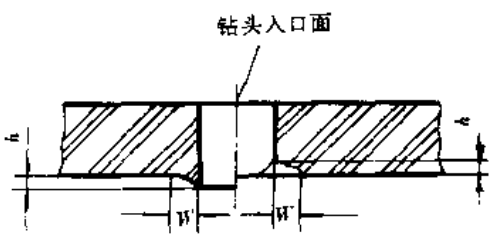


图 10.6 孔边损伤范围

表 10.6 孔边损伤允许范围

孔径	$h_{最大}$	$W_{最大}$	孔径	$h_{最大}$	$W_{最大}$
3	0.1	1.3	8	0.4	3.0
4	0.4	2.0	10	0.4	3.0
5	0.1	2.5	12	0.1	3.0
6	0.1	2.5			

- f. 允许的孔壁最大损伤范围: 深 0.25mm、宽 0.2mm, 并且不超过孔或沉头窝周周长的

25%，见图 10.7。

g. 孔出口的劈裂损伤应在长 $3d$ 、宽 1.8mm 的范围内，见图 10.8。

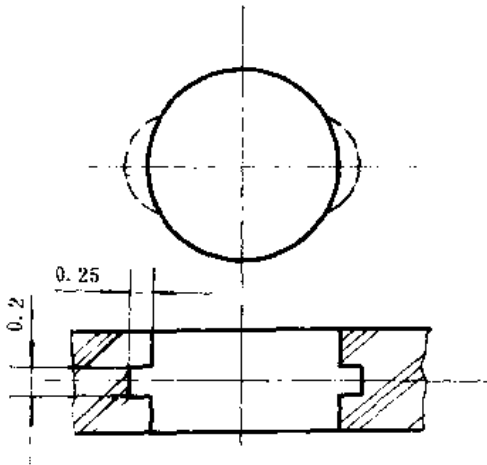


图 10.7 孔壁损伤范围

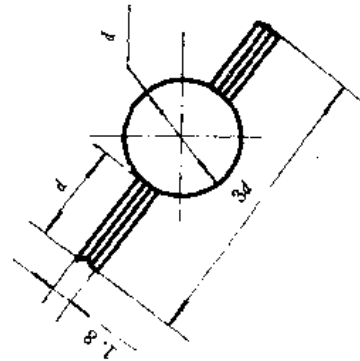


图 10.8 孔出口劈裂范围

h. 制孔质量一般采用目视检查，有公差要求的孔用量具或塞规检查，对重要受力部位连接孔质量有疑问时应进行无损检测。

10.2 螺接工艺要求

a. 紧固件与孔的配合，要求达到 H8/f8。孔与板的垂直度偏差通常在 2° 以内；

b. 复合材料构件表面斜度超过 0.5° 时，必须使用特制倾斜度的垫圈；

c. 除非传力件外（如电缆导管夹子、垫板等），螺栓的螺纹部分不允许在孔的挤压部位。为此，必须用夹层厚度尺准确测出夹层厚度，以选择具有合适光杆长度的螺栓（图 10.9）。

d. 钛合金螺栓与合金钢螺栓应分别储藏和保管，装配时也不能混用；

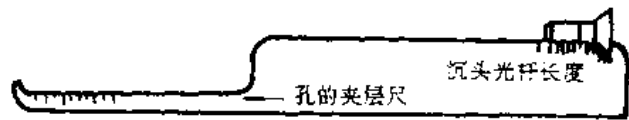
e. 在连接部位，特别在潮湿部位安装高载紧固件，一律采用湿装配。湿装配时，孔内或紧固件应涂密封胶，允许螺纹粘上密封胶，螺母必须在胶的施工期内上紧完毕。紧固件间（如螺栓与螺母）或紧固件与板之间存在较大电位差时，也应采用同样措施；

f. 沉头螺栓钉头不得下陷，允许钉头凸起 $0.1 \sim 0.2\text{mm}$ ；

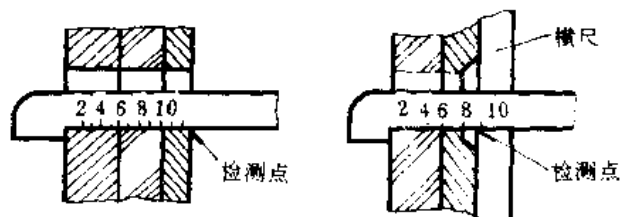
g. 拧断螺母（如高锁螺母）或螺杆（如螺纹抽钉），螺纹不得凹在螺母或套环内，至少应露出螺纹 $1 \sim 2$ 扣；

h. 螺母或螺杆拧断后，应对剪断后的表面进行保护，防止腐蚀；

i. 对凸头螺栓的间隙检验，当按图 10.10 将 0.05mm 厚千分垫插入间隙后，以不能触到



(a) 夹层厚度测量尺



(b) 夹层厚度测量

图 10.9 夹层厚度的测定

(a) 夹层厚度测量尺； (b) 夹层厚度测定

钉杆为合格；

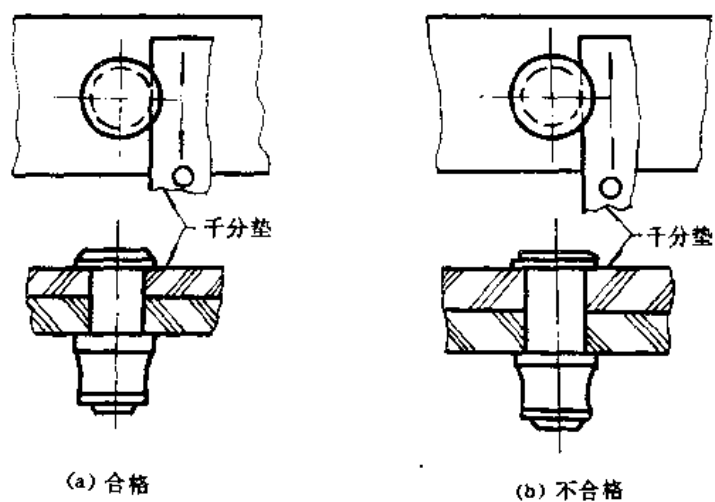


图 10.10 凸头螺栓间隙检查

(a) 合格；(b) 不合格

- ① 千分垫不能触到钉杆, 不能在这个方向自由运动；
- ② 千分垫触到钉杆或这个方向自由运动。

j. 对沉头螺栓, 当按图 10.11 将 0.05mm 厚千分垫插入间隙时, 允许在园周的 40% 以内存在间隙, 但不应触到头部和杆部的交接处。

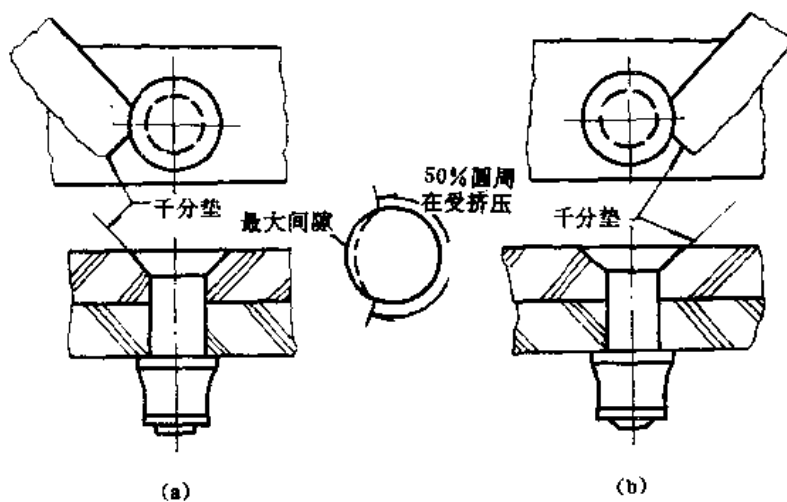


图 10.11 沉头螺栓间隙检查

(a) 合格；(b) 不合格

- ① 千分垫不能触触到头部和杆部的交界处, 无外力不动；
- ② 千分垫能触到头部和杆部的交界处。

k. 螺栓头损坏情况检验, 如图 10.12 所示。图 10.12 四种损坏情况, 不允许在一个钉头上组合出现; 出现图 10.12 所示损坏情况, 只许每连续 10 个中有一个。

1. 多钉连接安装时,不宜逐一的将单个螺栓一次拧紧,而应均衡、对称的将所有螺栓分若干次拧紧,直至达到规定的拧紧力矩值。对缝内密封的螺栓,需分两次拧紧,初次拧紧必须在密封剂活性期内完成,重拧必须在初次拧紧后 20 分钟进行。两次拧紧须在密封材料施工期内完成。

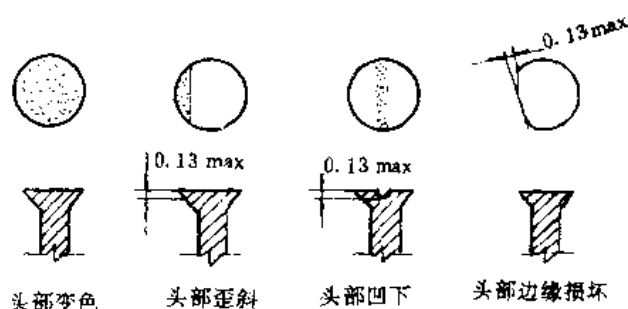


图 10.12 螺栓头损坏情况检验

10.3 铆接工艺要求

为避免复合材料板受撞击和孔壁因钉杆胀粗而受损伤,铆接应优先选用双金属铆钉、拉铆型环槽钉和抽芯铆钉。对必须采用普通实心铆钉的部位,应尽可能选用压铆工艺,在无法使用压铆的部位,才考虑进行锤铆、锤铆一般采用 MSI 型铆枪,忌用大功率铆枪。

铆接实心铆钉时,在铆头成形部位必须加纯钛垫圈。对直径为 d 的纯钛铆钉,铆接复合材料的工艺参数如下:

铆钉孔径 $= d + (0.3 \sim 0.4)$

垫圈直径 $= d + (0.1 \sim 0.2)$

铆头直径 $= d(1.3 \sim 1.5)d$

铆头高度 $= (0.5 \sim 0.65)d$



图 10.13 实心铆钉垫圈的使用

10.4 连接防腐和湿装配

10.4.1 电偶腐蚀

电位不同的两种材料连接并与电解液接触会引起电位较低的材料加速腐蚀,谓之电偶腐蚀。在连接部位,这种腐蚀既可发生在紧固件与复合材料之间,也可发生在紧固件各元件之间(不同材料的螺栓、螺母和垫圈)。碳不但具有良好的导电性且具有较高的电位,与大多数金属接触时,电位差一般在 $0.5 \sim 1V$ 之间,有的高达 $2V$,起阴极作用。导致金属腐蚀。表 10.7 给出了部分材料在海水中的电位增高的排列的序列。从电偶序可粗略看出电偶腐蚀效应,阳极性越大,越易被腐蚀,即表中相距越远的材料相接触,电偶腐蚀的趋势越大。复合材料与铝、镁合金接触会产生严重腐蚀。

10.4.2 防腐和湿装配

如上所述,发生电偶腐蚀有三个条件:电位差、电解质、导电连接。电偶腐蚀的防护也应由这三方面着手:

a. 选用材料匹配,可从根本上防止电偶腐蚀的发生。与碳/环氧树脂复合材料匹配的金属是:钛合金、不锈钢等;

b. 从设计上采取措施防止电解质溶液积聚,从工艺上对连接接头进行全密封防止电解质溶液渗入,避免腐蚀电池的形成;

c. 对不宜直接接触又必须相连的金属材料,必须采取涂(镀)层、施加密封材料等进行隔离、绝缘。

表 10.7 金属按其在海水中的电位增高排列的序列^[66]

金 属	电位 (V)	金 属	电位 (V)
镁	-1.45	镁(活化状态)	-0.12
镁合金(6Al,3Zn,0.5Mn)	-1.20	α -黄铜(30Zn)	-0.11
锌	-0.80	青铜(5~10Al)	-0.10
铝合金(10Al _g)	-0.74	顿巴克黄铜(5~10Zn)	-0.10
铝合金(10Zn)	-0.70	铜	-0.08
铝	-0.53	镍青铜(10Ni)	-0.02
镉	-0.52	X13 不锈钢(钝化状态)	-0.03
杜拉铝(硬铝)	-0.50	镍(钝化状态)	-0.05
镁	-0.50	因科镍(11~14Cr,1Mn,1Fe)	+0.08
碳钢	-0.40	X17 不锈钢(钝化状态)	-0.10
灰口铸铁	-0.36	钛(工业用)	-0.10
X13,X17 不锈钢(活化状态)	-0.32	银	+0.12
镍铜铸铁(12~15Ni,5~7Cu)	-0.30	钛(碘化法)	+0.15
X18H9 不锈钢(活化状态)	-0.30	X18H9 不锈钢(钝化状态)	-0.17
X18H12	-0.30	哈氏合金 C(20Mo,18Cr,6W,7Fe)	+0.17
铅	-0.30	蒙乃尔合金	+0.17
镉	-0.25	X18H12M3 不锈钢(钝化状态)	+0.20
$\alpha + \beta$ -黄铜(10Zn)	-0.20	石墨	0.02~0.2
锰青铜(5Mn)	-0.20	铂	-0.10

上面提到的防腐措施说明,机械连接装配时必须在紧固件上或孔内涂胶或漆进行湿装配。图 10.14 是强-5 复合材料垂尾钛合金高锁螺栓防腐、湿装配情况。螺栓为钛合金、螺母为铝合金。为防止螺栓、螺母间产生电偶腐蚀,安装时,高锁螺栓螺纹浸渍环氧锌黄底漆后才插入孔内进行湿装配。为防止铝螺母与复合材料板之间产生电偶腐蚀,在两者之间加有纯钛垫圈,进行隔离。安装完毕后,还在螺母拧断处及整个高锁螺母和垫圈外围涂了一层环氧锌黄底漆和一层聚氨酯清漆进行全密封,以防电解质溶液渗入。

应该指出,湿装配用于复合材料构件,除防腐外,同时还具有密封效果。这对复合材料层压板防腐蚀和整体油箱密封是很有价值的。

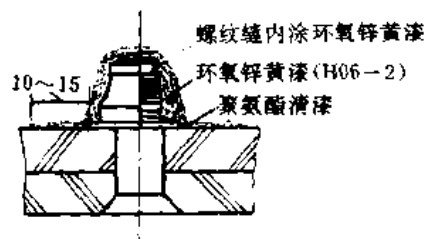


图 10.14 高锁螺栓防腐和湿装配

参 考 文 献

- (10-1) HB/Z189-91。碳纤维复合材料构件制孔工艺
- (10-2) 汪裕炳,张全纯。复合材料的结构连接,北京:国防工业出版社,1992
- (10-3) 李金柱,赵润彦。腐蚀控制手册。北京:国防工业出版社,1989

第十一章 紧固件

11.1 紧固件选材

为防止电偶腐蚀,复合材料结构应选用与它电位接近的钛、钛合金、不锈钢、蒙乃尔合金等金属材料制成的紧固件。

11.1.1 螺栓选材

在与复合材料电位接近的材料中,只有钛合金既有高的比强度又有低的电位差。因此,钛合金成为复合材料结构连接的最佳选择材料。

国外钛螺栓大部分是用 Ti-6Al-4V 制造的。Ti-6Al-4V 属 $\alpha+\beta$ 型合金,该合金固溶时效后的强度水平与 30CrMnSiA 调质后相当,可达 1100MPa,其密度为 4.42g/cm³,相当于 30CrMnSiA 的 60%。目前,该材料被公认为综合性能最好的钛合金。但这种合金冷塑性差,用其制造螺栓时,螺栓头必须热锻成形。

目前,我国已能成批生产 Ti-6Al-4V 的各种规格棒材、丝材,并已建立了相应的技术条件。Ti-6Al-4V 合金的中国牌号是 TC4,图 11.1 是国产 TC4 棒材不同温度下的机械性能。

近年来,我国在研究用 β 型合金制造钛螺栓方面做了大量工作。 β 型合金的主要特点是在固溶状态下有良好的塑性,用这种合金制造螺栓时,螺栓头可直接冷锻成形。但 β 型合金价格较贵,大约是 TC4 的两倍。目前,我国已用 Ti-22 及 17121 两种 β 型合金制造出各种螺栓。

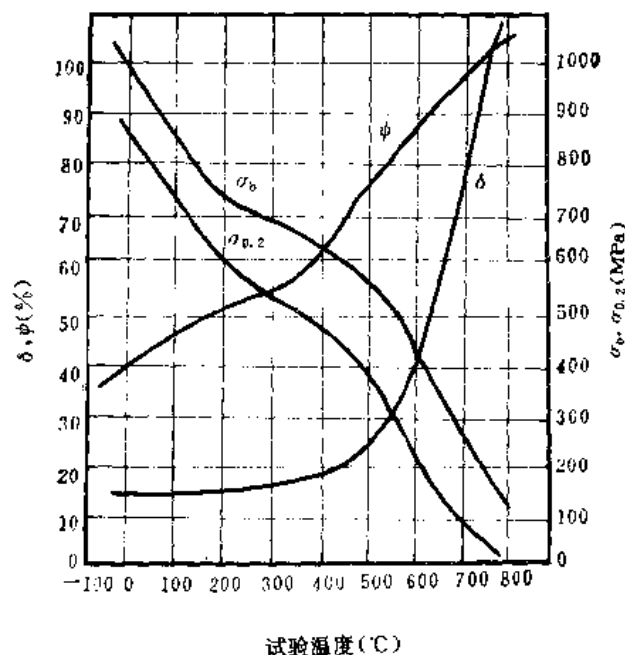


图 11.1 Ti-6Al-4V 不同温度下机械性能

生产飞机用螺栓的另一种材料是美国的 A-286(中国牌号 GH2132)。A286 原是作为耐热不锈钢研制的,因其含有耐热元素,具有抗蚀性,也可用于制造中等强度、耐腐蚀螺栓。

11.1.2 铆钉选材

铆钉所用材料,除与螺栓一样,要求能防止电偶腐蚀和具有高的比强度外,它还应具有良好的塑性,以满足铆接装配工艺要求。

飞机铆钉大都用铝合金及低合金钢,由于与复合材料电位差大,不宜选有。A286 和蒙乃尔合金较重,比强度低,用量较小。

图 11.2 给出了几种材料变形抗力比较。表 11.1 和表 11.2 列出了几种钛和钛合金铆钉材料成分、密度和室温机械性能。

表 11.1 钛和钛合金铆钉用材料成分

牌 号	化 学 成 分	密度 (g/cm ³)
TB2-1	Ti-5Mo-5V-8Cr-3Al	4.83
Ti-22	Ti-3.5Al-10Mo 8V-1Fe	4.84
TA1	Ti	4.51
Ti-Nb	55Ti-45Nb	5.80
β_1	Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn	5.07

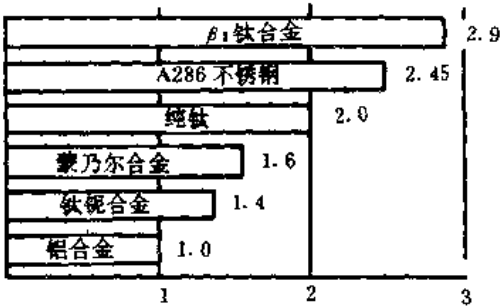


图 11.2 铆钉材料变形抗力比较

表 11.2 钛和钛合金铆钉用材料室温机械性能

牌 号	热处理状态	σ_R (MPa)	σ_b (MPa)	δ_5 %	ϕ %	$D_0 \cdot D_2$
TB2-1	固溶	960	666	21.5~25	68	2.22
Ti-22	固溶	890	706	28.5	73	2.49
TA1(纯钛)	退火	353		25	50	2
Ti-Nb(钛镍合金)	退火	441~490	344	≥ 20	≥ 55	2
β_1	固溶	980	627	20	70	2

可见,上面介绍的几种材料仅钛镍和纯钛适宜作铆钉材料,应根据使用要求选择。

11.2 适于复合材料结构应用的紧固件

表 11.3 中所列七类紧固件,除普通钛合金螺栓外,均属不可拆卸紧固件,可视结构具体情况进行选用。在这七类紧固件中,下面“11.2.1”至“11.2.4”所介绍的四类紧固件已建立航标或国军标,国内可以生产。其余几类紧固件,目前国内尚不能生产,可根据提供的资料,从国外采购。

表 11.3 适于复合材料结构应用的紧固件

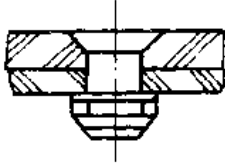
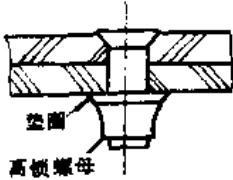
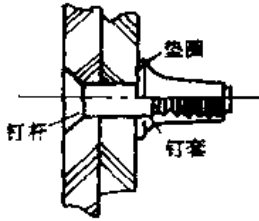
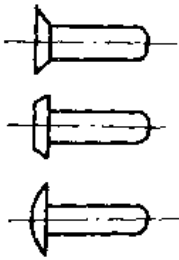
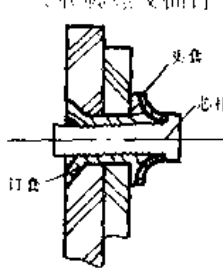
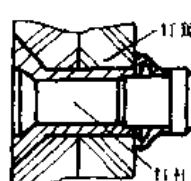
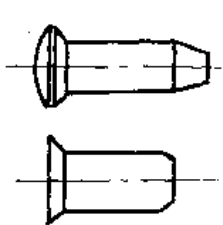
类 型		特 点
钛合金螺栓 (1) TC4 六角螺栓(HB6562-92); (2) TC4 光杆公差带 f9 六角头螺栓(HB6563-92); (3) TC4 高扭矩十字槽 100°沉头螺栓(HB6564-92); (4) TC4 光杆公差带 f9 高扭矩十字槽 100°沉头螺栓(HB6565-92); (5) Ti-22 螺栓。		用于可拆卸部位; 螺栓材料:Ti-22,TC4; 采用不锈钢垫圈,以防止损坏复合材料表面; 采用不锈钢抗剪螺母。
钛合金高锁螺栓与 MJ 螺纹高锁螺母 (1) 抗剪型 MJ 螺纹高锁螺母(HB6508-91); (2) 光杆公差带 76 抗剪型 100°沉头 TC4 高锁螺栓(HB6509-91); (3) 光杆公差带 f9 抗剪型 100°沉头 TC4 高锁螺栓(HB6510-91); (4) 光杆公差带 76 抗剪型平头 TC4 高锁螺栓(HB6511-91); (5) 光杆公差带 f9 抗剪型平头 TC4 高锁螺栓(HB6512-91)。		材 料: TC4、Ti-22 或 47121; 对抗剪型高锁螺母可选用阳极化处理的铝合金:LY12CS(但必须采取防腐蚀措施)或不锈钢; 对抗拉型,应选用经距化处理的不锈钢; 采用轻钝化处理的不锈钢垫圈或经退火、酸洗处理的纯钛垫圈。 引进件(6Al-4V 平锥头和 100°沉头)为美国 HI-Shaar 航空紧固件公司产品
抗拉型钛合金环槽铆钉 (1) 100°沉头抗拉钛(TB2-1)环槽铆钉(GJB857.1-90); (2) 平头抗拉钛(TB2-1)环槽铆钉(GJB857.2-90)。		材料:钉杆 TB2-1(固溶处理) 钉套 LY9CZ;垫圈 TA1; 头型:100°沉头; 规格:φ3、φ3.5、φ4; 采取防腐蚀措施; 抗拉钛环槽铆钉,铆接时钉杆无膨胀,单面安装
钛铆钉 (1) 4 种类型(100°沉头、100°小沉头、平锥头、大扁圆头)TB2-1 钛合金铆钉(GJB120.1~120.4-86); (2) 100°沉头 TA1 纯钛铆钉。		材料:TB2-1,TA1; 头型:100°沉头,100°小埋头,平锥头,大扁圆头; 规格:φ2.5、φ3、φ3.5

表 11.3(续)

类 型		特 点
大底脚螺纹抽钉 (1) 六角头螺纹抽钉(MBF2011 系列); (2) 100°沉头拉伸型螺纹抽钉(MBF2012 系列); (3) 130°沉头剪切型螺纹抽钉(MBF2013 系列)。		材料:钉套 6Al-4V,头套 不锈钢,芯杆 A286; 头型:六角头,100°沉头, 130°沉头;可单面安装; 美国 Monzram 航空紧固 件公司产品
单面抽钉 (1) 100°沉头单面抽钉; (2) 凸头单面抽钉。		材料:A-286; 头型:100°沉头、凸头; 可单面安装; 美国 Huck,Cherry 航空 紧固件公司产品
双金属铆钉 (1) 钛镍双金属 100°冠头铆钉 (2) 钛镍合金 100°沉头铆钉 (3) 钛镍合金 100°小沉头铆钉		材料:双金属铆钉钉头, 钉杆为 6Al-4V,钉尾为钛 镍合金; 头型:冠头、100°沉头; 美国 Cherry 航空紧固件 公司产品。

11.2.1 钛合金螺栓

11.2.1.1 钛合金六角头螺栓(HB6562-92)

钛合金六角头螺栓结构及特征尺寸见图 11.3 及表 11.5、11.6。螺栓质量见表 11.7。

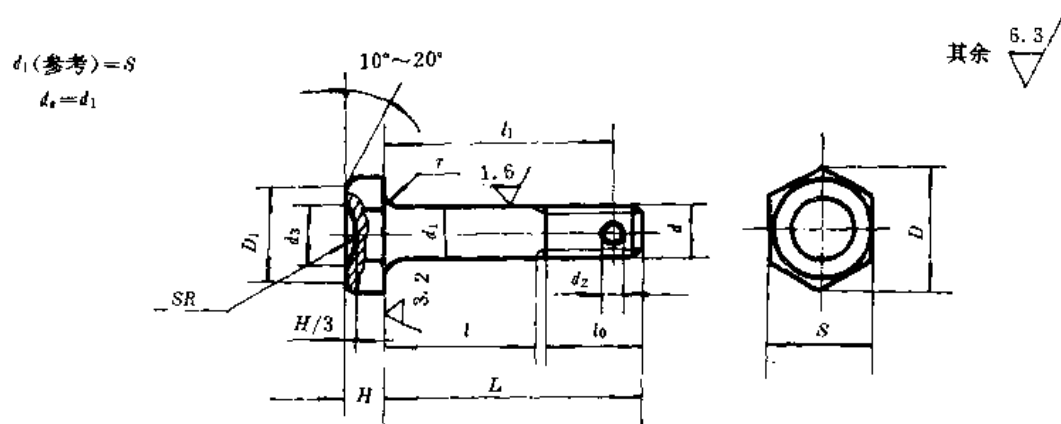


图 11.3 六角头螺栓

表 11.4 材料状态和标记示例

材 料	热 处 理 MPa	表 面 处 理	标记示例 $d_1=6\text{mm}, L=36\text{mm}$	
			无开口销孔	有开口销孔 ($L-l=3\text{mm}$)
TC4	$\sigma_b=1175\pm 100$	-	HB6562.6×36	HB6562.6×36.3
		蓝色阳极化	HB6562.6×36Y	HB6562.6×36.3Y

表 11.5 特征尺寸

(mm)

d		MJ5×0.8	MJ6×1	MJ8×1	MJ10×1.25	MJ12×1.25
$d_1(\text{h}12)$		5	6	8	10	12
$H^{0}_{0.3}$		3	3.5	4.5	5	6
s	基本尺寸	8	10	14	17	19
	极限偏差	h12	h13			
$D_{\max}$		8.7	10.9	15.5	18.9	21.1
$l_0(\text{参考})$		8.5	10.0	11.5	15.0	17.0
$r+0.2$		0.6	0.6	0.8	0.8	1.0
d_2		1.5	1.5	2.0	2.5	2.5

表 11.6 特征尺寸

(mm)

$L \backslash d_1$		5		6		8		10		12	
基本尺寸	极限偏差	l	l_1	l	l_1	l	l_1	l	l_1	l	l_1
14	± 0.2	4	11								
16		6	13	4	13						
18		8	15	6	15	4	14				
20		10	17	8	17	6	16				
22		12	19	10	19	8	18	4	18		
24	± 0.3	14	21	12	21	10	20	6	20	4	19.5
26		16	23	14	23	12	22	8	22	5	21.5
28		18	25	16	25	14	24	10	24	8	23.5
30		20	27	18	27	16	26	12	26	10	25.5
32		22	29	20	29	18	28	14	28	12	27.5
34		24	31	22	31	20	30	16	30	14	29.5
36		26	33	24	33	22	32	18	32	16	31.5
38		28	35	26	35	24	34	20	34	18	33.5
40		30	37	28	37	26	36	22	36	20	35.5
42		32	39	30	39	28	38	24	38	22	37.5
44		34	41	32	41	30	40	26	40	24	39.5
46		36	43	34	43	32	42	28	42	26	41.5
48		38	45	36	45	34	44	30	44	28	43.5
50		40	47	38	47	36	46	32	46	30	45.5

表 11.6(续)

$L \backslash d_1$		5		6		8		10		12	
基本尺寸	极限偏差	l	l_1	l	l_1	l	l_1	l	l_1	l	l_1
52	± 0.5			40	49	38	48	34	48	32	47.5
54				42	51	40	50	36	50	34	49.5
56				44	53	42	52	38	52	36	51.5
58				46	55	44	54	40	54	38	53.5
60				48	57	46	56	42	56	40	55.5
62				50	59	48	58	44	58	42	57.5
64						50	60	46	60	44	59.5
66						52	62	48	62	46	61.5
68						54	64	50	64	48	63.5
70						56	66	52	66	50	65.5
72						58	68	54	68	52	67.5
74						60	70	56	70	54	69.5
76						62	72	58	72	56	71.5
78						64	74	60	74	58	73.5
80						66	76	62	76	60	75.5
82						68	78	64	78	62	77.5
84								66	80	64	79.5
86								68	82	66	81.5
88								70	84	68	83.5
90								72	86	70	85.5
l 极限偏差		0 -0.40		0 -0.50		0 0.62		0 -0.75			

注：根据需要，可以选用粗线以外较长的螺栓，当长度超过 90mm，其间隔取 2mm，长度超过 100mm 时，其间隔取 4mm。

表 11.7 螺栓质量 (mm)

$L \backslash d_1$		5	6	8	10	12
基本尺寸	极限偏差	100 件 螺 栓 理 论 质 量 kg				
14	± 0.2	0.198				
16		0.216	0.326			
18		0.234	0.355	0.727		
20		0.252	0.378	0.773		
22		0.270	0.401	0.819	1.335	

表 11.7(续)

L 基本尺寸 极限偏差		d_1	5	6	8	10	12
100 件 螺 栓 理 论 质 量 kg							
24	±0.3		0.286	0.429	0.865	1.403	2.028
26			0.304	0.452	0.905	1.472	2.131
28			0.321	0.481	0.951	1.547	2.234
30			0.344	0.504	0.997	1.615	2.332
32			0.361	0.532	1.042	1.759	2.435
34			0.378	0.555	1.088	1.827	2.538
36			0.395	0.578	1.134	1.896	2.641
38			0.412	0.607	1.180	1.971	2.738
40			0.430	0.630	1.226	1.039	2.842
42			0.447	0.658	1.272	2.108	2.945
44			0.464	0.681	1.312	2.183	3.048
46			0.481	0.710	1.358	2.251	3.145
48			0.498	0.733	1.403	2.320	3.248
50			0.516	0.762	1.449	2.395	3.352
52	±0.5			0.785	1.495	2.463	3.455
54				0.807	1.541	2.395	3.552
56				0.836	1.587	2.532	3.655
58				0.859	1.633	2.607	3.758
60				0.888	1.678	2.675	3.862
62				0.911	1.719	2.744	3.959
64					1.764	2.819	4.062
66					1.810	2.887	4.165
68					1.856	2.956	4.268
70					1.902	3.031	4.366
72					1.948	3.099	4.469
74					1.994	3.168	4.572
76					2.039	3.243	4.675
78					2.079	3.311	4.773
80					2.125	3.380	4.876
82					2.171	3.455	4.979
84						3.523	5.082
86						3.592	5.179
88						3.661	5.283
90						3.735	5.386

根据需要,头部可按 HB0--9《六角零件的保险孔》制保险孔。技术条件按 HB568--92。

11.2.1.2 钛合金光杆公差带 f9 六角头螺栓(HB6563-92)

钛合金光杆公差带 f9 六角头螺栓结构及特征尺寸见图 11.4 和表 11.9、11.10。螺栓质量见表 11.11。

表 11.8 材料状态和标记示例

材 料	热 处 理 MPa	表 面 处 理	标记示例: $d_1=6\text{mm}$, $L=36\text{mm}$	
			无开口销孔	有开口销孔 ($L-l=3\text{mm}$)
TC4	$\sigma_b=1175\pm100$	-	HB6563.6×30	HB6563.6×36×3
		蓝色阳极化	HB6563.6×36Y	HB6563.6×36×3Y

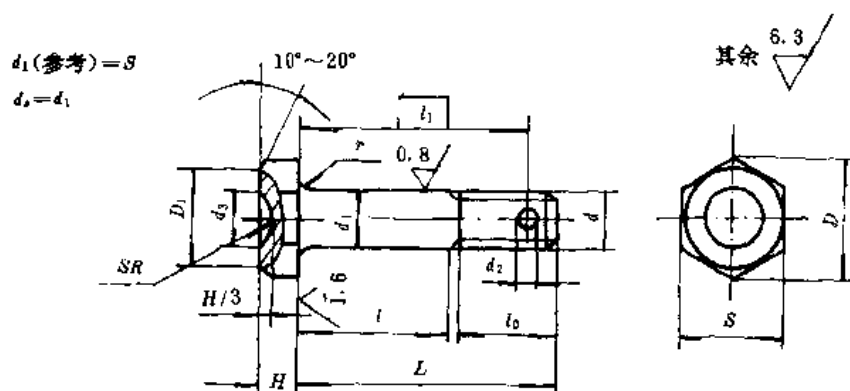


图 11.1 光杆公差带 19 六角头螺栓

表 11.9 特征尺寸

(1971)

d		MJ5×0.8	MJ6×1	MJ8×1	MJ10×1.25	MJ12×1.25
d_1 (f12)		5	6	8	10	12
$H_{3.2}^{\circ}$		3	3.5	4.5	5	6
s	基本尺寸	8	10	14	17	19
	极限偏差	h12	h13			
$D_{\min}$		8.7	10.9	15.5	18.9	21.1
l_0 (参考)		8.5	10.0	11.5	15.0	17
$r \pm 0.2$		0.6	0.6	0.8	0.8	1.0
d_2		1.5	1.5	2.0	2.5	2.5

表 11.10 特征尺寸

(mm)

d_1		5		6		8		10		12	
L	极限偏差	l	l_1	l	l_1	l	l_1	l	l_1	l	l_1
16	± 0.2	6	13								
18		8	15	6	15						
20		10	17	8	17						
22		12	19	10	19	8	18				
24	± 0.3	14	21	12	21	10	20				
26		16	23	14	23	12	22				
28		18	25	16	25	14	24	10	24		
30		20	27	18	27	16	26	12	26		
32		22	29	20	29	18	28	14	28	12	27.5
34		24	31	22	31	20	30	16	30	14	29.5
36		26	33	24	33	22	32	18	32	16	31.5
38		28	35	26	35	24	24	20	34	18	33.5
40		30	37	28	37	26	36	22	36	20	35.5
42		32	39	30	39	28	38	24	38	22	37.5
44		34	41	32	41	30	40	26	40	24	39.5
46		36	43	34	43	32	42	28	42	26	41.5
48		38	45	36	45	34	44	30	44	28	43.5
50		40	47	38	47	36	46	32	46	30	45.5
52	± 0.5			40	49	38	48	34	48	32	47.5
54				42	51	40	50	36	50	34	49.5
56				44	53	42	52	38	52	36	51.5
58				46	55	44	54	40	54	38	53.5
60				48	57	46	56	42	56	40	55.5
62				50	59	48	58	44	58	42	57.5
64						50	60	46	60	44	59.5
66						52	62	48	62	46	61.5
68						54	64	50	64	48	63.5
70						56	66	52	66	50	65.5
72						58	68	54	68	52	67.5
74						60	70	56	70	54	69.5
76						62	72	58	72	56	71.5
78						64	74	60	74	58	73.5
80						66	76	62	76	60	75.5
82						68	78	64	78	62	77.5
84								66	80	64	79.5
86								68	82	66	81.5
88								70	84	68	83.5
90								72	86	70	85.5
极限偏差		0 -0.40		0 -0.50		0 -0.62		0 -0.75			

注: 根据需要, 可以选用粗线以外较长的螺栓, 当长度超过 90mm 时, 其间隔取 2mm。长度超过 100mm 时, 其间隔取 1mm。

表 11.11 螺栓质量

(mm)

L	d	5	6	8	10	12
基本尺寸	极限偏差	100 件 螺 栓 理 论 质 量 kg				
16	± 0.2	0.216				
18		0.234	0.355			
20		0.252	0.378			
22		0.270	0.401	0.819		
24	± 0.3	0.286	0.429	0.865		
26		0.304	0.452	0.905		
28		0.321	0.481	0.951	1.547	
30		0.344	0.504	0.997	1.615	
32		0.361	0.532	1.042	1.759	2.435
34		0.378	0.555	1.088	1.827	2.538
36		0.395	0.578	1.134	1.896	2.641
38		0.412	0.607	1.180	1.971	2.738
40		0.430	0.630	1.226	2.039	2.842
42		0.447	0.658	1.272	2.108	2.945
44		0.464	0.681	1.312	2.183	3.048
46		0.481	0.710	1.358	2.251	3.145
48		0.498	0.735	1.403	2.320	3.248
50		0.516	0.762	1.449	2.395	3.352
52	± 0.5		0.785	1.495	2.463	3.455
54			0.807	1.541	2.495	3.532
56			0.836	1.587	2.532	3.655
58			0.859	1.633	2.607	3.758
60			0.888	1.678	2.675	3.862
62			0.911	1.719	2.744	3.959
64				1.764	2.819	4.062
66				1.810	2.887	4.165
68				1.856	2.956	4.268
70				1.902	3.031	4.366
72				1.948	3.099	4.469
74				1.994	3.168	4.572
76				2.039	3.243	4.675
78				2.079	3.311	4.773
80				2.125	3.380	4.876
82				2.171	3.455	4.979
84					3.523	5.082
86					3.592	5.179
88					3.661	5.283
90					3.735	5.386

根据需要,头部可按 HB0-9《六角零件的保险孔》制保险孔,技术条件按 HB6568-92。

11.2.1.3 钛合金高扭矩十字槽 100°沉头螺栓 (HB6564—92)

高扭矩十字槽 100°沉头螺栓结构及特征尺寸见图 11.5 及表 11.13~11.14。螺栓质量见表 11.15。

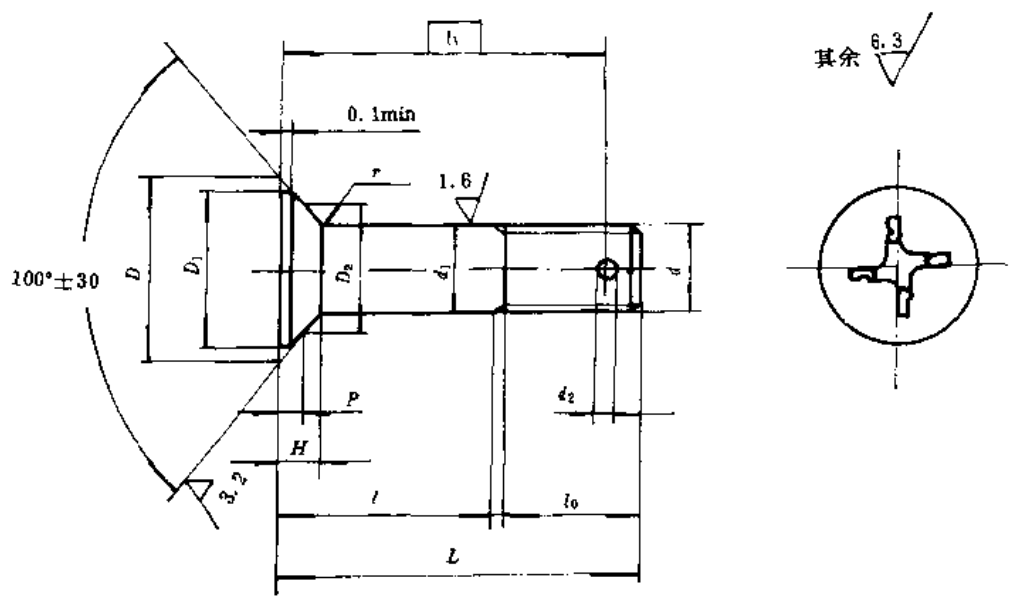


图 11.5 高扭矩十字槽 100°沉头螺栓

表 11.12 材料状态和标记示例

材 料	热 处 理 MPa	表 面 处 理	标记示例 $d_1=6\text{mm}, L=36\text{mm}$	
			无开口销孔	有开口销孔 ($L=l_0+3\text{mm}$)
TC4	$\sigma_b=1175\pm100$	—	HB6564.6×36	HB6564.6×36×3
		蓝色阳极化	HB6564.6×36Y	HB6564.6×36×3Y

表 11.13 特征尺寸 (mm)

d	MJ5×0.8	MJ6×1	MJ8×1	MJ10×1.25
$d_1(\text{h12})$	5	6	8	10
$H(\text{参考})$	2.11	2.53	3.38	4.23
$D(\text{参考})$	10	12	16	20
$D_1\text{min}$	9.0	10.8	14.8	18.8
$D_2^{(1)}$	7.71	9.00	12.21	15.43
$l_0(\text{参考})$	8.5	10.0	11.5	15.0
P	max	0.96	1.26	1.60
	min	0.88	1.18	1.85
r	max	0.5	0.7	0.8
	min	0.3	0.5	0.6
d_2	1.5	1.5	2.0	2.5

注:1)供测量用。

表 11.14 特征尺寸

(mm)

d_1		5		6		8		10	
L	基本尺寸	l	l_1	l	l_1	l	l_1	l	l_1
± 0.2	16	6	13						
	18	8	15	6	15				
	20	10	17	8	17				
	22	12	19	10	19	8	18		
± 0.3	24	14	21	12	21	10	20		
	26	16	23	14	23	12	22		
	28	18	25	16	25	14	24	10	24
	30	20	27	18	27	16	26	12	26
	32	22	29	20	29	18	28	14	28
	34	24	31	22	31	20	30	16	30
	36	26	33	24	33	22	32	18	32
	38	28	35	26	35	24	34	20	34
	40	30	37	28	37	26	36	22	36
	42	32	39	30	39	28	38	24	38
	44	34	41	32	41	30	40	26	40
	46			34	43	32	42	28	42
	48			36	45	34	44	30	44
	50			38	47	36	46	32	46
± 0.5	52					38	48	34	48
	54					40	50	36	50
	56					42	52	38	52
	58					44	54	40	54
	60					46	56	42	56
	l 极限偏差	0 -0.40		0 -0.50		0 -0.62		0 -0.75	

注: 根据需要, 可以选用粗线以外较长的螺栓, 当长度为 60~100mm 时, 其间隔取 2mm, 超过 100mm 时, 其间隔取 4mm。

表 11.15 螺栓质量

(mm)

d_1		5	6	8	10
L	基本尺寸	100 件 螺 栓 理 论 质 量 kg			
± 0.2	16	0.143			
	18	0.160	0.234		
	20	0.177	0.257		
	22	0.194	0.280	0.521	

表 11.15(续)

L		d_1	5	6	8	10
基本尺寸	极限偏差	100 件 螺 栓 理 论 质 量 kg				
24	± 0.3		0.212	0.303	0.567	
26			0.229	0.332	0.613	
28			0.252	0.360	0.658	1.042
30			0.269	0.383	0.704	1.111
32			0.286	0.412	0.750	1.180
34			0.303	0.435	0.796	1.254
36			0.320	0.458	0.842	1.323
38			0.338	0.487	0.888	1.392
40			0.355	0.509	0.933	1.466
42			0.372	0.538	0.974	1.535
44			0.389	0.561	1.019	1.604
46				0.590	1.065	1.678
48				0.613	1.111	1.747
50				0.641	1.157	1.816
52	± 0.5				1.203	1.885
54					1.249	1.959
56					1.294	2.028
58					1.335	2.097
60					1.380	2.171

十字槽按 GB/T12520《高扭矩十字槽》。技术条件按 HB6568—92。

11.2.1.4 钛合金光杆公差带 f9 高扭矩十字槽 100°沉头螺栓(HB6565—92)

钛合金光杆公差带 f9 高扭矩十字槽 100°沉头螺栓结构及特征尺寸见图 11.6 及表 11.17 ~11.18。螺栓质量见表 11.19。

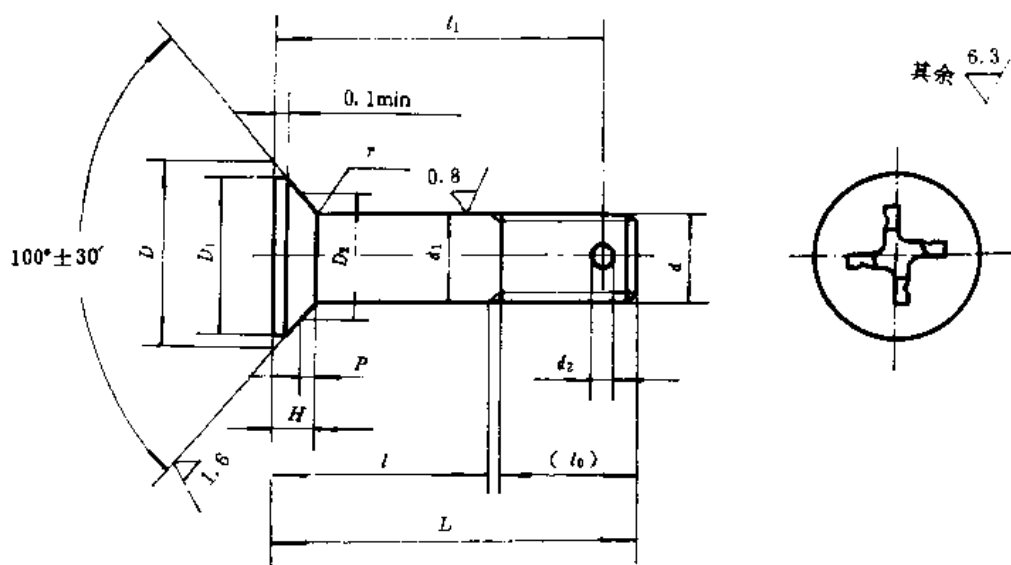


图 11.6 光杆公差带 f9 高扭矩十字槽 100°沉头螺栓

表 11.16 材料状态和标记示例

材 料	热 处 理 MPa	表 面 处 理	标记示例 $d_1 \approx 6\text{mm}, L \approx 36\text{mm}$	
			无开口销孔	有开口销孔 ($L-l_1=3\text{mm}$)
TC4	$\sigma_b=1175 \pm 100$	—	HB6565.6×36	HB6565.6×36×3
		蓝色阳极化	HB6565.6×36Y	HB6565.6×36×3Y

表 11.17 特征尺寸

(mm)

d		MJ5×0.8	MJ6×1	MJ8×1	MJ10×1.25
d_1 (f9)		5	6	8	10
H (参考)		2.11	2.53	3.38	4.23
D (参考)		10	12	16	20
D_{Imin}		9.0	10.8	14.8	18.8
D_2^D		7.71	9.00	12.21	15.43
i_0 (参考)		8.5	10.0	11.5	15.0
P	max	0.96	1.26	1.60	1.93
	min	0.88	1.18	1.52	1.85
r	max	0.5	0.7	0.7	0.8
	min	0.3	0.5	0.5	0.6
d_2		1.5	1.5	2.0	2.5

注:1)供测量用。

表 11.18 特征尺寸

(mm)

d_1		5		6		8		10	
L	基本尺寸	l	l_1	l	l_1	l	l_1	l	l_1
±0.2	16	6	13						
	18	8	15	6	15				
	20	10	17	8	17				
	22	12	19	10	19	8	18		
±0.3	24	14	21	12	21	10	20		
	26	16	23	14	23	12	22		
	28	18	25	16	25	14	24	10	24
	30	20	27	18	27	16	26	12	26
	32	22	29	20	29	18	28	14	28
	34	24	31	22	31	20	30	16	30
	36	26	33	24	33	22	32	18	32
	38	28	35	26	35	24	34	20	34
	40	30	37	28	37	26	36	22	36
	42	32	39	30	39	28	38	24	38
	44	34	41	32	41	30	40	26	40
	46	36	43	34	43	32	42	28	42
	48	38	45	36	45	34	44	30	44
	50	40	47	38	47	36	46	32	46

表 11.18(续)

d_1		5		6		8		10	
L	极限偏差	l	l_1	l	l_1	l	l_1	l	l_1
基本尺寸									
52	±0.5			40	49	38	48	34	48
54				42	51	40	50	36	50
56				44	53	42	52	38	52
58				46	55	44	54	40	54
60				48	57	46	56	42	56
l 极限偏差		0		0		0		0	
		-0.40		-0.50		-0.62		-0.75	

注:根据需要,可以选用粗线以外较长的螺栓,当长度为 60~100mm 时,其间隔取 2mm,超过 100mm 时,其间隔取 4mm。

表 11.19 螺栓质量

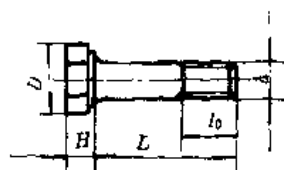
(mm)

d_1		5	6	8	10
L	极限偏差	100 件 螺 栓 理 论 质 量 kg			
基本尺寸					
16	± 0.2	0.143			
18		0.160	0.234		
20		0.177	0.257		
22		0.194	0.280	0.521	
24	± 0.3	0.212	0.303	0.567	
26		0.229	0.352	0.613	
28		0.252	0.360	0.658	1.042
30		0.269	0.383	0.704	1.111
32		0.286	0.412	0.750	1.180
34		0.303	0.435	0.796	1.254
36		0.320	0.458	0.842	1.323
38		0.338	0.487	0.888	1.392
40		0.355	0.509	0.933	1.466
42		0.372	0.538	0.974	1.535
44		0.389	0.561	1.019	1.604
46		0.409	0.590	1.065	1.678
48		0.426	0.613	1.111	1.747
50		0.444	0.641	1.157	1.816
52	± 0.5		0.669	1.203	1.885
54			0.692	1.249	1.959
56			0.721	1.294	2.028
58			0.744	1.335	2.097
60			0.773	1.380	2.171

十字槽按 GB/T12520《高扭矩十字槽》。技术条件按 HB6568-92。

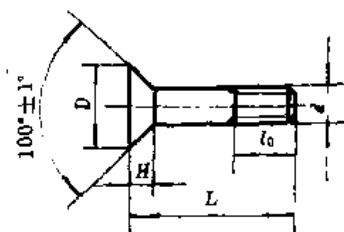
11.2.1.5 Ti-22 螺栓

Ti-22 螺栓结构及螺栓强度见图 11.7 及表 11.20。螺栓单面破坏剪力见表 11.21。螺栓质量见表 11.22~11.23。



注:特征尺寸见表 12-9
及表 12-10

(a)六角头



注:特征尺寸见表12-13及表 12-14

(b)100°沉头

图 11.7 Ti-22 螺栓

表 11.20 六角头 Ti-22(固熔+时效处理)螺栓强度

$d(\text{mm})$	5	6	8	10
单面破坏剪力(kN)	14.982	21.436	38.353	59.926
破坏拉力(kN)	15.663	22.555	40.100	62.630

表 11.21 100°沉头 Ti-22 螺栓单面破坏剪力

$d(\text{mm})$	5	6	8	10
单面破坏剪力(kN)	14.982	21.436	38.353	59.926

表 11.22 六角头 Ti-22 螺栓质量

$d(\text{mm})$	5	6	8	10
$L(\text{mm})$	每 100 件 理 论 质 量 (kg)			
12	0.1986			
14	0.2172	0.3227		
16	0.2358	0.3537	0.7388	
18	0.2544	0.3847	0.7880	
20	0.2730	0.4095	0.8377	1.3713
22	0.2916	0.4344	0.8873	1.4480
24	0.3103	0.4654	0.9370	1.5202
26	0.3289	0.4906	0.9804	1.5947
28	0.3475	0.5212	1.0424	1.6754
30	0.3723	0.5460	1.0797	1.7498
32	0.3909	0.5771	1.1293	1.8243
34	0.4095	0.6019	1.1790	1.9049
36	0.4281	0.6267	1.2286	1.9794
38	0.4468	0.6577	1.2782	2.0539
40	0.4654	0.6826	1.3279	2.1345
42	0.4840	0.7136	1.3775	2.2090
44	0.5026	0.7384	1.4209	2.2834
46	0.5212	0.7694	1.4706	2.3641
48	0.5398	0.7942	1.5202	2.4386
50	0.5585	0.8253	1.5700	2.5130

表 11.22(续)

$d(\text{mm})$	5	6	8	10
$L(\text{mm})$	每 100 件 理 论 质 量 (kg)			
52		0.8501	1.6195	2.5937
54		0.8749	1.6691	2.6682
56		0.9059	1.7188	2.7426
58		0.9308	1.7684	2.8233
60		0.9618	1.8181	2.8977

表 11.23 100°沉头 Ti-22 螺栓质量

$d(\text{mm})$	5	6	8	10
$L(\text{mm})$	每 100 件 理 论 质 量 (kg)			
12	0.1608			
14	0.1798	0.2724		
16	0.1988	0.2998		
18	0.2178	0.3271	0.6311	
20	0.2368	0.3545	0.6798	
22	0.2558	0.3819	0.7284	1.3346
24	0.2748	0.4093	0.7771	1.4114
26	0.2939	0.4366	0.8257	1.4811
28	0.3129	0.4610	0.8744	1.5649
30	0.3319	0.4914	0.9231	1.6416
32	0.3509	0.5188	0.9717	1.7184
34	0.3699	0.5461	1.0204	1.7951
36	0.3889	0.5735	1.0690	1.8719
38	0.4079	0.6009	1.1177	1.9485
40	0.4269	0.6282	1.1664	2.0254
42	0.4459	0.6559	1.2150	2.1021
44		0.6830	1.2637	2.1789
46		0.7103	1.3123	2.2556
48		0.7377	1.3610	2.3334
50		0.7650	1.4096	2.4101
52			1.4583	2.4869
54			1.5069	2.5637
56			1.5556	2.6404
58			1.6043	2.7172
60			1.6529	2.7939

注: Ti-22 螺栓技术条件参考 HB6568—92。

11.2.2 钛合金高锁螺栓与 MJ 螺纹高锁螺母

11.2.2.1 抗剪型 MJ 螺纹高锁螺母(HB6508—91)

高锁螺母结构和特征尺寸见图 11.8 及表 11.24。力矩特性和理论质量见表 11.25。

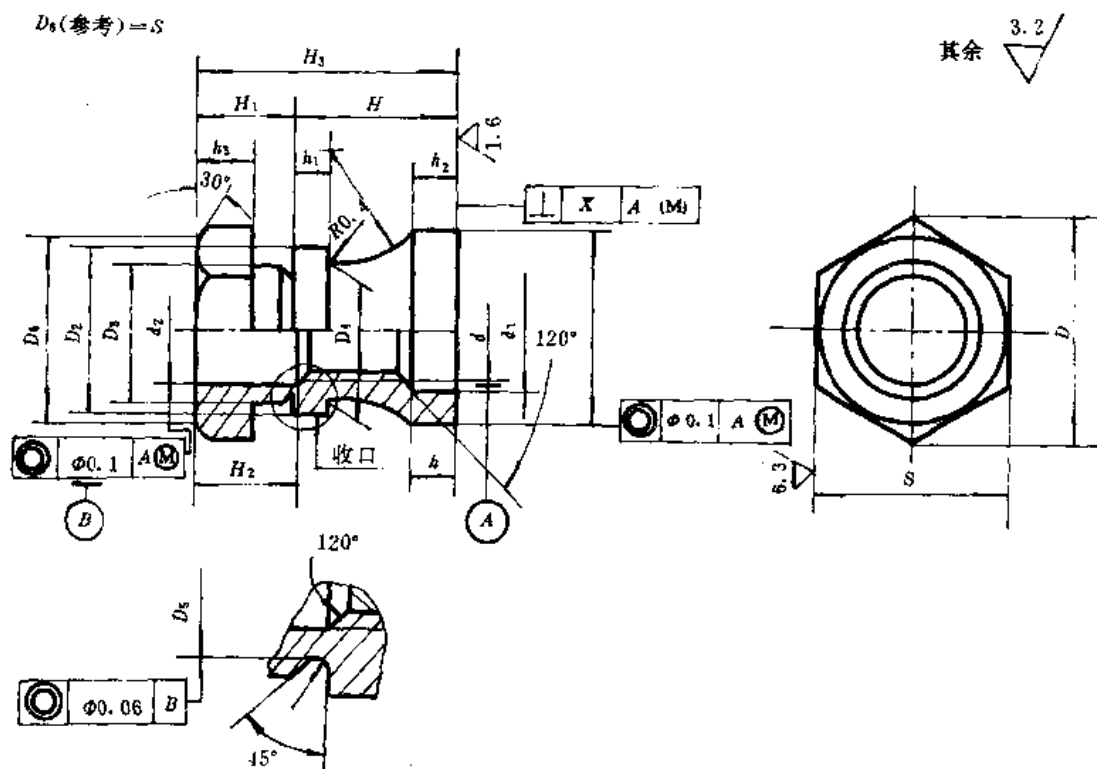


图 11.8 高锁螺母

表 11.24 特征尺寸(一)

(mm)

d	d_1 H11	d_2		D min	D_1 h11	D_2 h10	D_3	D_4	D_5		H		$H1$		H_2	
		基本尺寸	极限偏差						基本尺寸	极限偏差	基本尺寸	极限偏差	基本尺寸	极限偏差	基本尺寸	极限偏差
MJ5×0.8	5.4	5.15		10.0	8.4	7.5	6.7	6.6	5.65		7.5		4.5		4.6	
MJ6×1	6.4	6.15	+0.05	11.2	10.0	9.0	7.5	7.6	6.80	0	8.5		5.0	0	5.1	-0.2
MJ8×1	8.4	8.15	0	15.8	14.0	12.0	10.0	10.7	9.03	-0.05	11.0	±0.2	6.0	-0.2	6.1	0
MJ10×1.25	10.4	10.20		19.2	17.0	15.0	12.5	13.0	11.10		12.5		7.0		7.1	

表 11.24 特征尺寸(二)

d	$H3$ (参考)	R_2		h_1				h_3	X	S	T	R (参考)	D_2 收口后尺寸	
		基本尺寸	极限偏差	基本尺寸	极限偏差	基本尺寸	极限偏差						基本尺寸	极限偏差
MJ5×0.8	12.0	2.5		1.5		2.5		2.5	0.12	0	0.25	7.2	7.00	
MJ6×1	13.5	2.6	+0.25	1.8	±0.15	2.6	+0.25	3.0		10	0.25	7.6	8.46	
MJ8×1	17.0	3.0	0	2.2		3.0	0	3.5		14	0.30	11.0	11.46	±0.06
MJ10×1.25	19.5	3.2		2.5		3.0		4.0	0.15	17	0.30	13.2	14.44	

表 11.25 力矩特性和理论质量

d	锁紧力矩 N·m	拧断力矩 N·m	100 件理论质量 kg	
			安 装 前	安 装 后
MJ5×0.8	0.49—0.98	1.96—2.94	0.105	0.056
MJ6×1	0.88—1.47	4.15—6.08	0.137	0.086
MJ8×1	2.25—3.43	12.25—15.68	0.352	0.213
MJ10×1.25	2.74—4.41	19.60—25.48	0.575	0.363

表面处理:蓝色阳极化;

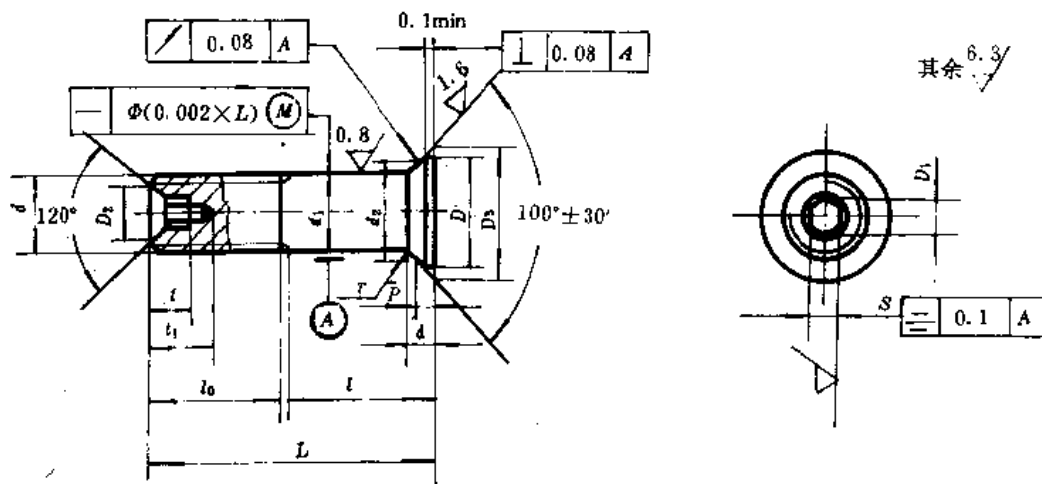
润 滑：十六醇；

技术条件按 GB134.6—86。

2.2.2 光纤公率带 r

11.2.2.2 光杆公差带 r9 抗剪型 100°沉头钛合金高锁螺栓(HB6509—91)

光杆公差带 r9 高锁螺栓结构见图 11.9。特征尺寸见表 11.26、11.27。理论质量见表 11.28。



标记示例: $d_1=5\text{mm}$, $L=30\text{mm}$ 的高锁螺栓 HB6509.5 $\times$ 30

图 11.9 光杆公差带 r9 抗剪型 100°沉头钛合金高锁螺栓

表 11.26 特征尺寸(一)

(mm)

d_1 r9	d	$d_2^{(1)}$	D min	D_1 min	D_2	D_3 (参考)	H (参考)	L_0 (参考)
5	MJ5×0.8	5.79	6.8	2.3	2.5	7.8	1.18	7.5
6	MJ6×1	7.71	8.2	2.9	3.1	9.4	1.43	8.0
8	MJ8×1	10.28	11.3	3.5	4.0	12.5	1.90	11.0
10	MJ10×1.25	12.86	14.4	4.6	5.0	15.6	2.36	12.5

注:1)供测量用。

表 11.26 特征尺寸(二)

d_1 r3	P		t min	t_1 max	S		r	
	max	min			基本尺寸	极限偏差	max	min
5	0.85	0.77	2.5	4	2	+0.06 +0.02	0.5	0.5
6	0.71	0.63	3.2	5	2.5	+0.08 0.02	0.7	0.5
8	0.93	0.85	4.0	6	3	+0.10 +0.02	0.7	0.5
10	1.15	1.07	5.0	7	4	+0.12 +0.03	0.8	0.6

表 11.27 特征尺寸

(mm)

d_1 L		5	6	8	10
基本尺寸	极限偏差	l			
		极 限 偏 差			
		0 -0.30	0 -0.35	0 -0.40	0 -0.50
14	± 0.20	5			
16		7	6		
18		9	8		
20		11	10	7	
22		13	12	9	
24	± 0.25	15	14	11	9
26		17	16	13	11
28		19	18	15	13
30		21	20	17	15
32		23	22	19	17
34		25	24	21	19
36		27	26	23	21
38		29	28	25	23
40		31	30	27	25
42		33	32	29	27
44			34	31	29
46			36	33	31
48			38	35	33
50			40	37	35
52	± 0.30			9	37
54				1	39
56				3	41
58				5	43
60				7	45

注:根据需要,可以选用粗线以外较长螺栓,其间隔取 2mm。

表 11.28 螺栓质量

d_1 (mm)	5	6	8	10
L (mm)	100 件 螺 栓 理 论 质 量 kg			
14	0.0829			
16	0.1003	0.1643		
18	0.1179	0.1891		
20	0.1354	0.2140	0.3679	
22	0.1529	0.2374	0.4121	
24	0.1704	0.2638	0.4563	0.7155
26	0.1879	0.2896	0.5005	0.7856
28	0.2054	0.3136	0.5449	0.8558
30	0.2229	0.3384	0.5880	0.9259
32	0.2404	0.3633	0.6333	0.9960
34	0.2579	0.3882	0.6775	1.0661
36	0.2754	0.4108	0.7217	1.1362
38	0.2929	0.4380	0.7659	1.2063
40	0.3104	0.4638	0.8101	1.2764
42	0.3279	0.4878	0.8543	1.3465
44		0.5086	0.8985	1.4166
46		0.5375	0.9427	1.4867
48		0.5624	0.9869	1.5569
50		0.5873	1.0311	1.6270
52			1.0753	1.6971
54			1.1195	1.7672
56			1.1637	1.8373
58			1.2084	1.9074
60			1.2522	1.9775

材 料:TC4。

热 处 理: $\sigma_b=1175\pm 100\text{MPa}$ 。

表面处理:蓝色阳极化。

技术条件按 HB6568-92。

11.2.2.3 光杆公差带 f9 抗剪型 100°沉头钛合金高锁螺栓(HB6510-91)

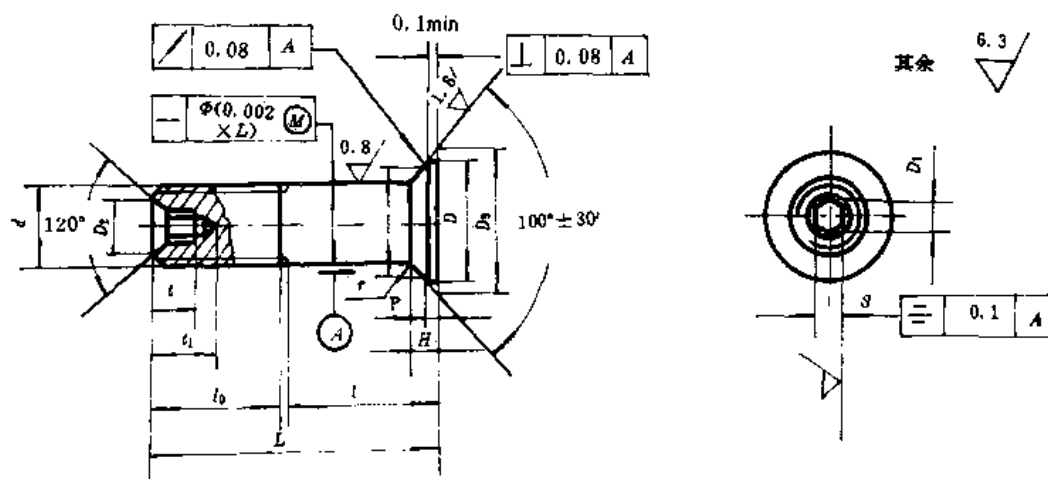
光杆公差带 f9 高锁螺栓结构见图 11.10,特征尺寸见表 11.29,螺栓质量见表 11.30。

表 11.29 特征尺寸(一)

(mm)

d_1	d	$d_2^{(1)}$	D	D_1	D_2	D_3	H	L_0
f9			min	min		(参考)	(参考)	(参考)
5	MJ5×0.8	5.79	6.8	2.3	2.5	7.8	1.18	7.5
6	MJ6×1	7.71	8.2	2.9	3.1	9.4	1.43	8.0
8	MJ8×1	10.28	11.3	3.5	4.0	12.5	1.90	11.0
10	MJ10×1.25	12.86	14.3	4.6	5.0	15.6	2.36	12.5

注:1)供测量用。



标记示例: $d=5\text{mm}$, $L=30\text{mm}$ 的高锁螺栓 HB6510.5×30

图 11.10 光杆公差带 f9 抗剪型 100°沉头钛合金锁螺栓

表 11.29 特征尺寸(二)

(mm)

d_1	P		t	t_1	S		r	
	max	min	min	max	基本尺寸	极限偏差	max	min
f9								
5	0.85	0.77	2.5	4	2	+0.06 +0.02	0.5	0.3
6	0.71	0.63	3.2	5	2.5	+0.08 0.02	0.7	0.5
8	0.93	0.85	4.0	6	3	+0.10 +0.02	0.7	0.5
10	1.15	1.07	5.0	7	4	+0.12 +0.03	0.8	0.6

表 11.30 特征尺寸

(mm)

d_1		5	6	8	10
L		t			
基本尺寸	极限偏差	极 限 偏 差			
		0	0	0	0
		-0.30	-0.35	-0.40	-0.50
14	± 0.20	5			
16		7	6		
18		9	8		
20		11	10	7	
22		13	12	9	

表 11.30(续)

d_1		5	6	8	10
L		l			
基本尺寸	极限偏差	极 限 偏 差			
		0 -0.30	0 -0.35	0 -0.40	0 -0.50
24	±0.25	15	14	11	9
26		17	16	13	11
28		19	18	15	13
30		21	20	17	15
32		23	22	19	17
34		25	24	21	19
36		27	26	23	21
38		29	28	25	23
40		31	30	27	25
42		33	32	29	27
44			34	31	29
46			36	33	31
48			38	35	33
50			40	37	35
52	±0.30			39	37
54				41	39
56				43	41
58				45	43
60				47	45

注:根据需要,可以选用粗线以外较长螺栓,其间隔取2mm。

表 11.31 螺栓质量

d_1 (mm)	5	6	8	10
L (mm)	100 件 螺 栓 理 论 质 量 kg			
14	0.0829			
16	0.1003	0.1643		
18	0.1179	0.1891		
20	0.1354	0.2140	0.3679	
22	0.1529	0.2374	0.4121	
24	0.1704	0.2638	0.4563	0.7155
26	0.1879	0.2896	0.5005	0.7856
28	0.2054	0.3136	0.5449	0.8558
30	0.2229	0.3384	0.5880	0.9259
32	0.2404	0.3633	0.6333	0.9960
34	0.2579	0.3882	0.6775	1.0661
36	0.2754	0.4108	0.7217	1.1362
38	0.2929	0.4380	0.7659	1.2063

表 11.31(续)

d_1 (mm)	5	6	8	10
L (mm)	100 件 螺 栓 理 论 质 量 kg			
40	0.3104	0.4638	0.8101	1.2764
42	0.3279	0.4878	0.8543	1.3465
44		0.5086	0.8985	1.4166
46		0.5375	0.9427	1.4867
48		0.5624	0.9869	1.5569
50		0.5873	0.9743	1.6270
52			1.0753	1.6971
54			1.1195	1.7672
56			1.1637	1.8373
58			1.2084	1.9074
60			1.2522	1.9775

材 料: TC4。

热 处 理: $\sigma_b = 1175 \pm 100 \text{ MPa}$ 。

表面处理: 蓝色阳极化。

技术条件按 HB6568-92。

11.2.2.4 光杆公差带 r6 抗剪型平头钛合金高锁螺栓(HB6511-91)

光杆公差带 r6 抗剪型平头钛合金高锁螺栓结构见图 11.11, 特征尺寸见表 11.32 ~ 11.33, 螺栓质量见表 11.34。

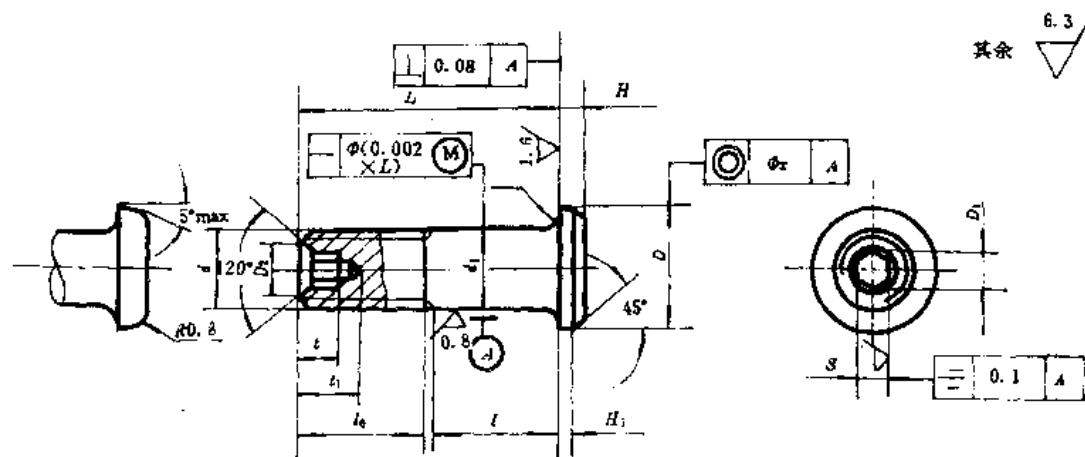
标记示例: $d=6\text{mm}$, $L=30\text{mm}$ 高锁螺栓 HB6511-6×30

图 11.11 光杆公差带 r6 抗剪型平头钛合金高锁螺栓

表 11.32 特征尺寸

(mm)

d_1 r6	d	D h12	D_1 min	D_2	H		H_1	l_0 (参考)	t min	t_1 max	S		基本尺寸	极限偏差	r	基本尺寸	极限偏差	x
					基本尺寸	极限偏差					基本尺寸	极限偏差						
5	MJ5×0.8	8.0	2.3	2.5	1.5	0 -0.2	0.8	7.5	2.5	4	2.0	+0.06 +0.02	0.5	±0.2		0.12		0.12
6	MJ6×1	9.5	2.9	3.1	1.8		1.0	8.0	3.2	5	2.5	+0.08 +0.02	0.5					
8	MJ8×1	12.3	3.5	4.0	2.0		1.4	11.0	4.0	6	3.0	+0.10 +0.02	0.8					
10	MJ10×1.25	15.5	4.6	5.0	2.3		1.5	12.5	5.0	7	4.0	+0.12 +0.03	0.8					

表 11.33 特征尺寸

(mm)

d_1		L			
		5	6	8	10
基本尺寸	极限偏差	l			
		极 限 偏 差			
		0 -0.30	0 -0.35	0 -0.40	0 -0.50
14	±0.20	5			
16		7	6		
18		9	8		
20		11	10	7	
22		13	12	9	
24	±0.25	15	14	11	9
26		17	16	13	11
28		19	18	15	13
30		21	20	17	15
32		23	22	19	17
34		25	24	21	19
36		27	26	23	21
38		29	28	25	23
40		31	30	27	25
42		33	32	29	27
44			34	31	29
46			36	33	31
48	±0.30		38	35	33
50			40	37	35
52				39	37
54				41	39
56				43	41
58				45	43
60				47	45

注: 根据需要, 可以选用粗线以外较长螺栓, 其间隔取 2mm。

表 11.34 螺栓质量

d_1 (mm)	5	6	8	10
l (mm)	100 件 螺 栓 理 论 质 量 kg			
14	0.1134			
16	0.1309	0.2073		
18	0.1484	0.2322		
20	0.1659	0.2571	0.4529	
22	0.1834	0.2820	0.4971	
24	0.2009	0.3069	0.5413	0.8755
26	0.2184	0.3317	0.5855	0.9456
28	0.2359	0.3566	0.6299	1.0157
30	0.2534	0.3815	0.6741	1.0858
32	0.2720	0.4067	0.7183	1.1559
34	0.2884	0.4313	0.7625	1.2260
36	0.3059	0.4562	0.8067	1.2961
38	0.3234	0.4811	0.8509	1.3662
40	0.3409	0.5059	0.8951	1.4363
42	0.3584	0.5308	0.9393	1.5065
44		0.5557	0.9835	1.5766
46		0.5806	1.0277	1.6467
48		0.6055	1.0719	1.7168
50		0.6283	1.1161	1.7869
52			1.1603	1.8570
54			1.2045	1.9271
56			1.2487	1.9972
58			1.2929	2.0673
60			1.3371	2.1374

材 料:TC4。

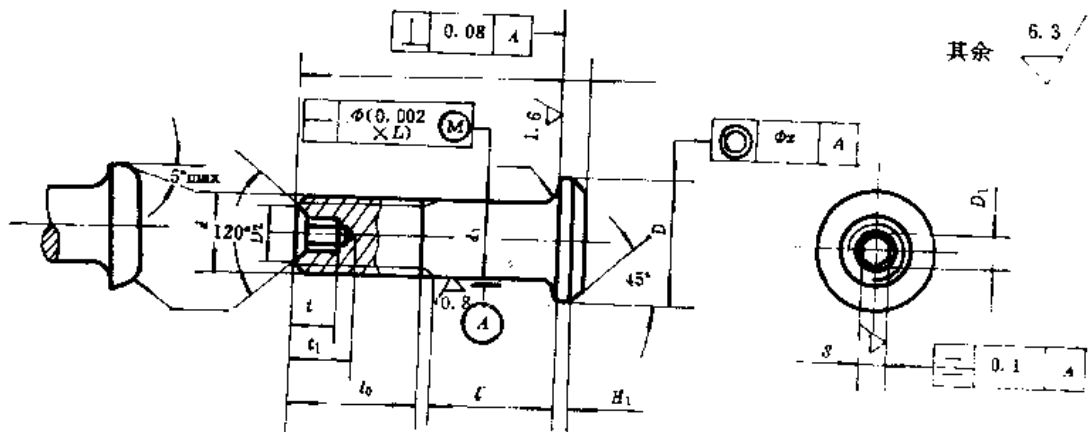
热 处 理: $\sigma_b=1175\pm 100\text{MPa}$ 。

表面处理:蓝色阳极化。

技术条件按 HB6568-92。

11.2.2.5 光杆公差带 f9 抗剪型平头钛合金高锁螺栓(HB6512-91)

光杆公差带 f9 抗剪型平头钛合金高锁螺栓结构见图 11.12,特征尺寸见表 11.35~11.36,螺栓质量见表 11.37。



标记示例: $d_1=6\text{mm}$, $l=30\text{mm}$ 的高锁螺栓 HB6512.6 $\times$ 30
图 11.12 光杆公差带 f9 抗剪型平头钛合金高锁螺栓

表 11.35 特征尺寸

(mm)

表 11.55 特征尺寸															(mm)
d_1 r6	d	D h12	D_1 min	D_2	H		H_1	l_0 (参考)	t min	t_1 max	S		r		r
					基本 尺寸	极限 偏差					基本 尺寸	极限 偏差	基本 尺寸	极限 偏差	
5	MJ5×0.8	8.0	2.3	2.5	1.5	0 -0.2	0.8	7.5	2.5	4	2.0	+0.06 +0.02	0.5	±0.2	0.12
6	MJ6×1	9.5	2.9	3.1	1.8		1.0	8.0	3.2	5	2.5	+0.08 +0.02	0.5		0.14
8	MJ8×1	12.3	3.5	4.0	2.0		1.4	11.0	4.0	6	3.0	+0.10 +0.02	0.8		0.20
10	MJ10×1.25	15.5	4.6	5.0	2.3		1.5	12.5	5.0	7	4.0	+0.12 +0.03	0.8		0.24

表 11.36 特征尺寸

(mm)

d_1		l			
L		5	6	8	10
基本尺寸	极限偏差	l			
		极 限 偏 差			
		0 -0.30	0 -0.35	0 -0.40	0 -0.50
14	± 0.20	5			
16		7	6		
18		9	8		
20		11	10	7	
22		13	12	9	

表 11.36(续)

d_1		5	6	8	10
L					
基本尺寸	极限偏差	l			
		极 限 偏 差			
		0 -0.30	0 -0.35	0 -0.40	0 -0.50
24	±0.25	15	14	11	9
26		17	*16	13	11
28		19	18	15	13
30		21	20	17	15
32		23	22	19	17
34		25	24	21	19
36		27	26	23	21
38		29	28	25	23
40		31	30	27	25
42		33	32	29	27
44			34	31	29
46			36	33	31
48			38	35	33
50			40	37	35
52	±0.30			39	37
54				41	39
56				43	41
58				45	43
60				47	45

注: 根据需要, 可以选用粗线以外较长螺栓, 其间隔取 2mm。

表 11.37 螺栓质量

$d_1(\text{mm})$	5	6	8	10
$L(\text{mm})$	100 件 螺 栓 理 论 质 量 kg			
14	0.1134			
16	0.1309	0.2073		
18	0.1484	0.2322		
20	0.1659	0.2571	0.4529	
22	0.1834	0.2820	0.4971	
24	0.2009	0.3069	0.5413	0.8755
26	0.2184	0.3317	0.5855	0.9456
28	0.2359	0.3566	0.6299	1.0157
30	0.2534	0.3815	0.6741	1.0858
32	0.2720	0.4067	0.7183	1.1559
34	0.2884	0.4313	0.7625	1.2260
36	0.3059	0.4562	0.8067	1.2961
38	0.3234	0.4811	0.8509	1.3662

表 11.37(续)

d_1 (mm)	5	6	8	10
L (mm)	100 件 螺 栓 理 论 质 量 kg			
40	0.3409	0.5059	0.8951	1.4363
42	0.3584	0.5308	0.9393	1.5065
44		0.5557	0.9835	1.5766
46		0.5806	1.0277	1.6467
48		0.6055	1.0719	1.7168
50		0.6283	1.1161	1.7869
52			1.1603	1.8570
54			1.2045	1.9271
56			1.2487	1.9972
58			1.2929	2.0673
60			1.3371	2.1374

材 料: TC4。

热 处 理: $\sigma_b = 1175 \pm 100 \text{ MPa}$ 。

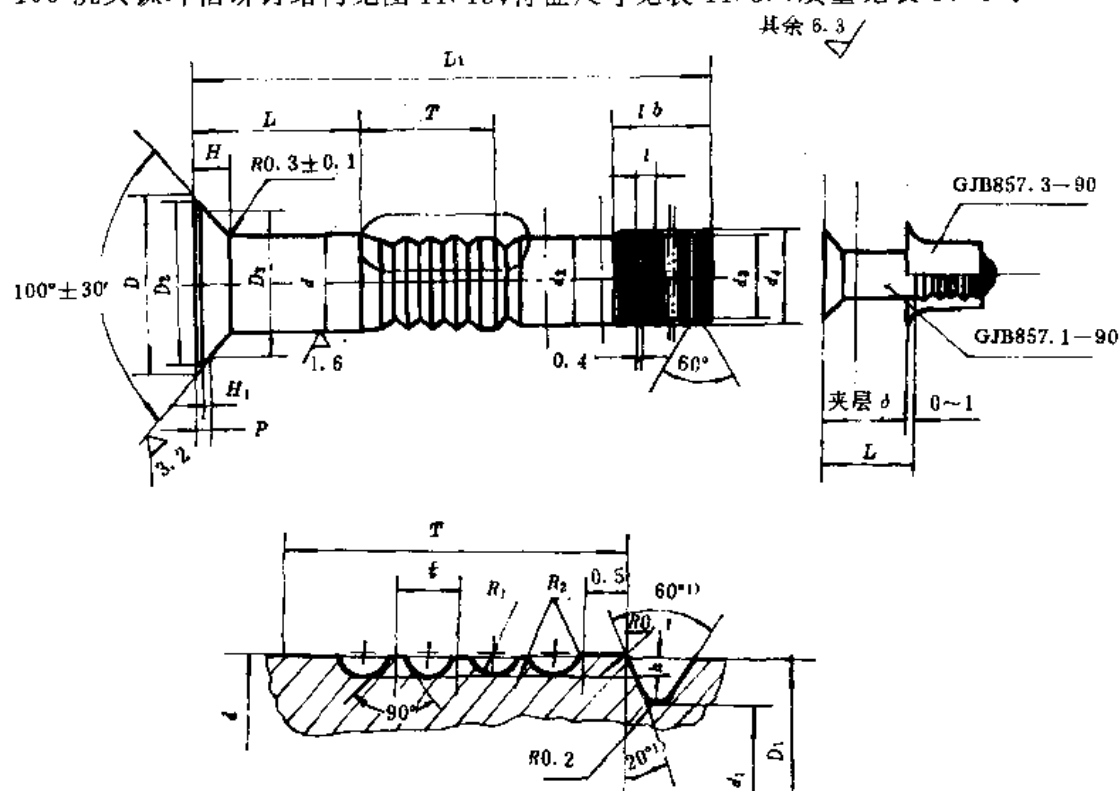
表面处理: 蓝色阳极化。

技术条件按 HB6568-92。

11.2.3 抗拉型钛合金环槽铆钉

11.2.3.1 100°沉头抗拉钛环槽铆钉(GJB857.1-90)

100°沉头钛环槽铆钉结构见图 11.13, 特征尺寸见表 11.39, 质量见表 11.40。



供模具设计用, 在零件上不检查。

图 11.13 100°沉头抗拉钛环槽铆钉

表 11.38 材料状态和标记示例

材 料	热 处 理	表面 处 理	标 记 示 例	配 套 钉 套 标 记
TB2-1	/	阳极化	$d=5\text{mm}$ $L=10\text{mm}$ GJB857.5×10	GJB857.3.5

表 11.39 特征尺寸(一)

(mm)

d		d_1		d_2	d_3	d_4	D	D_1		H
基本尺寸	极限偏差	基本尺寸	极限偏差				(参考)	基本尺寸	极限偏差	(参考)
3	± 0.02	2.20	0 -0.1	2.10	2.6	2.9	5.55	2.9	0 -0.1	1.07
3.5		2.40		3.15	3.1	3.4	6.50	3.4		1.25
4		2.45		3.65	3.4	3.7	7.40	3.9		1.43

表 11.39 特征尺寸(二)

(mm)

d		h		t		T		R_1		R_2
基本尺寸	极限偏差	基本尺寸	极限偏差	基本尺寸	极限偏差	基本尺寸	极限偏差	基本尺寸	极限偏差	
3	± 0.02	0.20	± 0.03	0.71	± 0.05	3.9	± 0.10	0.25	± 0.05	0.10
3.5		0.25		0.87		4.5		0.30		0.125
4		0.30		1.00		5.5		0.35		0.15

表 11.39 特征尺寸(三)

(mm)

d		D_2	D_3^p	H_1	P	
基本尺寸	极限偏差	min		min	max	min
3	± 0.02	4.95	4.50	0.06	0.44	0.36
3.5		5.80	5.14	0.01	0.56	0.48
4		6.60	5.18	0.08	0.68	0.60

注:1)供测量用。

 L 按设计要求取整数 $\delta \leq L < \delta + 1$;钉杆总长 $L_1 = L + T + 24$;

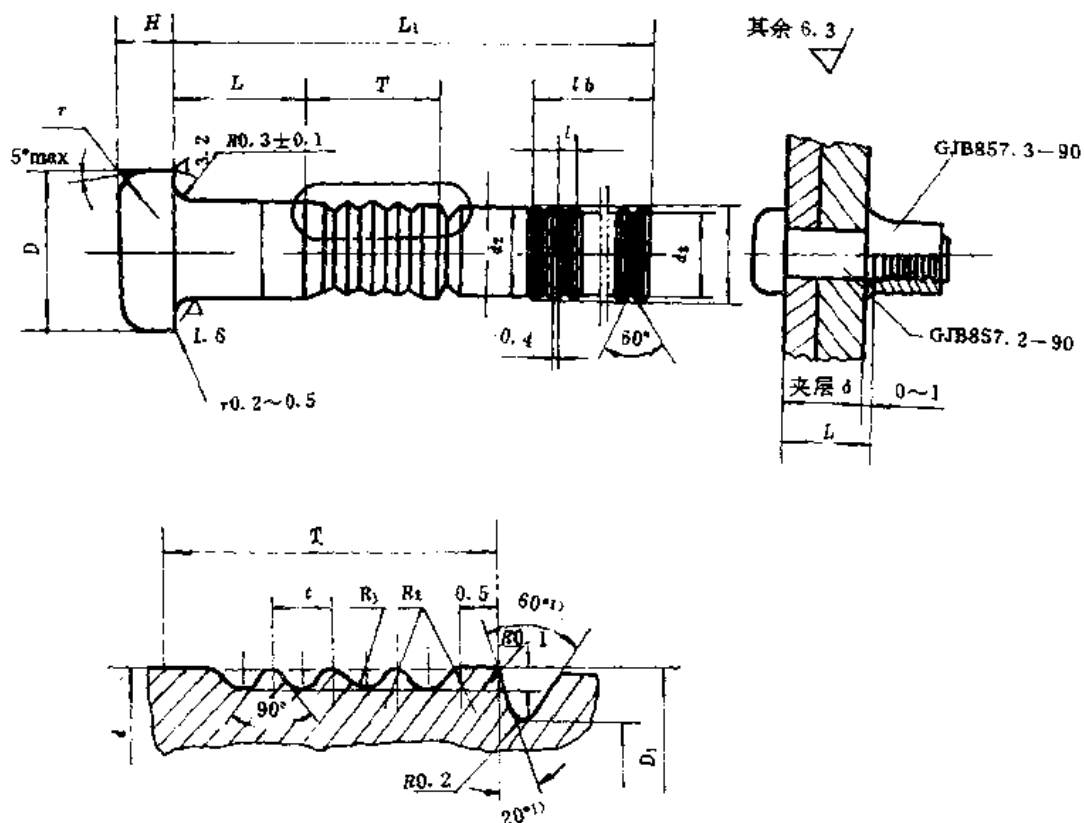
技术条件按 GJB856-90。

表 11.40 铆钉质量

d (mm)		3	3.5	4
每 100 件尾部理论质量 kg		0.067	0.089	0.121
L (mm)		每 100 件头部、光杆和环槽部分理论质量 kg		
基本尺寸	极限偏差			
3	$+0.2$ 0	0.0250	0.0402	0.0605
4		0.0283	0.0441	0.0664
5		0.0316	0.0492	0.0723
6		0.0349	0.0537	0.0782
7		0.0382	0.0582	0.0841
8		0.0415	0.0627	0.0900

11.2.3.2 平头抗拉钛环槽铆钉(GJB857.2-90)

平头钛环槽铆钉结构见图 11.14,特征尺寸见表 11.42,质量见表 11.43。



注：供模具设计用，在零件上不检查。

图 11.14 平头抗拉钛环槽铆钉

表 11.41 材料状态和标记示例

材 料	热 处 理	表 面 处 理	标 记 示 例	配 套 钉 套 标 记
TB2-1	/	阳极化	$d=5\text{mm}$ $L=10\text{mm}$ GJB857.5×10	GJB857.3.5

表 11.42 特征尺寸(一)

(mm)

d		d_1		d_2	d_3	d_4	D		D_1		H	
基本尺寸	极限偏差	基本尺寸	极限偏差				max	min	基本尺寸	极限偏差	max	min
3	±0.02	2.20	0	2.70	2.6	2.9	6	5.7	2.9	0	1.8	1.6
3.5		2.40		3.15	3.1	3.4	7	6.1	3.4		2.1	1.9
4		2.45		3.65	3.4	3.7	8	7.7	3.9		2.4	2.2

表 11.42 特征尺寸(二)

(mm)

d		h		l		T		r		R_1		R_2
基本尺寸	极限偏差	基本尺寸	极限偏差	基本尺寸	极限偏差	基本尺寸	极限偏差	max	min	基本尺寸	极限偏差	
3	±0.02	0.20	±0.03	0.71	±0.05	3.9	±0.10	1.2	0.3	0.25	±0.05	0.10
3.5		0.25		0.87		4.5		1.4	0.4	0.30		0.125
4		0.30		1.00		5.5		1.6		0.35		0.15

L 按设计要求取整数 $\delta \leq L \leq \delta + 1$ ，钉杆总长 $L_1 = L + T + 2.4$ ，技术条件按 GJB856-90。

表 11.43 铆钉质量

d (mm)		3	3.5	4
每 100 件尾部理论质量 kg		0.061	0.089	0.121
L (mm)		每 100 件头部, 光杆和环槽部分理论质量 kg		
基本尺寸	极限偏差			
3	$+0.2$ 0	0.0508	0.0862	0.1282
4		0.0541	0.0908	0.1341
5		0.0574	0.0954	0.1400
6		0.0601	0.1000	1.1454
7		0.0640	0.1046	0.1518
8		0.0673	0.1092	0.1577

11.2.3.3 抗拉型环槽铆钉钉套(GJB857.3—90)

环槽铆钉钉套结构见图 11.15,特征尺寸和质量见表 11.45。

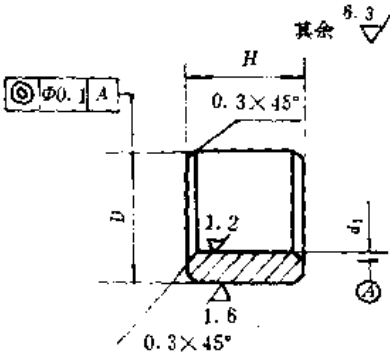


图 11.15 抗拉型环槽铆钉钉套

表 11.44 材料状态和标记示例

材 料	热 处 理	表面 处 理	标 记 示 例	配 套 钉 套 标 记
LY9	淬火时效	绿色阳极化	$d \approx 5\text{mm}$ GJB857.3.5	GJB857.1. $d \times L$ GJB857.2 $d \times L$

表 11.45 特征尺寸和铆钉质量

铆钉直径 d (mm)	d_1 (mm)		D (mm)		H (mm)	每 100 件理论质量 kg
	基本尺寸	极限偏差	基本尺寸	极限偏差		
3	2.9	± 0.1 0	5.2	± 0.05	3.9	0.0154
3.5	3.4		5.8		4.5	0.0208
4	5.9		6.6		5.5	0.0316

11.2.4 钛铆钉

11.2.4.1 TB2-1 钛合金铆钉(GJB120.1~120.4-86)

TB2-1 钛合金铆钉结构见图 11.16,特征尺寸见表 11.46~11.49,质量和单剪强度见表 11.50~11.51。

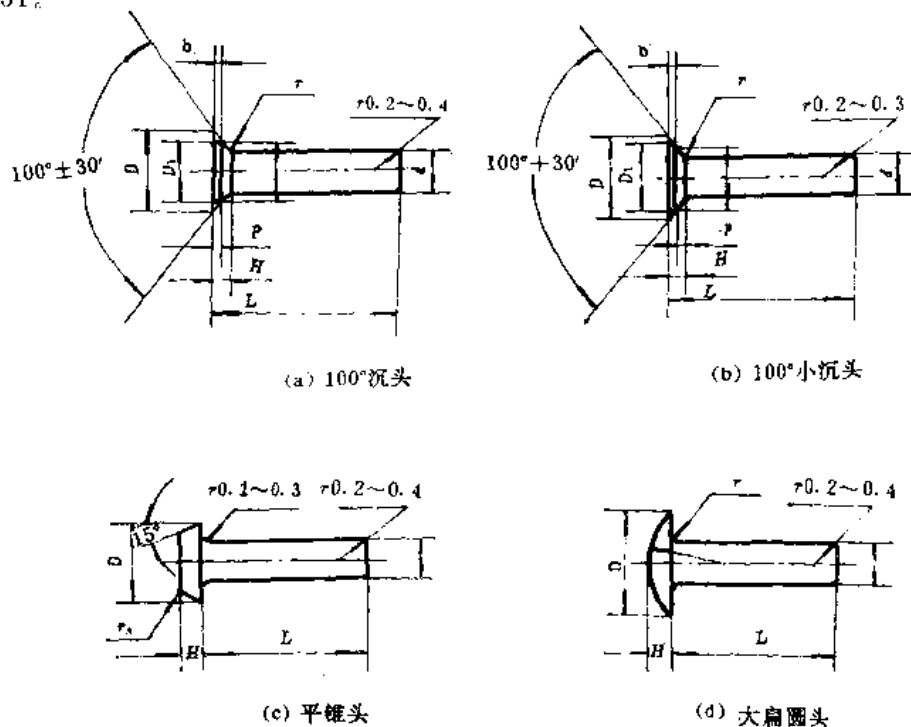


图 11.16 4 种 TB2-1 钛合金铆钉

表 11.46 100°小沉头铆钉特征尺寸

(mm)

d		D	D_1	D_2^0	N	b	p		r	
基本尺寸	极限偏差	(参考)	(最小)		(参考)	(最小)	最大	最小	最大	最小
2.5	+0.05 0	3.90	3.40	2.89	0.59	0.05	0.42	0.34	0.23	0.07
3		4.70	4.10	3.54	0.72	0.06	0.49	0.41	0.23	0.07
3.5		5.50	4.80	4.18	0.84	0.07	0.55	0.47	0.33	0.17
4		6.25	5.45	4.82	0.95	0.08	0.60	0.52	0.33	0.17

① 供测量用。

表 11.47 100°沉头铆钉特征尺寸

(mm)

d		D	D_1	D_2^0	N	b	p		r	
基本尺寸	极限偏差	(参考)	(最小)		(参考)	(最小)	最大	最小	最大	最小
2.5	+0.05 0	4.65	4.15	3.86	0.91	0.05	0.33	0.25	0.23	0.07
3		5.55	4.95	4.50	1.07	0.06	0.44	0.36	0.23	0.07
3.5		6.50	5.80	5.14	1.26	0.07	0.57	0.49	0.33	0.17
4		7.40	6.60	5.78	1.43	0.08	0.68	0.60	0.33	0.17

① 供测量用。

表 11.48 平锥头钛合金铆钉特征尺寸

(mm)

d		D		H		r_1
基本尺寸	极限偏差	基本尺寸	极限偏差	基本尺寸	极限偏差	max
2.5	+0.05 0	4.5	± 0.24	1.3	± 0.2	0.7
3		5.4		1.5		
3.5		6.3	± 0.29	1.8		1
4		7.2		2		

表 11.49 大扁圆头钛合金铆钉特征尺寸

(mm)

d		D		H		R	r_1
基本尺寸	极限偏差	基本尺寸	极限偏差	基本尺寸	极限偏差		
2.5	+0.05 0	6.2	± 0.29	1.2	± 0.20	4.7	0.1~0.3
3		7.2		1.4		5.4	0.2~0.4
3.5		8.5		1.7		6.3	
4		9.6		1.9		7.3	

表 11.50 单剪强度

d (mm)	2.5	3	3.5	4
最小单剪破坏力(kN)	3.03	4.36	5.94	7.76

表 11.51 TB2-1 钛铆钉质量

d (mm)		2.5	3	3.5	4
L (mm)					
基本尺寸	极限偏差	100 件 钛 铆 钉 的 理 论 质 量 (kg)			
6	± 0.24	0.210	0.316		
6		0.234	0.351	0.524	0.713
7	± 0.29	0.257	0.385	0.571	0.774
8		0.281	0.419	0.617	0.835
9		0.305	0.454	0.664	0.895
10		0.328	0.488	0.710	0.956
11	± 0.35	0.352	0.522	0.756	1.017
12		0.376	0.556	0.803	1.078
13		0.399	0.591	0.849	1.139
14		0.423	0.625	0.895	1.200
15		0.447	0.659	0.942	1.261
16		0.470	0.694	0.988	1.321
17		0.494	0.728	1.034	1.382
18		0.518	0.762	1.081	1.443

表 11.51(续)

$d(\text{mm})$		2.5	3	3.5	4
$L(\text{mm})$					
基本尺寸	极限偏差	100 件 钛 铆 钉 的 理 论 质 量 (kg)			
19	± 0.42		0.796	1.127	1.504
20			0.831	1.174	1.565
21				1.220	1.626
22				1.266	1.687
23					1.747
24					1.808
25					1.869
26					1.930

注:技术条件按 GJB120.5-86。

11.2.4.2 TA1 纯钛铆钉 (HB6478)

100°沉头 TA1 纯钛铆钉结构及特征尺寸见图 11.16a 及表 11.47, 单剪强度及质量见表 11.52 及表 11.53。

表 11.52 TA1 纯钛铆钉单剪强度

$d(\text{mm})$	2.5	3	3.5	4
最小单剪破坏力(kN)	1.955	2.815	3.831	5.004

表 11.53 TA1 纯钛铆钉质量

$d(\text{mm})$		2.5	3	3.5	4
$L(\text{mm})$					
基本尺寸	极限偏差	100 件 钛 铆 钉 的 理 论 质 量 (kg)			
6	± 0.24	0.190	0.295		
6		0.218	0.328	0.481	0.666
7	± 0.29	0.240	0.359	0.533	0.723
8		0.262	0.391	0.576	0.780
9		0.285	0.424	0.620	0.836
10		0.306	0.456	0.663	0.893
11	± 0.35	0.329	0.487	0.706	0.950
12		0.351	0.519	0.750	1.007
13		0.373	0.552	0.793	1.064
14		0.395	0.584	0.836	1.121
15		0.417	0.615	0.886	1.177
16		0.439	0.648	0.923	1.233
17		0.461	0.680	0.965	1.290
18		0.484	0.712	1.009	1.347

表 11.53(续)

$d(\text{mm})$		2.5	3	3.5	4
$L(\text{mm})$	极限偏差	100 件 钛 铆 钉 的 理 论 质 量 (kg)			
19	± 0.42		0.743	1.052	1.404
20			0.776	1.096	1.461
21				1.139	1.518
22				1.182	1.575
23					1.631
24					1.688
25					1.745
26					1.802

注:技术条件按 GJB120.5-86。

11.2.5 Monogram 公司大底脚螺纹抽钉

图 11.17 至图 11.19 为六角头(MBF2011 系列)、100°沉头(MBF2012 系列)、130°沉头(MBF2013 系列)大底脚螺纹抽钉图。表 11.54 至表 11.57 是这三种抽钉的特征尺寸及夹层厚度。表 11.58 及表 11.59 是力学特性及质量表。

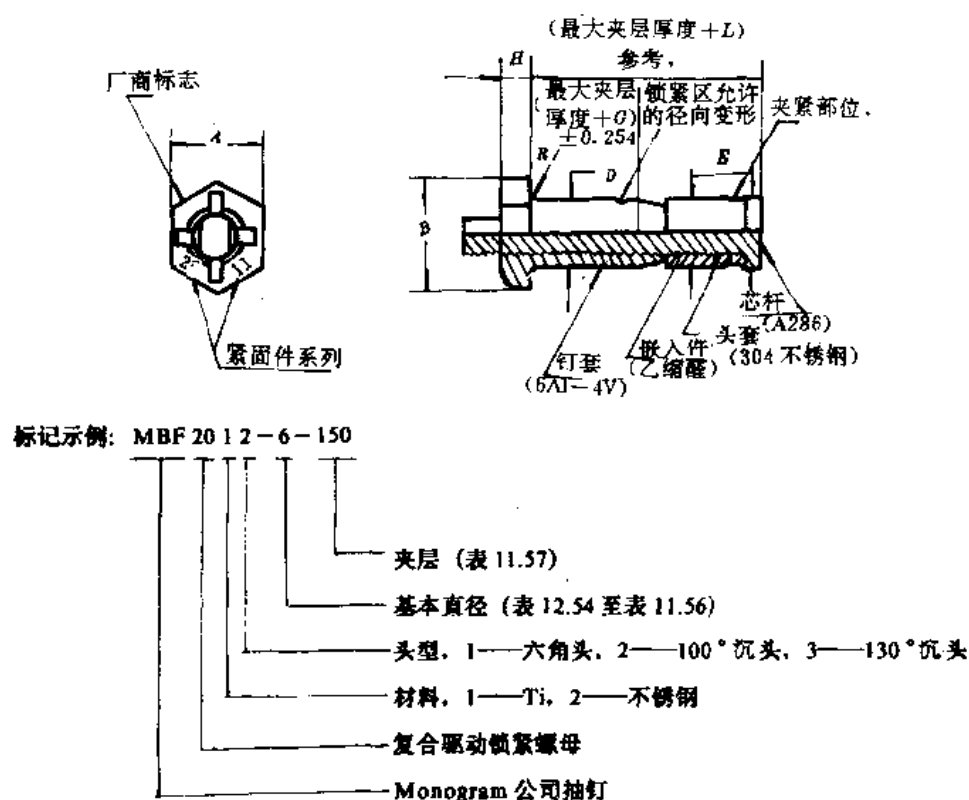


图 11.17 六角头螺纹抽钉

表 11.54 六角头螺纹抽钉特征尺寸

(mm)

紧 固 件 号	A 直径 (理论)	A' 直径 (最小)	D 直径	E 直径 (最大)	G (参考)	H (参考)	L (参考)	R 半径 (最大)
MBF2011-05-()	6.350 6.198	6.909	4.163 4.128	4.156	0.432	1.778	11.430	0.762
MBF2011-06-()	7.925 7.747	8.636	5.042 5.004	5.042	0.559	2.032	14.173	0.762
MBF2011-07-()	8.712 8.534	9.525	5.779 5.740	5.779	0.889	2.032	15.510	0.672
MBF2011-08-()	9.525 9.322	10.389	6.591 6.553	6.591	1.321	2.286	17.577	0.762
MBF2011-09-()	10.312 10.109	11.278	7.353 7.315	7.353		2.286		0.762
MBF2011-10-()	11.100 10.897	12.167	7.899 7.861	7.899		2.794		1.016
MBF2011-11-()	11.887 11.684	13.030	8.720 8.682	8.720		2.794		1.0116
MBF2011-12-()	12.700 12.471	13.919	9.500 9.462	9.500		3.302		1.016

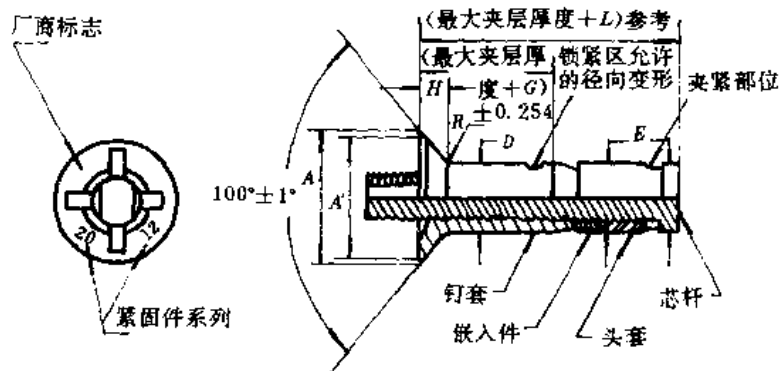


图 11.18 100°沉头拉伸型螺纹抽钉

表 11.55 100°沉头拉伸型螺纹抽钉特征尺寸

(mm)

紧 固 件 号	A 直径 (理论)	A' 直径 (最小)	D 直径	E 直径 (最大)	G (参考)	H (参考)	L (参考)	R 半径 (最大)
MBF2012-05-()	8.255 8.134	7.518	4.166 4.128	4.166	0.432	1.778	11.430	0.762
MBF2012-06-()	9.271 9.601	8.687	5.042 5.004	5.042	0.559	1.956	14.173	0.762
MBF2012-07-()	10.566 10.389	9.474	5.779 5.740	5.779	0.889	1.956	16.510	0.762
MBF2012-08-()	12.878 12.675	11.760	6.591 6.553	6.591	1.321	2.642	17.577	0.762

表 11.55(续)

紧 固 件 号	A 直径 (理论)	A' 直径 (最小)	D 直径	E 直径 (最大)	G (参考)	H (参考)	L (参考)	R 半径 (最大)
MBF2012-09()	13.665 13.462	12.548	7.353 7.315	7.353		2.642		0.762
MBF2012-10-()	16.129 15.951	14.656	7.899 7.861	7.899		3.454		1.016
MBF2012-11-()	16.916 16.688	15.443	8.720 8.682	8.720		3.454		1.016
MBF2012-12-()	19.355 19.101	17.678	9.500 9.462	9.500		4.115		1.016

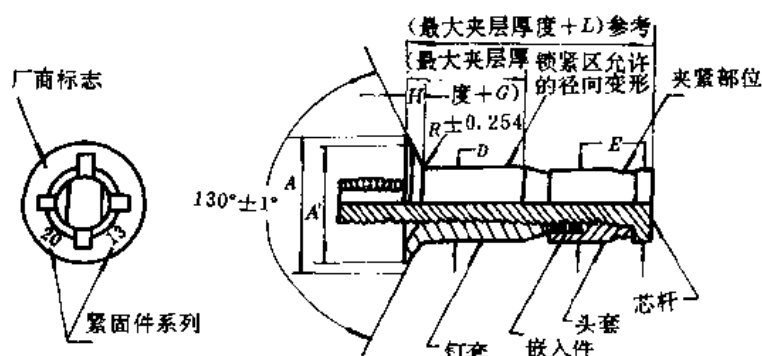


图 11.19 130°沉头剪切型螺纹抽钉

表 11.56 130°沉头剪头切型螺纹抽钉特征尺寸

(mm)

紧 固 件 号	A 直径 (理论)	A' 直径 (最小)	D 直径	E 直径 (最大)	G (参考)	H (参考)	L (参考)	R 半径 (最大)
MBF2013-05-()	8.255 8.134	7.518	4.166 4.128	4.166	0.432	0.991	11.430	0.762
MBF2013-06-()	9.271 9.601	8.687	5.042 5.004	5.042	0.559	1.092	14.173	0.762
MBF2013-07-()	10.566 10.389	9.474	5.779 5.740	5.779	0.889	1.092	16.510	0.762
MBF2013-08-()	12.878 12.675	11.760	6.591 6.553	6.591	1.321	1.448	17.577	0.762
MBF2013-09()	13.665 13.462	12.548	7.353 7.315	7.353		1.448		0.762
MBF2013-10-()	16.129 15.951	14.656	7.899 7.861	7.899		1.905		1.016
MBF2013-11-()	16.916 16.688	15.443	8.720 8.682	8.720		1.905		1.016
MBF2013-12-()	19.355 19.101	17.678	9.500 9.462	9.500		2.261		1.016

表 11.57 三种抽钉的夹层厚度范围

(mm)

第二个半字 线后的数 ^①	夹 层 厚 度 范 围		第二个半字 线后的数 ^①	夹 层 厚 度 范 围	
	最小夹层厚度	最大夹层厚度		最小夹层厚度	最大夹层厚度
-100	1.270	2.540	-750	17.780	19.050
-150	2.540	3.810	-800	19.050	20.320
-200	3.810	5.080	-850	20.320	21.590
-250	5.080	6.350	-900	21.590	22.860
-300	6.350	7.620	-950	22.860	24.130
-350	7.620	8.890	-1000	24.130	25.400
-400	8.890	10.160	-1050	25.400	26.670
-450	10.160	11.430	-1100	26.670	27.940
-500	11.430	12.700	-1150	27.940	29.210
-550	12.700	13.970	-1200	29.210	30.480
-600	13.970	15.240	-1250	30.480	31.750
-650	15.240	16.510	-1300	31.750	33.020
-700	16.510	17.780			

① 指表 11.54 至表 11.56 紧固件号一栏内第二个半字线后括弧内的数。

表 11.58 力学特性

MBF2011 MBF2012 MBF2013		拉伸强度 (N·最小)	双剪强度 (N,最小)	拧紧力矩 (N·cm,最小)
直径 (mm)	半字线后的数 ^②			
3.969	-05	4007	14025	11.31
4.763	-06	6233	20180	16.97
5.556	-07	7124	24932	22.62
6.350	-08	9350	35173	28.28
7.144	-09	11576	39625	33.93
7.938	-10	16028	50533	39.59
8.731	-11	①	①	45.24
9.525	-12	24932	73239	45.24

① 按规范和可靠性试验确定；

② 指表 11.54 至表 11.56 紧固件号一栏内第一个半字线后的数。

表 11.59 典型安装质量(每 100 件 kg 数)

安 装 质 量 夹 层 厚 度	MBF2011		MBF2012		MBF2013		
	05	08	05	06	08	06	08
-100	1.910	3.860					
-150	2.050	4.096	1.134	1.914	3.973	1.851	3.860
-200	2.195	4.332	1.252	2.050	4.209	1.996	4.096
-250	2.341	4.854	1.370	2.204	4.445	2.141	4.332
-300	2.486	4.799	1.483	2.344	4.677	2.286	4.808
-350	2.631	5.035	1.624	2.495	4.912	2.431	4.799
-400	2.771	5.271	1.719	2.635	5.148	2.572	5.035

表 11.59(续)

安 装 夹 层 厚 度 ^①	紧 固 件 系 列	MBF2011		MBF2012		MBF2013		
		-05	-08	-05	-06	-08	-06	-08
-450		2.917	5.502	1.833	2.781	5.380	2.717	5.266
-500		3.062	5.738	1.950	2.926	5.616	2.862	5.502
-550		3.207	5.874	2.068	3.071	5.851	3.007	5.738
-600		3.352	6.160	2.182	3.216	6.083	3.153	5.969
-650		3.493	6.441	2.300	3.357	6.319	3.295	6.205
-700		3.638	6.677	2.418	3.502	6.555	3.438	6.441
-750		3.783	6.913	2.536	3.647	6.790	3.583	6.677
-800		3.928	7.144	2.649	3.792	7.022	3.729	6.908
-850		4.073	7.380	2.767	3.937	7.258	3.874	7.144
-900		4.214	7.616	2.885	4.078	7.493	4.014	7.380
-950		4.359	7.852	2.998	4.223	7.724	4.160	7.611
-1000		4.504	8.083	3.322	4.368	7.961	4.305	7.847

① 参见表 11.57。

11.2.6 Hi-Shear 公司 6Al-4V 钛合金高锁螺栓

11.2.6.1 平锥头 6A-4V 钛合金高锁螺栓

平锥头高锁螺栓结构见图 11.20, 特征尺寸和强度见表 11.60, 螺栓质量见表 11.61。

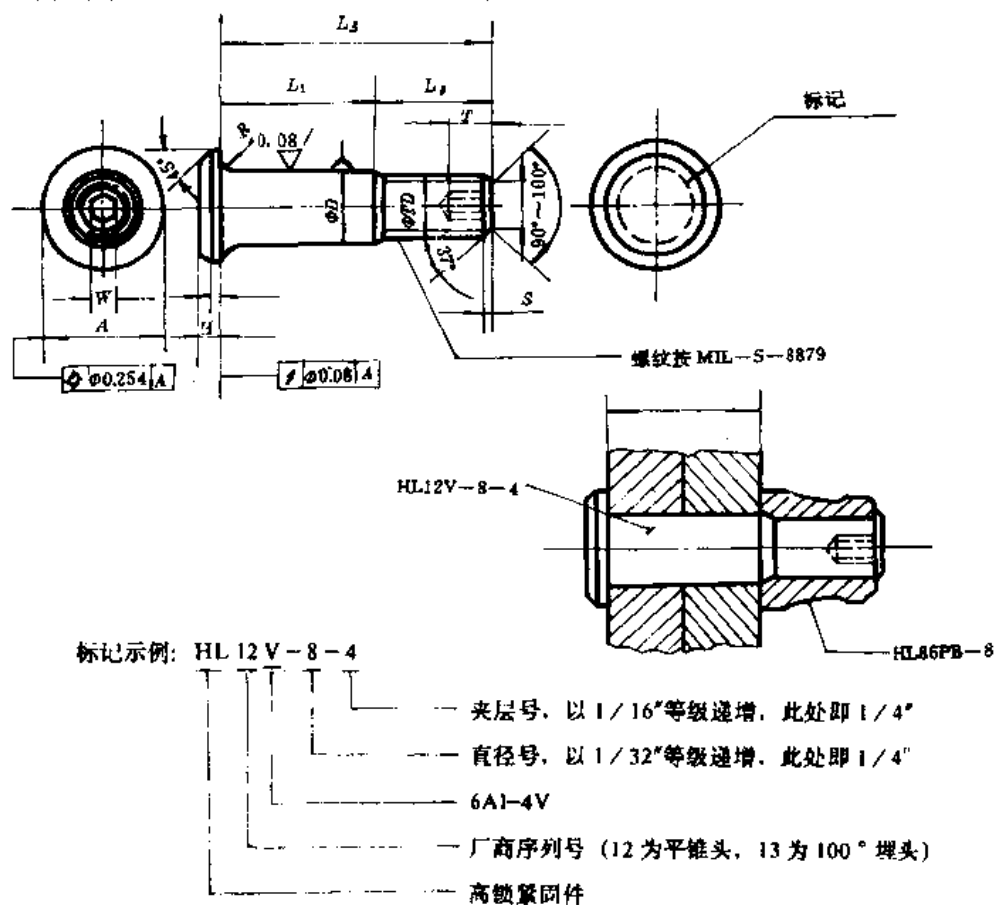


图 11.20 平锥头 6Al-4V 钛合金高锁螺栓

表 11.60 特征尺寸和强度

直径代号		-5	-6	-8	-10	-12	-14	
基本尺寸		4 (5/32inch)	4.8 (3/16inch)	6.4 (1/4inch)	8 (5/16inch)	9.6 (3/8inch)	11.2 (7/16inch)	
A	min	7.772	9.068	10.541	11.989	13.462	15.037	
	max	8.179	9.576	11.176	12.827	15.240	17.170	
B	(参考)	7.925	8.255	10.033	12.700	13.843	16.129	
D	min	4.140	4.801	6.325	7.912	9.500	11.087	
	max	4.153	4.813	6.337	7.925	9.512	11.100	
TD	min	3.988	4.597	6.121	7.671	9.246	10.820	
	max	4.051	4.674	6.198	7.635	9.347	10.947	
G	(参考)	0.762	0.889	1.143	1.397	1.905	2.1113	
H	min	1.397	1.626	2.032	2.591	3.302	3.810	
	max	1.524	1.880	2.286	2.845	3.556	4.064	
R	min	0.381	0.381	0.381	0.508	0.508	0.508	
	max	0.635	0.635	0.635	0.762	0.762	0.762	
S	(参考)	0.79	0.79	0.79	1.19	1.19	1.19	
螺纹按		.1640--32	.1900--32	.2500--28	.3215--24	.3750--24	.4375--20	
MIL-S-8879		UNJF-3A	UNJF-3A	UNJF-3A	UNJF-3A	UNJF-3A	UNJF-3A	
内六角尺寸	W	min	1.613	2.009	2.405	3.226	4.108	4.813
		max	1.638	2.047	2.456	3.289	4.107	4.902
	T	min	2.921	2.921	3.302	3.810	4.527	5.334
		max	3.429	3.429	3.810	4.318	5.080	5.842
	Y	min	1.905	2.642	3.090	4.064	5.004	5.918
		max	2.286	3.023	3.607	4.572	5.512	6.426
双剪强度 N		17837	23931	41368	64944	93412	127219	
抗拉强度 N		9697	14145	25889	40923	62275	84071	

表 11.61 螺栓质量

直 径 代 号				-5		-6		-8		-10		-12		-14	
夹层厚度代号	夹层厚度	夹层厚度范围		L_3	质量	L_3	质量	L_3	质量	L_3	质量	L_3	质量	L_3	质量
	度	±		±0.25	千克/	±0.25	千克/	±0.25	千克/	±0.25	千克/	±0.25	千克/	±0.25	千克/
	0.127	min	max	1000件	1000件	1000件	1000件	1000件	1000件	1000件	1000件	1000件	1000件	1000件	1000件
-2	3.2	1.6	3.1	11.1	0.810	11.4	1.162	13.2	2.560	15.9	3.727	17.0	6.314	19.3	9.770
-3	4.8	3.2	4.7	12.7	0.905	13.0	1.290	14.8	2.760	17.5	4.082	18.6	6.813	20.9	10.97
-4	6.4	4.8	6.3	14.3	1.000	14.6	1.410	16.4	2.965	19.1	4.436	20.2	7.307	22.5	11.170
-5	7.9	6.4	7.8	15.8	1.095	16.2	1.535	18.0	3.175	20.6	4.790	21.7	7.806	24.0	11.872
-6	9.5	7.9	9.4	17.4	1.185	17.8	1.660	19.6	3.386	22.2	5.144	23.3	8.305	25.6	12.572
-7	11.1	9.5	11.0	19.0	1.280	19.4	1.790	21.1	3.580	23.8	5.498	24.9	8.800	27.2	13.210
-8	12.7	11.1	12.6	20.6	1.380	21.0	1.910	22.7	3.790	25.4	5.852	26.5	9.299	28.8	13.972
-9	14.3	12.7	14.2	22.2	1.470	22.6	2.035	24.3	3.990	27.0	6.206	28.1	9.798	30.4	14.672
-10	15.9	14.3	15.8	23.8	1.570	24.1	2.160	25.9	4.200	28.6	6.560	29.7	10.297	32.0	15.375
-11	17.5	15.9	17.4	25.4	1.660	25.7	2.290	27.5	4.400	30.2	6.914	31.3	10.791	33.6	16.075

表 11.61(续)

直径代号			-5		-6		-8		-10		-12		-14	
夹层厚度代号	夹层厚度 度± 0.127	夹层厚度 范围 min max	L_3 ±0.25	质量 千克/ 1000 件	L_3 ±0.25	质量 千克/ 1000 件	L_3 ±0.25	质量 千克/ 1000 件	L_3 ±0.25	质量 千克/ 1000 件	L_3 ±0.25	质量 千克/ 1000 件	L_3 ±0.25	质量 千克/ 1000 件
-12	19.1	17.5 19.0	27.0	1.750	27.3	2.410	29.1	4.610	31.8	7.296	32.9	11.290	35.2	16.775
-13	20.6	19.1 20.5	28.5	1.850	28.9	2.530	30.7	4.810	33.3	7.623	34.4	11.789	36.7	17.475
-14	22.2	20.6 22.1	30.1	1.945	30.5	2.660	32.3	5.020	34.9	7.977	36.0	12.283	38.3	18.175
-15	23.8	22.2 23.7	31.7	2.040	32.1	2.790	33.8	5.230	36.5	8.331	37.6	12.782	39.7	18.872
-16	25.4	23.8 25.3	33.3	2.130	33.7	2.910	35.4	5.430	38.1	8.685	39.2	13.281	41.5	19.577
-17	27.0	25.4 26.9	34.9	2.225	35.2	3.035	37.0	5.635	39.7	9.039	40.8	13.780	43.1	20.277
-18	28.6	27.0 28.5	36.5	2.320	36.8	3.160	38.6	5.833	41.3	9.393	42.4	14.275	44.7	20.977
-19	30.2	28.6 30.1	38.1	2.410	38.4	3.285	40.2	6.040	42.9	9.747	44.0	14.774	46.3	21.678
-20	31.8	30.2 31.7	39.7	2.510	40.0	3.410	41.8	6.250	44.5	10.102	45.6	15.273	47.9	22.38

材料:6Al-4V 钛合金按 AMS4928 或 AMS4967;

表面处理:阳极化按高剪规范 306, I 型。

兰色和十六醇按高剪规范 305。

11.2.6.2 100°沉头 6Al-4V 钛合金高锁螺栓

100°沉头钛合金高锁螺栓结构见图 11.21,特征尺寸和强度见表 11.62,螺栓质量见表 11.63。

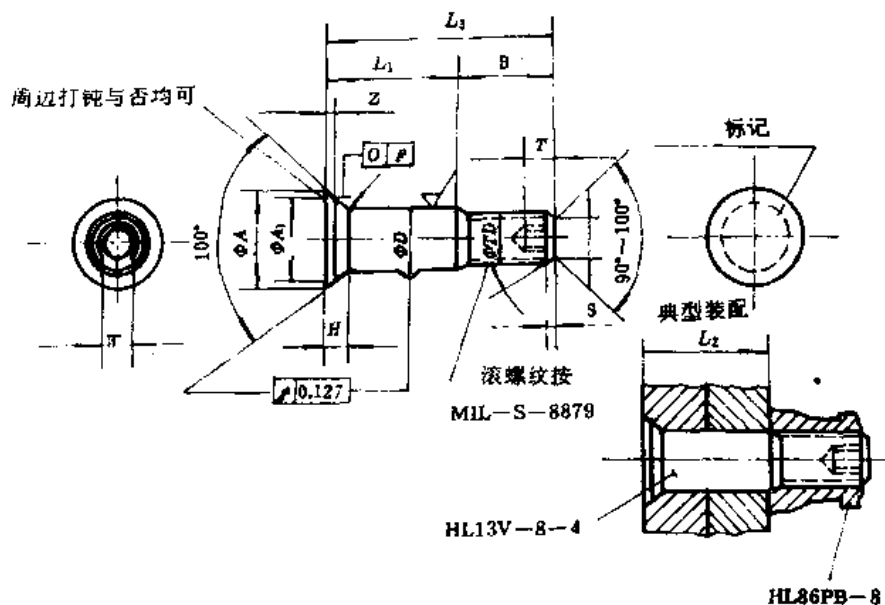


图 11.21 100°沉头 6Al-4V 钛合金高锁螺栓

表 11.62 特征尺寸和强度

直径代号		-5	-6	-8	-10	
基本尺寸		4 (5/32inch)	4.8 (3/16inch)	6.4 (1/4inch)	8 (5/16inch)	
A	min	8.270	9.563	12.746	15.969	
	max	8.392	9.685	12.868	16.091	
A ₁ (最小值)		7.620	8.626	11.811	15.113	
B(参考)		7.925	8.255	10.033	12.700	
D	min	4.140	4.801	6.325	7.912	
	max	4.153	4.813	6.337	7.925	
TD	min	3.988	4.597	6.121	7.671	
	max	4.051	4.674	6.198	7.772	
F		0.102	0.127	0.152	0.178	
H	min	1.727	1.994	2.692	3.378	
	max	1.778	2.045	2.743	3.429	
R	min	0.381	0.508	0.508	0.762	
	max	0.635	0.762	0.762	1.016	
Z		0.254	0.381	0.381	0.381	
S(参考)		0.79	0.79	0.79	1.19	
螺纹按		.1640-32	.1900-32	.2500-28	.3125-24	
MIL-S-8819		UNJF-3A	UNJF-3A	UNJF-3A	UNJF-3A	
内 六 方 尺 寸	W	min	1.613	2.009	2.405	3.226
		max	1.638	2.047	2.456	3.289
	T	min	2.921	2.921	3.302	3.810
		max	3.429	3.429	3.810	4.318
	Y	min	1.905	2.642	3.099	4.064
		max	2.286	3.023	3.607	4.572
双剪强度 minN		17837	23931	41368	64966	
抗拉强度 minN		9697	14145	25889	40937	

材料:6Al-4V 钛合金按 AMS4928 或 AMS4967。

表面处理:阳极化按高剪规范 306, I 型,兰色和十六醇按高剪规范 305。

热处理:最小剪切强度 655MPa;最小抗拉强度 1100MPa。

技术规范:按高锁螺栓生产规范 342。

表 11.63 安装质量

直 径 代 号				-5		-6		-8		-10	
夹层厚 度代号	夹层厚 度 ±0.127	夹层厚度 范 围		I ₃ ±0.25	质量 千克/ 1000 件	I ₃ ±0.25	质量 千克/ 1000 件	L ₃ ±0.25	质量 F 克/ 1000 件	L ₁ ±0.25	质量 千克 1000 件
		min	max								
-2	3.2	1.6	3.1	11.1	0.650	11.4	0.920	13.2	2.030	15.9	3.489
-3	4.8	3.2	4.7	12.7	0.745	13.0	1.050	14.8	2.230	17.5	3.862
-4	6.4	4.8	6.3	14.3	0.840	14.6	1.170	16.4	2.440	19.1	4.106
-5	7.9	6.4	7.8	15.8	0.940	16.2	1.300	18.0	2.650	20.6	4.550

表 11.63(续)

直径代号				-5		-6		8		-10	
夹层厚度代号	夹层厚度 ± 0.127	夹层厚度范围 min max		L_3 ± 0.25	质量 千克/ 1000 件	L_3 ± 0.25	质量 千克/ 1000 件	L_3 ± 0.25	质量 千克/ 1000 件	L_3 ± 0.25	质量 F 克 1000 件
-6	9.5	7.9	9.4	17.4	1.030	17.8	1.470	19.6	2.850	22.2	4.923
-7	11.1	9.5	11.0	19.0	1.120	19.4	1.590	21.1	3.060	23.8	5.257
-8	12.7	11.1	12.6	20.6	1.220	21.0	1.720	22.7	3.260	25.4	5.611
-9	14.3	12.7	14.2	22.2	1.310	22.6	1.845	24.3	3.465	27.0	5.965
-10	15.9	14.3	15.8	23.8	1.410	24.1	1.970	25.9	3.670	28.6	6.319
-11	17.5	15.9	17.4	25.4	1.500	25.7	2.095	27.5	3.880	30.2	6.672
-12	19.1	17.5	19.0	27.0	1.595	27.3	2.220	29.1	4.080	31.8	7.026
-13	20.6	19.1	20.5	28.5	1.690	28.9	2.350	30.7	4.290	33.3	7.390
-14	22.2	20.6	22.1	30.1	1.785	30.5	2.470	32.3	4.490	34.9	7.734
-15	23.8	22.2	23.7	31.7	1.880	32.1	2.590	33.8	4.700	36.5	8.088
-16	25.4	23.8	25.3	33.3	1.970	33.7	2.710	35.4	4.900	38.1	8.442
-17	27.0	25.4	26.9	34.9	2.070	35.2	2.840	37.0	5.110	39.7	8.795
-18	28.6	27.0	28.5	36.5	2.160	36.8	2.965	38.6	5.310	41.3	9.149
-19	30.2	28.6	30.1	38.1	2.250	38.4	3.090	40.2	5.515	42.9	9.503
-20	31.8	30.2	31.7	39.7	2.350	40.0	3.215	41.8	5.720	44.5	9.857
-21	33.3	31.8	33.2	41.3	2.440	41.6	3.340	43.3	5.925	46.0	10.211
-22	34.9	33.3	34.8	42.9	2.550	43.2	3.465	44.9	6.130	47.6	10.575
-23	36.5	34.9	36.4	44.5	2.620	44.8	3.590	46.5	6.335	49.2	10.929
-24	38.1	36.5	38.0	46.1	2.710	46.4	3.715	48.1	6.540	50.8	11.282

注:夹层厚度大于-24 的,将以 1.6mm(1/16 英寸)一级增加厚度,此时:

$$L_{2\max} = L_3 - 1.6 \text{ mm},$$

$$L_{2\min} = L_3 - 0.1 \text{ mm}.$$

11.2.6.3 高锁螺母

高锁螺母结构见图 11.22,特征尺寸和强度见表 11.64。

表 11.64 特征尺寸和强度

规格代号		-5	-6	-8	-10	-12	-14
基本尺寸		4	4.8	6.4	8	9.6	11.2
		(5/32inch)	(3/16inch)	(1/4inch)	(5/16inch)	(3/8inch)	(7/16inch)
螺纹按		.1640-32	.1900-32	.2500-28	.3125-24	.3750-24	.4375-20
MIL- S -8879		UNJF-3B	UNJF-3B	UNJF-2B	UNJF-3B	UNJF-3B	UNJF-3B
A	min	7.188	7.696	10.363	13.005	15.799	18.466
	max	7.290	7.798	10.465	13.157	15.951	18.618
B	min	4.216	4.877	6.401	7.976	9.550	11.227
	max	4.394	5.080	6.629	8.255	9.855	11.760

表 11.64(续)

规格代号		-5	-6	-8	-10	-12	14
L	min	10.846	11.100	13.513	16.561	18.390	21.387
	max	11.354	11.608	14.021	17.069	18.898	21.895
L_{II}	参考	6.731	6.985	8.636	10.922	12.065	14.224
P	参考	8.738	8.738	9.652	12.294	14.148	21.336
W	min	7.671	7.671	8.433	10.795	12.395	18.694
	max	7.976	7.976	8.788	11.176	12.776	19.126
X	参考	2.718	2.718	2.845	3.099	3.099	3.480
1000 件/千克		0.889	1.030	2.059	3.887		
抗拉强度 (min)		10.231	12.233	22.241	36.920	57.605	86.182
扭断力矩 Nm		3.39~4.52	4.52~5.65	13.00~14.70	22.6~28.25	40.68~47.46	59.33~76.28

材料:303Se 不锈钢 ASTM-A-582(AMS5640)。

表面处理:镀镉按 QQ-P-416, I 型, 2 类。

表面润滑:十六醇,按高剪规范 305。

标记:在高锁螺母图示标记处制厂商标记:

HL-SHEAR 公司:没有波纹或“ns”;

VOI-SHAN 公司:一条波纹或“VS”;

STANDARD PRESSED STEEL 公司:二条波纹或“SPS”;

KAMAX 公司:三条波纹或“KAB”;

SAINT-CHAMOND-GRANAT 公司:T。

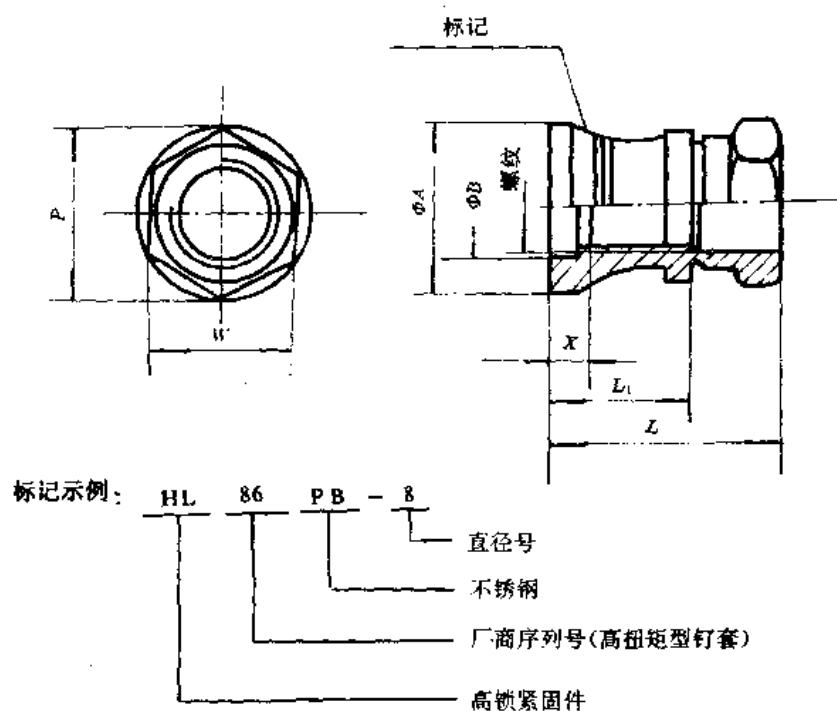


图 11.22 高锁螺母

11.2.7 Cheery 公司双金属铆钉

11.2.7.1 钛锆双金属 100°冠头铆钉 (655MPa)

冠头铆钉结构见图 11.23; 特征尺寸和强度见表 11.65. 质量见表 11.65.

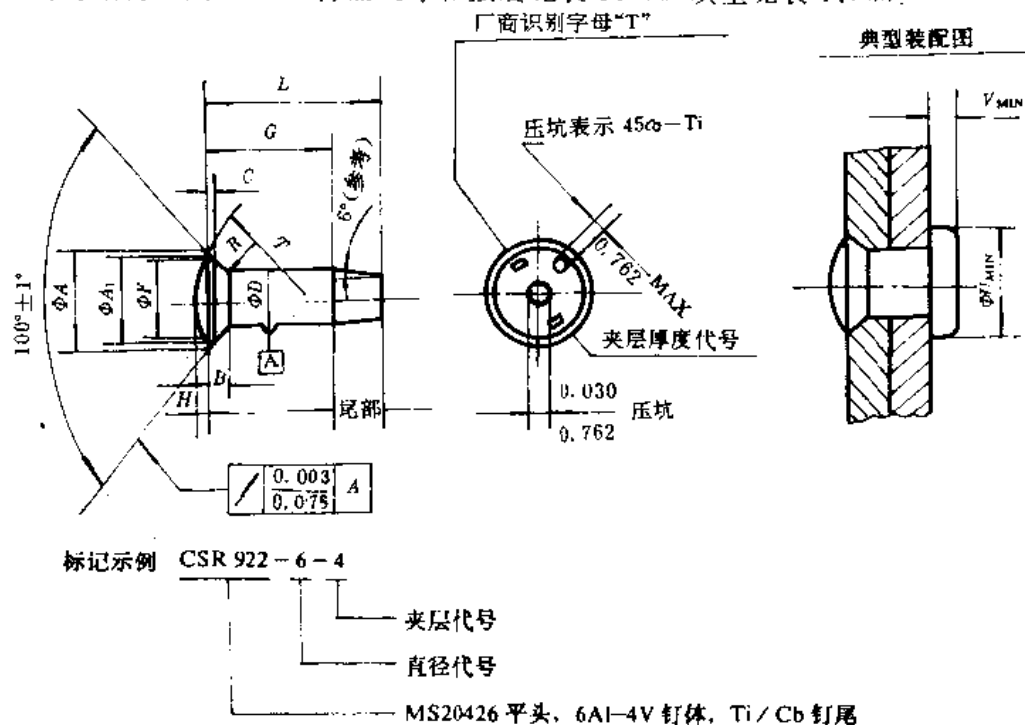


图 11.23 钛锆双金属 100°冠头铆钉

表 11.65 特征尺寸和强度

直径代(a)				-5	-6	-8
A	基本直径 D	-0.0005	inch	0.164	0.1895	0.2495
		0.013	mm	4.166	4.895	6.337
		±0.025	inch	0.286	0.353	0.476
		±0.064	mm	7.264	8.966	12.09
A ₁	min	(参考)	inch	0.271	0.336	0.456
			mm	6.883	8.534	11.582
B	(参考)	(参考)	inch	0.051	0.069	0.095
			mm	1.295	1.753	2.413
C		±0.002	inch	0.004	0.005	0.006
		±0.051	mm	0.102	0.127	0.152
F		±0.005	inch	0.261	0.326	0.446
		+0.127	mm	6.629	8.280	11.328
H		±0.002	inch	0.005	0.005	0.005
		±0.051	mm	0.127	0.127	0.127
R		±0.005	inch	0.020	0.025	0.025
		±0.127	mm	0.508	0.635	0.635
T	(参考)	(参考)	inch	1.70	2.66	4.98
			mm	43.2	67.6	126.5

表 11.65(续)

直径代号(a)				-5	-6	-8
镢头直径 U(b)	min	inch		0.213	0.246	0.323
		mm		5.41	6.748	8.253
镢头高度 V(c)	min	inch		0.056	0.065	0.083
		mm		1.422	1.651	2.159
抗拉强度	min	N		7117	9341	16458
单剪强度	min	N		8928	11982	20729

注:a——直径代号表示基本直径以 1/32 英寸为一级增加;

b——最小镢头直径=1.3D;

c——最小镢头高度=0.34D。

表 11.66 铆钉质量

直径代号				-5		-6		-8	
夹层 厚度 代号	夹层厚度范围		G	L		L		L	
	min	max		± 0.010	质量	± 0.010	质量	± 0.010	质量
	inch	inch	± 0.361	± 0.254	磅/100 件	± 0.254	磅/100 件	± 0.254	磅/100 件
	mm	mm	inch	mm	千克/100 件	inch	mm	inch	mm
-3	0.126	0.156	0.125	0.330	1.40	—	—	—	—
	3.200	3.962	3.175	8.382	0.635	—	—	—	—
-3R	0.157	0.187	0.156	0.361	1.51	0.378	2.35	—	—
	3.967	4.749	3.962	9.169	0.684	9.601	1.065	—	—
-4	0.168	0.218	0.187	0.392	1.62	0.410	2.49	0.455	4.83
	4.775	5.537	4.749	9.956	0.734	10.414	1.129	11.557	2.19
-4R	0.219	0.250	0.218	0.423	1.73	0.441	2.63	0.486	5.08
	5.562	6.350	5.537	10.744	0.784	11.201	1.192	12.344	2.304
-5	0.251	0.281	0.250	0.455	1.84	0.472	2.77	0.517	5.32
	6.875	7.137	6.350	11.557	0.834	11.988	1.256	13.131	2.410
-5R	0.282	0.312	0.281	0.486	1.95	0.503	2.911	0.548	5.57
	7.162	7.924	7.137	12.344	0.884	12.776	1.319	13.919	2.526
-6	0.313	0.343	0.312	0.517	2.06	0.535	3.05	0.580	5.81
	7.95	8.712	7.924	13.131	0.934	13.587	1.393	14.732	2.635
-6R	0.344	0.375	0.343	0.548	2.17	0.566	3.19	0.611	6.06
	8.773	9.525	8.712	13.919	0.984	14.376	1.445	15.519	2.748
-7	0.376	0.406	0.375	0.580	2.28	0.597	3.33	0.642	6.30
	9.55	10.312	9.525	14.732	1.034	15.163	1.51	16.306	2.857
-7R	0.407	0.437	0.406	0.611	2.39	0.628	3.47	0.673	6.55
	10.337	11.099	10.312	15.517	1.084	15.951	1.573	17.094	2.967
-8	0.438	0.468	0.437	0.642	2.50	0.660	3.61	0.705	6.79
	11.125	11.887	11.099	16.306	1.133	16.764	1.637	17.907	3.079
-8R	0.469	0.500	0.468	0.673	2.61	0.691	3.75	0.736	7.04
	11.912	12.70	11.887	17.094	1.183	17.551	1.70	18.694	3.193
-9	0.501	0.531	0.500	0.705	2.72	0.722	3.89	0.767	7.28
	12.73	13.49	12.70	17.91	1.234	18.34	1.764	19.48	3.302

表 11.66(续)

夹层 厚度 代号	直径代号				-5			-6			-8
	夹层厚度范围		G		L	质量		L	质量		L
	min inch mm	max inch mm	$\frac{0.15}{0.361}$ inch mm	$\frac{\pm 0.010}{\pm 0.254}$ inch mm	磅/100 件 千克/100 件	$\frac{\pm 0.010}{\pm 0.254}$ inch mm	磅/100 件 千克/100 件	$\frac{\pm 0.010}{\pm 0.254}$ inch mm	磅/100 件 千克/100 件	$\frac{\pm 0.010}{\pm 0.254}$ inch mm	磅/100 件 千克/100 件
-9R	0.532	0.562	0.531	0.736	2.83	0.753	4.03	0.798	7.53		
	13.51	14.27	13.49	13.69	1.284	19.13	1.828	20.27	3.476		
-10	0.563	0.593	0.562	0.767	2.94	0.785	4.17	0.830	7.77		
	14.30	15.06	14.27	19.48	1.334	19.94	1.891	21.08	3.524		
-10R	0.594	0.625	0.593	0.798	3.05	0.816	4.31	0.861	8.02		
	15.09	15.83	15.06	20.27	1.383	20.73	1.955	21.87	3.638		

材料:钉体:6Al-4V,按 AMS4967;尾部:45Cb-T,按 AMS4982。

热处理:钉体:剪切强度最小 655MPa;尾部:退火。

表面处理:按厂商规范阳极化。润滑:十六醇,按 MIL-L-87132。表面粗糙度:钉体 R1.6,其余 R3.2。

采购规范:MIL-R-83459。

11.2.7.2 钛铌合金 100°沉头铆钉(345MPa)

沉头铆钉结构见图 11.24,特征尺寸和强度见表 11.67,质量见表 11.68。

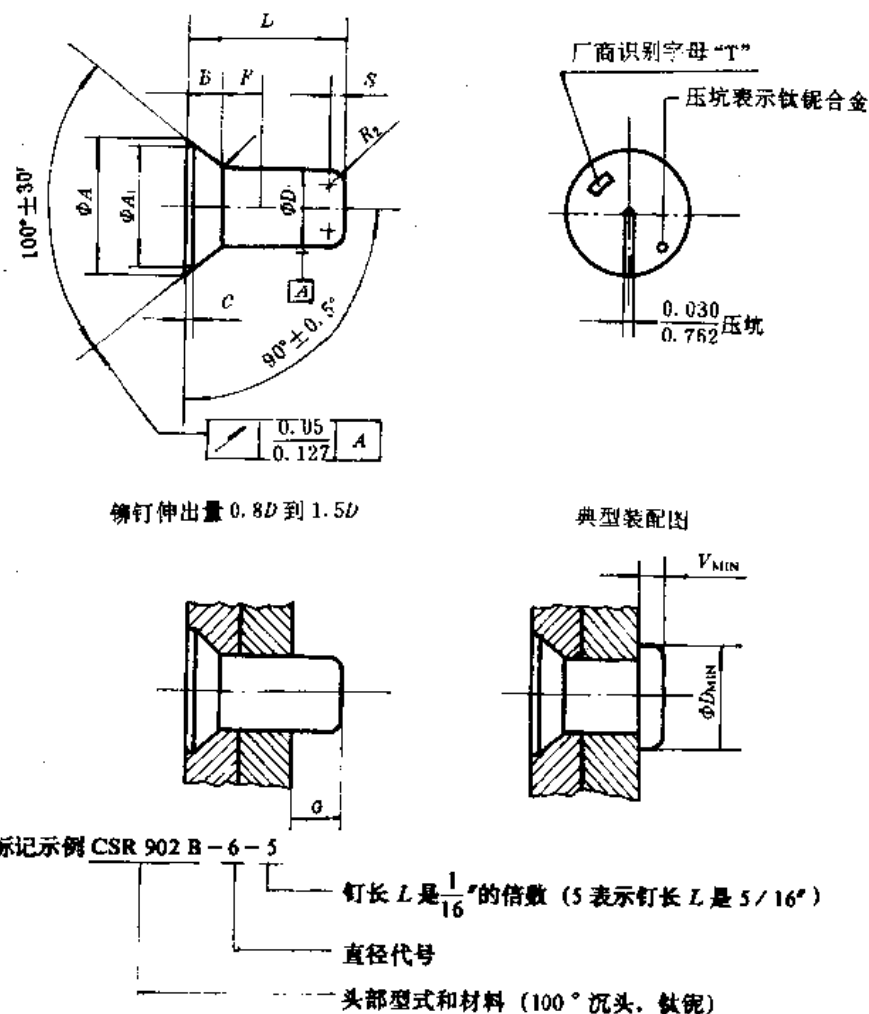


图 11.24 钛铌合金 100°沉头铆钉

表 11.67 特征尺寸和强度

直径代号 a				-3	-4	5
	基本直径 D	+0.003 -0.001	inch	0.094	0.125	0.156
		+0.076 -0.025	mm	2.388	3.175	3.962
A		±0.004	inch	0.179	0.225	0.286
		±0.102	mm	4.547	5.715	7.264
A ₁		min	inch	0.165	0.207	0.263
			mm	4.191	5.258	6.68
B		(参考)	inch	0.036	0.042	0.055
			mm	0.914	1.067	1.397
C		max	inch	0.006	0.008	0.010
			mm	0.152	0.203	0.254
F	见注 3		inch	0.100	0.100	0.100
			mm	2.54	2.54	2.54
G	伸出	min	inch	0.075	0.100	0.125
			mm	1.905	2.54	3.175
		max	inch	0.141	0.188	0.234
			mm	3.581	4.775	5.943
R ₁		±0.005	inch	0.010	0.015	0.020
		±0.127	mm	0.254	0.381	0.508
R ₂		±0.010	inch	0.020	0.030	0.049
		±0.254	mm	0.737	0.971	1.244
S		±0.010	inch	0.023	0.031	0.039
		±0.254	mm	0.584	0.787	0.991
	镢头直径 $U(b)$	min	inch	0.122	0.163	0.213
			mm	3.099	4.14	5.41
	镢头高度 $V(c)$	min	inch	0.028	0.038	0.040
			mm	0.711	0.965	1.245
	抗拉强度	min	Lbs	385	620	1050
			1713	2758	4671	
	单剪强度	min	Lbs	347	614	756
			N	1544	2731	4252

注:a 直径代号表示基本直径以 1/32 吋为一级增加;

b——最小镢头直径=1.3D;

c——取小镢头高度=0.3D;

d——铆钉按 345MPa 检查剪切强度。

表 11.68 铆钉质量

夹层厚度代号 (a)	-3		-4		-5	
	L ± 0.010 ± 0.254 inch mm	质量 磅/1000 件 千克/1000 件	L ± 0.010 ± 0.254 inch mm	质量 磅/1000 件 千克/1000 件	L ± 0.010 ± 0.254 inch mm	质量 磅/1000 件 千克/1000 件
-2	0.125	0.248	—	—	—	—
	3.175	0.112	—	—	—	—
-3	0.188	0.339	0.188	0.598	0.188	0.950
	0.763	0.154	4.763	0.271	0.763	0.431
-4	0.250	0.439	0.250	0.760	0.250	1.203
	6.35	0.195	6.35	0.345	6.35	0.546
-5	0.313	0.521	0.313	0.922	0.313	1.456
	7.938	0.236	7.938	0.418	7.938	0.660
-6	0.375	0.612	0.375	1.084	0.375	1.709
	9.525	0.278	9.525	0.492	9.525	0.775
-7	0.438	0.703	0.438	1.246	0.438	1.962
	11.113	0.313	11.113	0.565	11.113	0.898
-8	0.500	0.799	0.500	1.408	0.500	2.215
	12.700	0.362	12.7	0.639	12.7	1.005
-9	0.563	0.891	0.563	1.570	0.563	2.468
	14.288	0.404	14.288	0.712	14.288	1.119

注:夹层厚度代号:表示厚度以 1/16 英寸为一级增加。

材料:钛铌合金按 AMS4982;

热处理:退火按 AMS4982;

表面处理:阳极化按 ISO8080;

采购规范:MIL-R-5674,除表面处理按规定外。

11.2.7.3 钛铌合金 100°小沉头铆钉(345MPa)

小沉头铆钉结构见图 11.25,特征尺寸和强度见表 11.69,质量见表 11.70。

表 11.69 特征尺寸和强度

直径代号(a)				-3	-4	-5
	基本直径 D	$+0.003$ -0.001 -0.076	inch	0.094	0.125	0.156
			mm	2.388	3.175	3.962
		± 0.004 ± 0.102	inch mm	0.144 3.656	0.192 4.877	0.243 6.172
A_1	min		inch	0.126	0.174	0.225
			mm	3.200	4.420	5.715
B	(参考)		inch	0.021	0.028	0.037
			mm	0.533	0.711	0.940
C	max		inch	0.006	0.006	0.006
			mm	0.152	0.152	0.203
F	见注 3		inch	0.100	0.100	0.100
			mm	2.54	2.54	2.54
G	min		inch	0.075	0.100	0.125
			mm	1.905	2.54	3.175
	max		inch	0.141	0.188	0.234
			mm	3.581	4.775	5.943
P	min		inch	0.0089	0.0106	0.0153
			mm	0.286	0.269	0.389
	max		inch	0.123	0.0141	0.0189
			mm	0.312	0.358	0.489
R_1	max		inch	0.010	0.010	0.010
			mm	0.254	0.254	0.254

表 11.69(续)

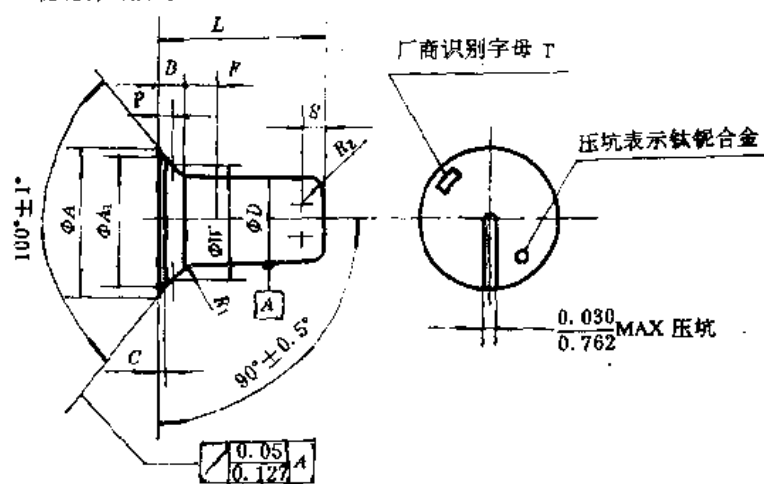
直径代号(a)				-3	-4	-5
R_z		± 0.010	inch	0.029	0.039	0.049
		± 0.254	mm	0.737	0.991	1.244
S		± 0.010	inch	0.023	0.031	0.039
		± 0.254	mm	0.584	0.787	0.991
	镢头直径 $U(b)$	min	inch	0.122	0.163	0.213
			mm	3.099	4.14	5.41
	镢头高度 $V(c)$	min	inch	0.028	0.038	0.049
			mm	0.711	0.965	1.245
			inch	0.119	0.163	0.253
			mm	3.023	4.140	5.153
	抗拉强度	min	lbs	250	375	665
			N	1112	1667	2958
	单剪强度	min	lbs	347	614	956
			N	1544	2731	4252

注:a——直径代号表示基本直径以 1/32 英寸为一级增加;

b——最小镢头直径=1.3D;

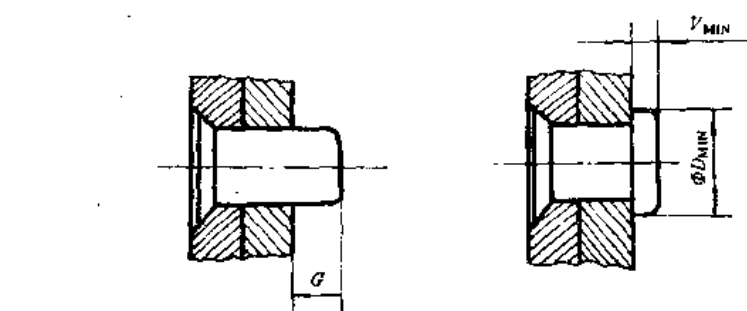
c——最小镢头高度=0.3D;

d——铆钉按 345MPa 检查剪切强度。



铆钉伸出量 0.8D 到 1.5D

典型装配图



标记示例 CSR 904 B-6-5

钉长 L 是 $\frac{1}{16}$ 的倍数 (5 表示钉长 L 是 5/16")

直径代号

头部型式和材料 (100° 沉头, 钛铝)

图 11.25 钛铝合金 100° 小沉头铆钉

表 11.70 铆钉质量

夹层厚度代号 (a)	-3		-4		-5	
	L ± 0.010 ± 0.254 inch mm	质量 磅/1000 件 千克/1000 件	L ± 0.010 ± 0.254 inch mm	质量 磅/1000 件 千克/1000 件	L ± 0.010 ± 0.254 inch mm	质量 磅/1000 件 千克/1000 件
-2	0.125	0.207				
	3.175	0.094				
-3	0.188	0.298	0.188	0.536	0.188	0.865
	4.763	0.135	4.763	0.243	4.763	0.392
-4	0.250	0.389	0.250	0.699	0.250	1.118
	0.35	0.176	6.35	0.317	6.35	0.507
-5	0.313	0.480	0.313	0.862	0.313	1.371
	7.938	0.218	7.938	0.391	7.938	0.622
-6	0.375	0.571	0.375	1.025	0.375	1.624
	9.525	0.259	9.525	0.465	9.525	0.737
-7	0.438	0.662	0.438	1.188	0.438	1.877
	11.113	0.299	11.113	0.539	11.113	0.851
-8	0.500	1.412	0.500	1.351	0.500	2.130
	12.700	0.640	12.7	0.613	12.7	0.966
-9	0.563	1.574	0.563	1.514	0.563	2.383
	14.288	0.714	14.288	0.687	14.288	1.081
-10	0.625	1.739	0.625	1.845	0.625	2.636
	15.875	0.789	15.875	0.837	15.875	1.195

注:夹层厚度代号,表示厚度以 1/16 英寸为一级增加;

材料:钛铝合金按 AMS4982;

热处理:退火按 AMS4982;

表面处理:阳极化按 ISO8080;

采购规范:MIL-R 5674,除表面处理按规定外。

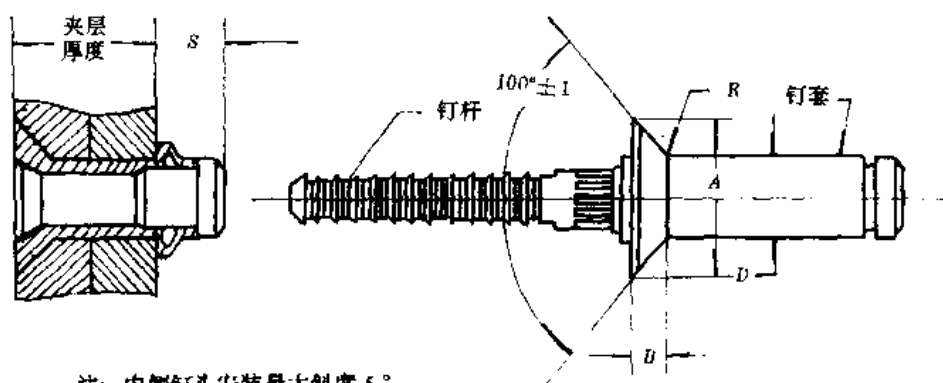
11.2.8 HUCK 公司单面抽钉

11.2.8.1 100°沉头单面抽钉

沉头单面抽钉结构见图 11.26,特征尺寸及强度见表 11.71,夹层厚度见表 11.72,安装质量见表 11.73。

表 11.71 特征尺寸及强度

紧固件号	A 头部直径 (理论)	B 头部高度 (最大)	D (钉套直径)	R 半径 (最大)	S 设计参考 (最大)	单剪 N(最小)	拉伸 N(最小)
MS21140-5	8.484	1.854	4.140	0.254	5.131	8790	5015
MS21140-6	9.830	2.032	5.029	0.381	5.867	12985	7503
MS21140-8	12.903	2.692	6.579	0.508	7.087	22219	12874
MS21140-10	16.129	3.505	7.899	0.635	8.103	32030	18512
MS21140-12	19.380	4.215	9.474	0.762	9.246	46081	26503



注：内侧钉头安装最大斜度 5°

标记示例：MS21140-05-06

—— 夹层号（以 $1/16$ 英寸为一级增值）

—— 直径号（以 $1/32$ 英寸为一级增值）

—— 100° 沉头单面抽钉美军标零件号

图 11.26 100° 沉头单面抽钉

表 11.72 夹层厚度

夹层号	夹层厚度范围		夹层号	夹层厚度范围	
	最小夹层厚度	最大夹层厚度		最小夹层厚度	最大夹层厚度
02	2.362	4.0	20	30.963	32.563
03	3.96	5.588	21	32.537	34.163
04	5.562	7.163	22	34.138	35.738
			23	35.712	37.338
05	7.137	8.763	24	37.313	38.913
06	8.738	10.338			
07	10.312	11.938	25	38.887	40.513
08	11.913	13.512	26	40.488	42.088
09	13.487	15.113	27	42.062	43.688
			28	43.663	45.263
10	15.088	16.688	29	45.212	46.863
11	16.662	18.288			
12	18.263	19.863	30	46.838	48.438
13	19.837	21.463	31	48.412	50.038
14	21.438	23.038	32	50.013	51.613
			33	51.587	53.213
15	23.012	24.638	34	53.188	54.788
16	24.613	26.213			
17	26.187	27.813	35	54.762	56.388
18	27.788	29.388	36	56.363	58.064
19	29.362	30.988			

表 11.73 MS21140 单面沉头抽钉 1000 件安装质量

(kg)

直径代号 夹层代号	-05	-06	-08	-10	-12
-02	1.045	1.653	3.407	5.558	9.759
-03	1.217	1.903	3.834	6.174	10.646
-04	1.386	2.153	4.262	6.791	11.533
-05	1.555	2.402	4.690	7.407	12.420
-06	1.725	2.652	5.117	8.024	13.307
-07	1.894	2.902	5.545	8.641	14.194
-08	2.063	3.152	5.973	9.257	15.081
-09	2.233	3.401	6.400	9.874	15.969
-10	2.402	3.651	6.828	10.490	16.856
-11	2.571	3.901	7.256	11.107	17.743
-12	2.741	4.150	7.683	11.723	18.630
-13	2.910	4.400	8.111	12.340	19.517
-14	3.079	4.650	8.539	12.956	20.404
-15	3.249	4.900	8.967	13.573	21.291
-16	3.418	5.149	9.394	14.189	22.178
-17	3.588	5.399	9.822	14.806	23.065
-18	3.757	5.649	10.250	15.422	23.953
-19	3.926	5.898	10.677	16.039	24.840
-20	4.096	6.148	11.105	16.656	25.727
-21	4.265	6.398	11.533	17.272	26.614
-22	4.434	6.647	11.960	17.889	27.501
-23	4.604	6.897	12.388	18.505	28.388
-24	4.773	7.147	12.816	19.122	29.275
-25	4.942	7.397	13.243	19.738	30.162
-26	5.112	7.646	13.671	20.355	31.050
-27	5.281	7.896	14.099	20.971	31.937
-28	5.450	8.146	14.526	21.588	32.824
-29	5.619	8.395	14.954	22.204	33.711
-30	5.789	8.645	15.382	22.821	34.598
-31	5.958	8.895	15.809	23.437	35.485
-32	6.128	9.144	16.237	24.054	36.372
-33	6.297	9.394	16.665	24.670	37.259
-34	6.466	9.644	17.092	25.287	38.146
-35	6.636	9.894	17.520	25.903	39.034
-36	6.805	10.143	17.948	26.520	39.921

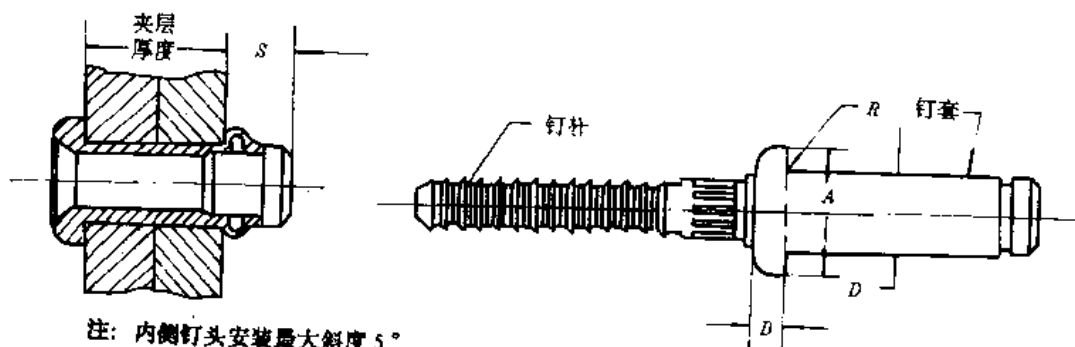
材料: A-286 耐蚀钢, 按 AMS5737;

表面处理: 镀镉按 MIL-F-8975;

润滑: 按 MIL-L-8937, MIL-L-87132 或干膜润滑。

11.2.8.2 凸头单面抽钉

凸头单面抽钉结构见图 11.27, 特征尺寸及强度见表 11.74, 安装质量见表 11.75。



注: 内侧钉头安装最大斜度 5°

标记示例: MS21141-05-06

夹层号

直径号

凸头单面抽钉美军标零件号

图 11.27 100° 凸头单面抽钉

表 11.74 特征尺寸及强度

紧固件号	A 头部直径	B 头部高度	D (钉套直径) ±0.001	R 半径 (最大)	S 设计参考 (最大)	单剪 N(最小)	拉伸 N(最小)
MS21141-5	6.909	1.778	4.140	0.254	5.131	8790	5105
	6.350	1.575					
MS21141-6	8.433	3.429	5.029	0.381	5.867	12985	7503
	7.747	3.175					
MS21141-8	10.973	3.556	6.579	0.457	7.087	22219	12874
	10.160	3.302					
MS21141-10	13.259	3.556	7.899	0.533	8.103	32030	18512
	12.192	3.302					
MS21141-12	15.926	5.207	9.474	0.635	9.246	46081	26503
	14.732	4.953					

表 11.75 MS21141 单面凸头抽钉 1000 件安装质量

(kg)

直径代号 夹层代号	-05	-06	-08	-10	-12
-02	1.236	2.506	4.719	6.478	13.498
-03	1.405	2.756	5.147	7.094	14.385
-04	1.574	3.005	5.574	7.711	15.273
-05	1.744	3.255	6.002	8.327	16.160
-06	1.913	3.505	6.430	8.944	17.047
-07	2.082	3.755	6.857	9.560	17.934
-08	2.252	4.004	7.285	10.177	18.821
-09	2.421	4.254	7.713	10.793	19.708
-10	2.591	4.504	8.140	11.410	20.595
-11	2.760	4.753	8.568	12.026	21.482

表 11.75(续)

直径代号 夹层代号	-05	-06	-08	-10	-12
-12	2.929	5.003	8.996	12.643	22.369
-13	3.099	5.253	9.423	13.260	23.257
-14	3.268	5.502	9.851	13.816	24.144
-15	3.437	5.752	10.279	14.493	25.031
-16	3.607	6.002	10.706	15.109	25.918
-17	3.776	6.252	11.134	15.726	26.805
-18	3.945	6.501	11.562	16.342	27.692
-19	4.115	6.751	11.989	16.959	28.579
-20	4.284	7.001	12.417	17.575	29.466
-21	4.453	7.250	12.845	18.192	30.354
-22	4.623	7.500	13.272	18.808	31.241
-23	4.792	7.750	13.700	19.425	32.128
-24	4.961	7.999	14.128	20.041	33.015
-25	5.131	8.249	14.555	20.643	33.902
-26	5.300	8.499	14.983	20.658	34.789
-27	5.469	8.749	15.411	21.891	35.676
-28	5.639	8.998	15.838	22.508	36.563
-29	5.808	9.248	16.266	23.124	37.450
-30	5.977	9.498	16.694	23.741	38.338
-31	6.147	9.747	17.121	24.357	39.225
-32	6.316	9.997	17.549	24.974	40.112
-33	6.485	10.247	17.977	25.590	40.999
-34	6.655	10.496	18.404	26.207	41.886
-35	6.824	10.746	18.832	26.823	42.773
-36	6.993	10.996	19.260	27.440	43.660

材料: A-286 耐腐蚀钢, 按 AMS5537;

表面处理: 镀镉按 MIL-F-8975;

润滑: 按 MIL-L-8937, MIL-L-87132 或干膜润滑。

11.2.9 飞机复合材料结构紧固件的应用情况

飞机复合材料结构紧固件的应用情况列于表 11.76 中。

表 11.76 飞机复合材料结构紧固件的应用情况

品 种	规格(d)	代 号	材 料	生 产 厂 家	应 用 情 况
钛螺栓	4, 5, 6	Q/JS118--91	Ti-22	3177, 172	J8、轰 x
100°沉头		Q/JS119--91	Ti-22	3177	J8
120°半沉头		Q/JS120--91	Ti-22	3117	J8
扁圆头螺钉	5				

表 11.76(续)

品 种	规格(d)	代 号	材 料	生 产 厂 家	应 用 情 况
钛高锁					
100°沉头	4.5.6	Q/1S116-91	Ti-22,47121	3117	J8、强-5
平头	4.5.6	Q/1S121-91	Ti-22	3117	J8
高锁螺母	4.5.6	Q/1S117-91	铝合金	3117	J8、强-5
100°沉头	4'8	HL13V-x-x	6Al-4V	Hi-Shear 公司	Y7、J8
平锥头	4~10	HL12V-x-x	6Al-4V	Hi-Shear 公司	Y7、J8
高锁螺母	4~10	HL86PB-x	303e 不锈钢	Hi-Shear 公司	Y7
		HL79PB-x	2024-Tb	Hi-Shear 公司	J8
纯钛铆钉	2.5~4.0	HB6478	TA1	3117	J8
大底脚螺纹抽钉					
平锥头 100°沉头	4	MBF2010S-05	6Al-4V	Monogram 公司	J8
	4~6	MBF2012S-05-07	6Al-4V	monogram 公司	J8
100°冠头双金属铆钉	4~6	CSR922-x-x	钉体 6Al-4V 钉尾 45Cb-Ti	Cherry 公司	Y7
100°沉头钛铌铆钉	2.4~4	CSR902B-x-x	45Cb-Ti	Cherry 公司	Y7
单面抽钉					
100°沉头	4~10	MS2140-x	A286	Huck, Cherry	DAC10 鸭翼、 垂尾 1:1 试件
	3~6	ASN-A00770-x	套筒铝合金 衬套不锈钢	法宇航公司总标 准局 F5442 厂	Z9
凸头	4~10	MS2141-x	A286	Huck, Cherry	DAC10 鸭翼 1:1 试验件
小扁圆头	3~6	ASN-A0078D-x	轴套蒙乃尔合金	法宇航公司总标 准局 F5224 厂	Z9

11.3 紧固件验收标准

本标准钛紧固件验收一般标准,不包括各类紧固件的特殊要求。

11.3.1 材料

化学成分、氢含量和技术数据应符合技术条件(TC4 技术条件见 GB2966--82)。

11.3.2 毛坯

- 钉头必须锻制成形,不得采用切削方法加工。
 - 钉头的金相切片晶粒流线应符合图 11.28。
 - 钉头支承面、头杆过渡圆角和杆部应无过热、晶粒胀大。
- 氢、氧含量不超过原材料技术条件的规定。
- 毛坯应进行热处理,使成品达到所需的机械性能要求。

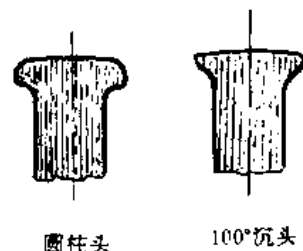


图 11.28 钉头的晶粒流线

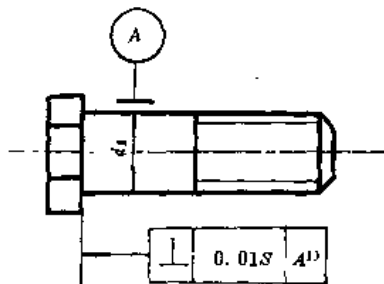
11.3.3 成品制造

- 螺纹必须滚压成形,不得采用切削加工。
- 头杆过渡圆角必须冷滚压成形。
- 螺纹及钉头根部圆角滚压成形后不得进行任何热处理。

11.3.4 形位公差

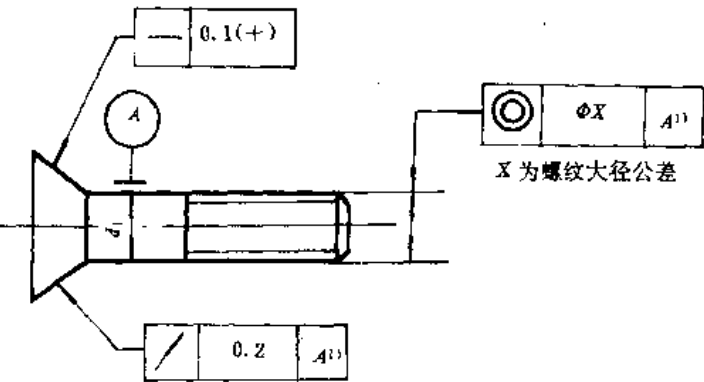
a. 所有紧固件必须符合图纸规定的形位公差要求,尺寸包括图上规定的镀、涂层,不包括表面润滑涂层。

b. 如图纸无规定,一般公差按 HB5800,钉头支承面对光杆轴线的垂直度按图 11.29,螺纹中径对光杆轴线的同轴度为螺纹大径公差,见图 11.30,图 11.31 和表 11.77。



注:1)螺钉以螺纹中径为基准,此时在 A 后面加 M; s 为六角对边宽度。

图 11.29 钉头支承面对光杆轴线的垂直度



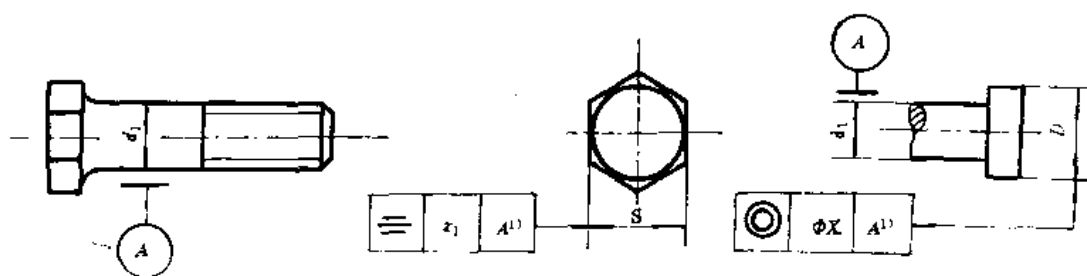
注:1)螺钉以螺纹中径为基准,此时在 A 后面加 M

图 11.30 螺纹中径对光杆轴线的同轴度和对称度

表 11.77 同轴度和对称度值 (mm)

螺纹直径	≤ 6	> 6
X1	0.3	0.5

c. 头杆过渡圆角半径应符合图纸要求,冷滚压引起的变形不得超过图 11.32 和表 11.78 的规定。



注:1)螺钉以螺纹中径为基准,此时在 A 后面加 M。

图 11.31 钉头对光杆轴线的同轴度和对称度

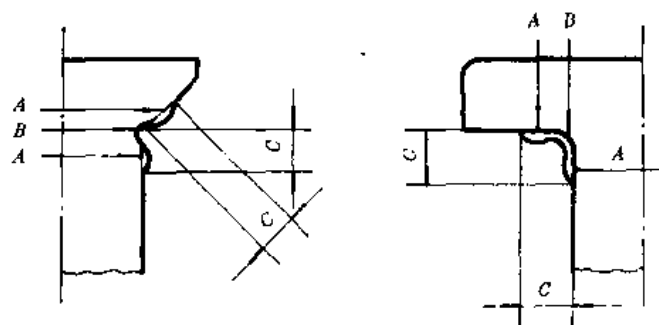


图 11.32 头杆过渡圆角的变形

表 11.78 头杆过渡圆角变形允许值

螺纹直径	A_{max}	B_{max}	C_{max}
5~7	0.030	0.025	1.5
8~10			2.5
12~15			3.5

11.3.5 螺纹

- 如无专门规定,一般应采用 MJ 螺纹,其牙型、尺寸与公差按 GJB3.1 和 GJB3.2。
- 螺纹表面应光洁无毛刺,牙底牙侧面粗糙度为 $\sqrt{0.8}$ 。
- 螺纹晶粒流线应沿螺纹外部连续排列,在牙底半径处具有最大密度(见图 11.33)。



图 11.33 滚压成形的螺纹流线

- 螺纹首尾应符合 GJB52。

11.3.6 表面缺陷及损伤

- a. 紧固件表面应光滑,任何部位不得有裂纹。
- b. 螺纹牙根不允许有断牙、折叠等缺陷;在牙顶非支承面允许有朝上的不规则缺陷,其深度不大于表 11.78 中规定的值是允许的(参见图 11.34)。
- c. 钉头非支承表面允许有折叠、沟槽和擦伤,但其深度不得超过表 11.79(所给值)的两倍。
- d. 钉头支承面及安装夹层中的钉杆部位(不含钉头根部圆角)允许有折叠,但不得超过表 11.77 中的值。
- e. 钉头根部圆角不允许有折叠、明显接缝或夹渣。

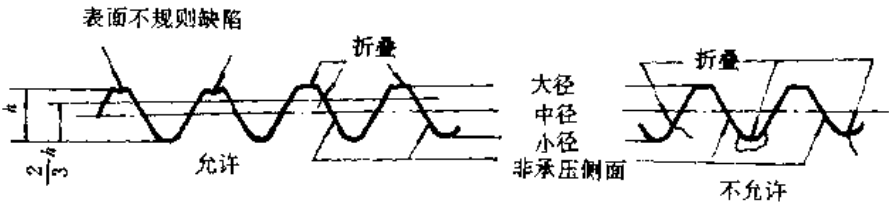


图 11.34 螺纹上允许和不允许的不连续缺陷

表 11.79 螺纹上的表面不连续性缺陷允许值 (mm)

螺纹直径 d	$\leq \text{MJ}8 \times 1$	$\text{MJ}10 \times 1.25$	$\text{MJ}12 \times 1.25$
表面不连续性缺陷的深度	0.12	0.15	0.20

11.3.7 机械性能

- a. 拉-拉试验
拉-拉试验按 GJB715.23 进行。TC4 紧固件最小破坏拉力应达到表 11.80 规定值。

表 11.80 拉-拉试验最小破坏拉力

螺纹直径(d)	$\text{MJ}5 \times 0.8$	$\text{MJ}6 \times 1$	$\text{MJ}8 \times 1$	$\text{MJ}10 \times 1.25$	$\text{MJ}12 \times 1.25$
六角头螺栓、螺钉(kN)	15.5	22	40	63.3	96
100°沉头螺栓、螺钉(kN)	11.6	16.5	30	47.48	--
高锁螺栓(kN)	8.41	11.96	22.92	35.82	

- b. 抗剪试验
抗剪试验按 GJB715.24 进行。TC4 紧固件最小单面破坏剪力应达到表 11.81 规定值。

表 11.81 抗剪试验最小单面破坏剪力

螺纹直径	d	$\text{MJ}5 \times 0.8$	$\text{MJ}6 \times 1$	$\text{MJ}10 \times 1.25$	$\text{MJ}12 \times 1.25$	
kN		12.7	18.3	32.5	50.8	73.2

- c. 拉-拉疲劳试验

拉-拉疲劳试验按 GJB715.30 进行。TC4 紧固件室温下拉-拉疲劳试验载荷按表 11.82。

表 11.82 拉-拉疲劳试验载荷

螺纹直径 d	MJ5×0.8		MJ6×1		MJ8×1		MJ10×1.25		MJ12×1.25	
类别 载荷	高载	低载	高载	低载	高载	低载	高载	低载		
	±290									
	N									
六角头螺栓	6200	620	8800	880	16000	1600	25300	3530	38400	3340
高锁螺栓	3370	337	4790	479	9170	917	14300	1430	-	-
100°沉头螺栓	4640	464	6600	660	12000	1200	19000	1900		

加载频率的最大值为 140Hz,当频率高出 30Hz 时,应在载荷稳定后计算。

螺栓应能承受平均循环 65000 次,计算平均值时超过 130000 次的部分数值不计入,所有的试验螺栓必须超过 45000 次。

杆部钻孔的螺栓,疲劳试验必须在钻孔前进行。

除特殊规定外,光杆长度小于螺纹大径两倍的螺栓不做疲劳试验,但可从同批材料中取试样进行试验。

紧固件验收方法和程序按 HB6568-92 中第“9”节进行。

参考文献

- [11-1] 钛合金螺栓、螺钉技术条件(HB6568-92)。
- [11-2] 钛合金紧固件采购规范,NAS621。
- [11-3] 法国航空标准:AIR9184 钛合金螺栓的暂行验收条件。

附录 A 复合材料性能数据

A.1 概述

复合材料的性能数据是复合材料设计应用的基础。本附录所列数据,一是已经用于飞机结构设计的材料数据;二是新研制材料的数据;为了参考对比,同时也列出了与国内材料相当的国外材料相当的数据。国外材料数据较全,而且这些材料已得到广泛应用,可为设计提供更多的信息。据此,本章列出 T300/4211、T300/5222、T300/QY8911、T300/LWR-1、T300/5405 等国产复合材料的性能数据,同时列出与 T300/5222 相当的 T300/5208、AS/3501、T300/914C 和与 T300/QY8911、T300/5405 相当的 G300-600/5245C 等国外复合材料单向层压板的性能数据。

A.1.1 复合材料体系简介

本附录所列复合材料体系简单介绍见表 A.1。

表 A.1 复合材料体系简介

材料牌号 (材料标准)	基本组成	研制与 生产单位	鉴定级别 与日期	应用概况	特 点
T300/4211 (Q/6S 451-85)	酚醛环氧树 酯,潜伏性固化 剂; T300 高强 型碳纤维	北京航 空材料研 究所、北京 航空工艺 研究所	1984 年 7 月由航空 工业部鉴 定通过	已试用 于制造军 机垂直尾 翼壁板和 飞机进气 道外侧壁 板,并用于 制造羽毛 球拍	预浸料工艺性能好, 可在室温下存放,可用 热压罐法、模压法、热 膨胀模塑法成形。制品 可在 120℃ 以下使用
T300/5222 (Q/6Sz 345-323)	多功能闭环 环氧树脂胺类固 化剂; T300 高 强型碳纤维	北京航 空材料研 究所	1983 年 由航空工 业部鉴定 通过	已用于 歼击机机 翼	可用热压罐法、模压 法、热膨胀法成形。制 品耐高温、耐湿热、力 学性能良好,可在 130℃ 以下使用
T300/HD03C	HD03C 环氧 树脂; T300 高 强型碳纤维	西安飞 机制造公 司	1984 年 由航空工 业部鉴定 通过	已用于: K8 安定 面、方向 舵; Y7-200A (B)、腹鳍; H7 阻力板	可用热压罐、热压 机、热膨胀模塑法成 形,质量易于控制,脱 模性能好。制品耐湿热 性能良好,可在 100℃ 以下使用

续表 A.1

材料牌号 (材料标准)	基本组成	研制与 生产单位	鉴定级别 与日期	应用概况	特 点
T300/LWR-1	E-54 环氧树脂, DDS 固化剂; T300 高强型碳纤维	黑龙江省石油化学研究所研制。北京航空工艺研究所生产	1989 年 3 月由航空工业部鉴定通过	已用于强击机前机身段	具有良好的耐湿热性能, 可用热压罐等方法成形。制品可在 80℃ 以下使用
T300/QY8911	改性双马来酰亚胺树脂; T300 高强型碳纤维	北京航空工艺研究所	1988 年 7 月由航空工业部评审通过	飞机垂尾整流罩壁板, 软装置回收头锥, 导弹翼面	预浸料具有良好的工艺性, 制品耐高温, 韧性好, 价廉。可用热压罐等方法成形。可在 150℃ 以下使用, 瞬时静态 230℃ 以下使用
T300/5405	改性双马来酰亚胺树脂, T300 高强型碳纤维	西北工业大学、北京航空材料研究所	1992. 1 月由航空航天工业部评审通过	已用于歼击机机翼	良好的耐湿热性能, 可在 130℃ 下使用, 韧性好预浸料具有良好的工艺性, 可用热压罐等方法成形
T300/5208	5208 环氧树脂; T300 碳纤维	Narmco 公司			制品具有耐高温和优异的层间剪切性能。可在 -55~177℃ 使用
T300/914	914 改性环氧树脂; T300-6K 碳纤维	Ciba 公司		A300 空中客车、海豚直升机尾桨涵道、驾驶员座椅	制品可在 -50~180℃ 使用
G300-600/ 5245C	5245C 改性双马来酰亚胺树脂; G30-600 碳纤维	Narmco 公司			制品具有良好的耐湿热性能与韧性, 可在 -59~177℃ 使用

A.1.2 符号

单向层压板纵向拉伸强度	X_t	(MPa)
单向层压板纵向拉伸模量	E_{1t}	(GPa)
单向层压板纵向压缩强度	X_c	(MPa)
单向层压板纵向压缩模量	E_{1c}	(GPa)
单向层压板主泊松比	ν_{12}	
单向层压板横向拉伸强度	Y_t	(MPa)
单向层压板横向拉伸模量	E_{2t}	(GPa)
单向层压板横向压缩强度	Y_c	(MPa)

单向层压板横向压缩模量	E_{2c}	(GPa)
单向层压板纵横剪切强度	S	(MPa)
单向层压板纵横剪切模量	G_{12}	(GPa)
单向层压板弯曲强度	σ_b^I	(MPa)
单向层压板弯曲模量	E^I	(MPa)
单向层压板短梁剪切强度	τ_b^I	(MPa)
单向层压板纵向拉伸断裂应变	ϵ_{1t}	(%)
单向层压板横向拉伸断裂应变	ϵ_{2t}	(%)
单向层压板纵向压缩断裂应变	ϵ_{1c}	(%)
单向层压板横向压缩断裂应变	ϵ_{2c}	(%)
单向层压板纵横剪切断裂应变	γ_{12}	(%)
多向层压板纵向拉伸强度	σ_{xt}	(MPa)
多向层压板纵向拉伸模量	E_{xt}	(GPa)
多向层压板纵向拉伸断裂应变	ϵ_{xt}	(%)
多向层压板横向拉伸强度	σ_{yt}	(MPa)
多向层压板横向拉伸模量	E_{yt}	(GPa)
多向层压板纵向泊松比	ν_{xy}	
多向层压板剪切强度	S_x	(MPa)
多向层压板剪切模量	G_{xy}	(GPa)
多向层压板纵向压缩强度	σ_{xc}	(MPa)
多向层压板纵向压缩模量	E_{xc}	(GPa)
多向层压板纵向压缩断裂应变	ϵ_{xc}	(%)
多向层压板横向压缩强度	σ_{yc}	(MPa)
多向层压板横向压缩模量	E_{yc}	(GPa)
多向层压板纵向弯曲强度	σ_x^I	(MPa)
多向层压板密度	ρ	(kg/m ³)
空隙含量	V_v	(%)
纤维体积含量	V_f	(%)
纵向热膨胀系数	α_1	(1/K)
横向热膨胀系数	α_2	(1/K)
纵向湿膨胀系数	β_1	
横向湿膨胀系数	β_2	
导热系数	λ	W/(m · K)
比热容	c	J/(kg · K)
相对湿度	RH	(%)
水分含量	m	(%)
热扩散系数	D_t	(m ² /s)
玻璃化转变温度	T_R	(°C)

A.1.3 复合材料各体系主要性能

a. 几种复合材料单向层压板主要性能在表 A.2 中给出。

表 A.2 几种复合材料单向层压板主要性能

性 能	T300/ 4211	300/ 5222	T300/ CFR-150A	T300/ HD03	T300/ LWR-1	T300 QY8911	T300 5405
X_t (MPa)	1396	1490	1420	2020	1956	1548	1787
E_{1t} (GPa)	126	135	133	159	141	135	148
ν_{12}	0.33	0.28	0.33	0.32	0.31	0.33	0.28
Y_t (MPa)	33.9	40.7	37.6	64.4	58.1	55.5	76.0
E_{2t} (GPa)	8.0	9.4	11.6	9.5	8.8	8.8	8.6
X_c (MPa)	1029	1210	1470		1075	1226	1380
E_{1c} (GPa)	116	134	126	153	133	125.6	108
Y_c (MPa)	166.6	197.0		178	166.1	218	200
E_{2c} (GPa)	7.8	10.8		8.9	10.7	10.7	10.8
S (MPa)	65.5	92.3	61.1	73.1	99.6	89.9	135
G_{12} (GPa)	3.7	5.0	5.5	5.5	4.9	4.47	4.38
ρ (kg/m ³)	1560	1610	1580	1160		1614	1570
T_g (°C)	154~170 ^①	230 ^②	205~215 ^①	182 ^②		268~276 ^③	211 ^②

注: T300/4211, T300/5222, T300/QY8911 给出至少 5 批约 50 个试样的平均值。平均值是指多批次试样测试结果的平均, 其余为典型值。典型值是同一批材料试样(最少 5 个)测试结果的平均值

①由 TMA 法测得

②由 DMA 法测得

b. 几种国外复合材料单向层压板性能在表 A.3 中给出

表 A.3 几种国外复合材料单向层压板主要性能(室温干态)

性 能	T300/5208	AS/3501	T300/914C	G300-600/5245C
X_t (MPa)	1496	1165	1784	2314
E_{1t} (GPa)	180	128	143	139
ν_{12}	0.28	0.30	0.32	
Y_t (MPa)	40.1	41.0	64.8	57
E_{2t} (GPa)	10.3	11.0	10.2	7.9
X_c (MPa)	1496	1060	1086	1551
E_{1c} (GPa)	158	128		137
Y_c (MPa)	249	207	215	223
E_{2c} (GPa)	11.3	11.0		14.9
S (MPa)	67.2	69	92.4	115
G_{12} (GPa)	7.2	5.9	6.2	5.0

A.2 国内几种复合材料单向层压板主要性能

A.2.1 T300/4211 性能

T300/4211 单向层压板力学性能在表 A.4 中给出。

表 A.4 T300/4211 单向层压板力学性能

性 能	室 温		-60°	60°	125°
	平均值	B 基准值			
X_t (MPa)	1396	1186	1310	1570	
E_{11} (GPa)	126		131	144	135
ν_{12}	0.33		0.27	0.32	0.32
Y_t (MPa)	33.9	21.0	34.1	34.1	19
E_{2t} (GPa)	8.0		10.2	9.7	5.9
X_c (MPa)	1029	928			1030
E_{1c} (GPa)	116				119
Y_c (MPa)	166.6	109.2	238	205	
E_{2c} (GPa)	7.8		10.5	9.9	
S (MPa)	65.5	46.5	78.3	72.0	44.3
G_{12} (GPa)	3.7		4.7	4.5	2.1
τ_b (MPa)	82.6				
σ_b (MPa)	1590				

A.2.2 T300/5222 性能

T300/5222 单向层压板力学性能在表 A.5 中给出。

表 A.5 T300/5222 单向层压板力学性能

性 能	室 温		120°		-55°	30°	120°	130°
	平均值	B 基准值	平均值	B 基准值				
X_t (MPa)	1490	1230	1557	1359	1220			
E_{1t} (GPa)	135	126	112	102	134			
ν_{12}	0.28	0.25	0.30					
Y_t (MPa)	40.7	26.4	15.7	10.12	29.0			
E_{2t} (GPa)	9.4	7.3	5.9	5.2	10.4			
X_c (MPa)	1210	1051	1016	845.0	1408			
E_{1c} (GPa)	134	121	125	108	126			
Y_c (MPa)	197.0	168.0	136.0	109.5				
E_{2c} (GPa)	10.8	9.4	8.1	6.8				
S (MPa)	92.3	87.0	70.6	58.7	112.6			
G_{12} (GPa)	5.0	4.5	2.7	2.1	5.6			
τ_b (MPa)	100							
σ_b (MPa)	1860							

A.2.3 T300/QY8911 性能

T300/QY8911 单向层压板力学性能在表 A.6 中给出。

表 A.6 T300/QY8911 单向层压板力学性能

性 能	室温干态		130°/干	150°/干	150°/湿
	平均值	B 基准值			
X_t (MPa)	1548	1239	1579	1448	1250
E_{1t} (GPa)	135	125	128	128	
ν_{12}	0.33				
Y_t (MPa)	55.5	38.7	51.1	44.6	25.8
E_{2t} (GPa)	8.8	7.2	9.2	8.2	
X_c (MPa)	1226	1081	1344	1221	
E_{1c} (GPa)	125.6	116	119	114	
Y_c (MPa)	218	189.4	172	154	
E_{2c} (GPa)	10.7	9.87	8.2	7.9	
S (MPa)	89.9	81.2	80.8	73.5	56.5
G_{12} (GPa)	4.47	4.1	4.0	3.5	
τ_b^I (MPa)	110.5			77.0	64.0
σ_b (MPa)			1655	1725	986

A.3 国外几种复合材料单向层压板主要性能

A.3.1 T300/5208 性能

T300/5208 单向层压板力学性能在表 A.7 中给出。

表 A.7 T300/5208 单向层压板力学性能

性 能	室 温	127°	177°	98%RH, 1000h, 湿态条件		
				室 温	127°	177°
X_t (MPa)	1496	1468	1427	1324	1331	1180
E_{1t} (GPa)	130	204	196	151	152	163
ν_{12}	0.28	0.31	0.26	0.34	0.37	0.39
Y_t (MPa)	40.1	28.2	19.8	39.7	18.8	18.9
E_{2t} (GPa)	10.3	11.5	12.2	10.8	11.5	10.9
X_c (MPa)	1496	1427	1413	1454	1448	
E_{1c} (GPa)	158	149	154	123	136	
Y_c (MPa)	249	224	208			
E_{2c} (GPa)	11.3	11.5	11.0			
S (MPa)	67.2	49.4	37.7			
G_{12} (GPa)	7.2	6.8	6.0			
τ_b (MPa)	109	85.7	61			
σ_b (MPa)	1694	1557	1345			
ϵ_{1t} (10^{-3})	7960	7610	7350	8750	8730	7280
ϵ_{2t} (10^{-6})	3750	2490	1690	3490	1330	1360
ϵ_{1c} (10^{-6})	9490	11590	12770	12560	12720	
ϵ_{2c} (10^{-6})	24950	21350	22930			
γ_{12} (10^{-6})	14670	11810	18570			

A.3.2 AS/3501 性能

AS/3501 单向层压板干、湿态力学性能在表 A.8 和表 A.9 中给出。

表 A.8 AS/3501 单向层压板干态力学性能

性 能	试 验 温 度 (°C)						
	-54	室温	66	93	121	149	177
X_t (MPa)	1150	1165	1145	1125	1115	1085	1050
E_{11} (GPa)	129	128	126	124	123	123	122
ν_{12}		0.3					
Y_t (MPa)	39	41	39	37	34	30	22
E_{22} (GPa)	11.2	11.0	10.7	10.4	9.7	9.0	7.2
X_c (MPa)	1100	1060	1010	965	920		
E_{1c} (GPa)	129	128	126	124	123	123	122
Y_c (MPa)	297	207	179	159	145	124	97
E_{2c} (GPa)	11.2	11.0	10.7	10.4	9.7	9.0	7.2
S (MPa)	31	69	65	63	61	58	55
G_{12} (GPa)	6.0	5.9	5.6	5.3	4.8	4.1	2.8

表 A.9 AS/3501 单向层压板湿态力学性能($m=1\%$)

性 能	试 验 温 度 (°C)					
	-54	室温	66	93	121	149
X_t (MPa)	1080	1110	1110	1090	1080	1070
E_{11} (GPa)	129	127	126	124	123	123
Y_t (MPa)	29	24	21	19	15	8
E_{22} (GPa)	11.2	9.0	7.0	5.5	3.4	1.38
X_c (MPa)	1060	995	910	820	100	
E_{1c} (GPa)	129	127	126	124	123	123
Y_c (MPa)	269	179	152	131	97	69
E_{2c} (GPa)	11.2	9.0	7.0	5.5	3.4	1.38
S (MPa)	31	69	61	55	47	39
G_{12} (GPa)	6.0	5.9	5.4	4.7	3.6	1.10

A. 3.3 T300/914C 性能

T300/914C 单向层压板温湿条件下力学性能在表 A. 10 中给出。

表 A. 10 T300/914C 单向层压板在不同温湿度条件下的力学性能(典型值)

性 能		水 含 分 量 (%)	试 验 温 度 (°C)					
			- 55	0	23	40	80	120
0° 拉 伸	X_1 (MPa)	0	1584	1796	1784	1762	1907	1234
		0.9		1889	1887	1856	1918	1256
		1.6		1836	1934	1934	1833	1212
	E_{11} (GPa)	0	121	142	143	144	144	122
		0.9		145	151	142	146	134
		1.6		145	148	140	154	137
	ν_{12}	0	0.32	0.30	0.32	0.31	0.30	0.32
		0.9		0.31	0.32	0.32	0.32	0.36
		1.6		0.31	0.33	0.32	0.32	0.38
90° 拉 伸	Y_1 (MPa)	0	61.5	65.5	64.8	60.8	47.6	52.4
		0.9		61.7	55.6	54.5	44.8	18.4
		1.6		56.9	46.1	45.7	29	14.3
	E_{21} (GPa)	0	10.1	10.1	10.2	9.5	10.1	7.7
		0.9		10.1	10.0	9.9	9.2	5.4
		1.6		9.8	9.4	9.0	8.2	3.6
0° 压 缩	X_c (MPa)	0	1328	1111	1086	1059	1024	914
		0.9		1106	1090	864	971	670
		1.6		1138	1008	831	706	675
90° 压 缩	Y_c (MPa)	0	317	230	215	224	202	167.1
		0.9		232	212	182	168.4	140
		1.6		207	185.7	155.6	144.7	119
纵 横 剪 切	S (MPa)	0	110.2	99.44	92.4	86.4	87	95.3
		0.9		99	94.9	91.5	85.9	82.2
		1.6		104.9	99.0	93.8	74.9	70.2
	G_{12} (GPa)	0	5.4	6.3	6.2	5.65	5.5	4.2
		0.9		6.2	5.9	5.6	5.2	3.2
		1.6		6.0	5.4	5.4	4.5	1.94

A. 3.4 G30—600/5245C 性能

G30—600/5245C 单向层压板性能在表 A. 11 中给出。

表 A. 11 G30—600/5245C 单向层压板性能(典型值)

性 能	试 验 温 度 (°C)			
	—54	室 温	93	132
X_t (MPa)	2263	2314	2295	2036
E_{1t} (GPa)	143	139	137	134
ϵ_{1t} (%)	1.58	1.68	1.67	1.53
Y_t (MPa)	51	57	55	50
E_{2t} (GPa)	8.0	7.9	6.4	5.7
ϵ_{2t} (%)			0.82	
X_c (MPa)	1680	1551	1454	1357
E_{1c} (GPa)	142	137	133	126
ϵ_{1c} (%)	1.18	1.13	1.09	1.07
Y_c (MPa)		223		169
E_{2c} (GPa)		14.9		7.1
ϵ_{2c} (%)		1.35		1.48
S (MPa)	98	115	109	81
G_{12} (GPa)		5.0 (G40—600)		
τ_{th} (MPa)	129	107	84	72

参 考 文 献

- [A—1] 航空航天工业部科学技术研究院编。复合材料设计手册。北京：航空工业出版社，1990。104～150

附录 B 复合材料力学基础

本节给出单向和多向层压板平面应力状态的应力-应变关系和单层失效准则。

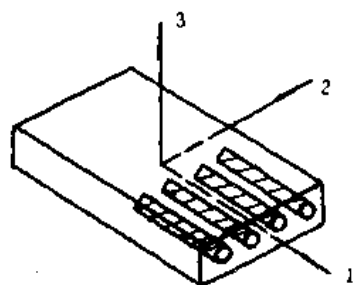
B.1 单层应力-应变关系

B.1.1 单层在平面应力状态的正轴应力-应变关系

正轴坐标下的铺层如图 B.1 所示。

应力-应变关系为:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (\text{B.1})$$



(B.2) 图 B.1 正轴坐标下的铺层

$$\begin{cases} Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{66} = G_{12} \end{cases}$$

式中 ν_{ij} 定义为: $\nu_{ij} = -\epsilon_j/\epsilon_i$, 在仅有应力分量 σ_i 作用时 j 方向的横向应变的泊松比, 且有关系式:

$$\frac{\nu_{ij}}{E_j} = \frac{\nu_{ji}}{E_i} \quad i, j = 1, 2 \quad (\text{B.3})$$

应变-应力关系为:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (\text{B.4})$$

$$\begin{cases} S_{11} = \frac{1}{E_1} \\ S_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2} \\ S_{22} = \frac{1}{E_2} \\ S_{66} = \frac{1}{G_{12}} \end{cases} \quad (\text{B.5})$$

B.1.2 单层在平面应力状态的偏轴应力-应变关系

偏轴坐标下的铺层如图 8.2 所示。

正轴应力-偏轴应力转换关系

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (\text{B. 6})$$

式中 $m = \cos\theta$ $n = \sin\theta$

偏轴应力-正轴应力转换关系:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -2mn \\ n^2 & m^2 & 2mn \\ mn & -mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (\text{B. 7})$$

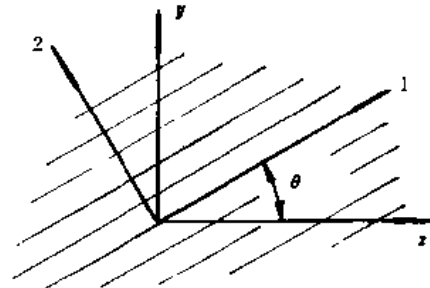


图 B.2 偏轴坐标下的铺层

正轴应变-偏轴应变转换关系:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & mn \\ n^2 & m^2 & -mn \\ -2mn & 2mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (\text{B. 8})$$

偏轴应变-正轴应变转换关系:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -mn \\ n^2 & m^2 & mn \\ mn & -mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_{12} \end{Bmatrix} \quad (\text{B. 9})$$

偏轴的应力-应变关系:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (\text{B. 10})$$

式中:

$$\begin{Bmatrix} \bar{Q}_{11} \\ \bar{Q}_{22} \\ \bar{Q}_{12} \\ \bar{Q}_{66} \\ \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{26} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m^4 & n^4 & 2m^2n^2 & 4m^2n^2 \\ n^4 & m^4 & 2m^2n^2 & 4m^2n^2 \\ m^2n^2 & m^2n^2 & m^4 + n^4 & -4m^2n^2 \\ m^2n^2 & m^2n^2 & -2m^2n^2 & (m^2 - n^2)^2 \\ m^3n & -mn^3 & mn^3 - m^3n & 2(mn^3 - m^3n) \\ mn^3 & -m^3n & m^3n - mn^3 & 2(m^3n - mn^3) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q_{11} \\ Q_{22} \\ Q_{12} \\ Q_{66} \end{Bmatrix} \quad (\text{B. 11})$$

偏轴的应变-应力关系:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (\text{B. 12})$$

式中:

$$\begin{Bmatrix} \bar{S}_{11} \\ \bar{S}_{22} \\ \bar{S}_{12} \\ \bar{S}_{66} \\ \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{26} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m^4 & n^4 & 2m^2n^2 & m^2n^2 \\ n^4 & m^4 & 2m^2n^2 & m^2n^2 \\ m^2n^2 & m^2n^2 & m^4+n^4 & -m^2n^2 \\ 4m^2n^2 & 4m^2n^2 & -8m^2n^2 & (m^2-n^2)^2 \\ 2m^3n & -2mn^3 & 2(mn^3-m^3n) & mn^3-m^3n \\ 2mn^3 & -2m^3n & 2(m^3n-mn^3) & m^3n-mn^3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{12} \\ S_{66} \end{Bmatrix} \quad (\text{B. 13})$$

B.2 层压板内力-应变关系

层压板内力如图 B.3 所示

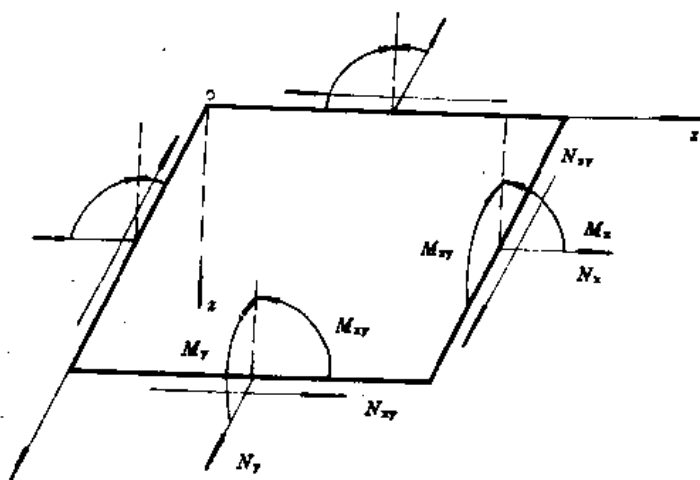


图 B.3(a) 层压板内力(图示内力均为正)

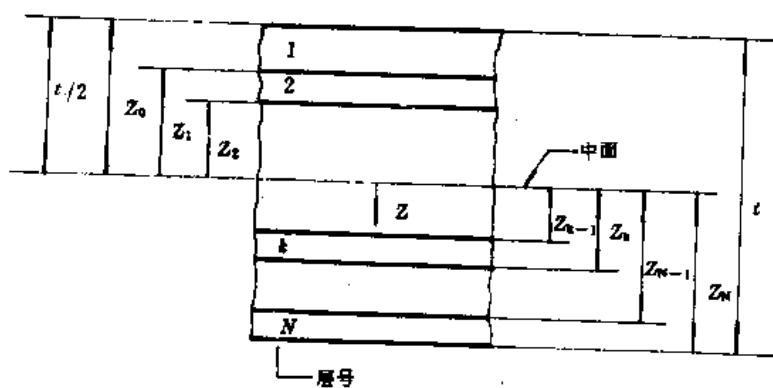


图 B.3(b) 辅层示意图

应力-应变关系为:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (\text{B. 14})$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (\text{B. 15})$$

式中:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \quad (\text{B. 16})$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad (\text{B. 17})$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (\text{B. 18})$$

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \partial u_0 / \partial x \\ \partial v_0 / \partial y \\ \partial u_0 / \partial y + \partial v_0 / \partial x \end{Bmatrix} \quad (\text{B. 19})$$

$$\begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} \partial^2 W_0 / \partial x^2 \\ \partial^2 W_0 / \partial y^2 \\ 2 \partial^2 W_0 / \partial x \partial y \end{Bmatrix} \quad (\text{B. 20})$$

对于对称层压板 $B_{ij}=0$ 。

B. 3 单层失效准则

B. 3.1 最大应力失效准则

材料主方向的应力满足下列条件之一,材料就失效:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &\geq X_t & \text{或} & |\sigma_1| \geq X_c \\ \sigma_2 &\geq Y_t & \text{或} & |\sigma_2| \geq Y_c \\ |\tau_{12}| &\geq S \end{aligned} \quad (\text{B. 21})$$

B. 3.2 最大应变失效准则

材料主方向的应变满足下列条件之一,材料就失效:

$$\begin{aligned} \sigma_1 - \nu_{12}\sigma_2 &\geq X_t & \text{或} & |\sigma_1 - \nu_{12}\sigma_2| \geq X_c \\ \sigma_2 - \nu_{21}\sigma_1 &\geq Y_t & \text{或} & |\sigma_2 - \nu_{21}\sigma_1| \geq Y_c \\ |\tau_{12}| &\geq S \end{aligned} \quad (\text{B. 22})$$

B. 3.3 蔡-希尔(Tsai-Hill)失效准则

$$\left(\frac{\sigma_1}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{Y}\right)^2 - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 = 1 \quad (\text{B. 23})$$

对于拉压强度不同的材料,式中 X, Y 对应于拉力时用拉伸强度,而对应于压应力时用压

缩强度。

B. 3. 4 诺里斯(Norris)失效准则

$$\left(\frac{\sigma_1}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{Y}\right)^2 - \frac{\sigma_1\sigma_2}{XY} + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 = 1 \quad (\text{B. 24})$$

对于拉压强度不同的材料,式中 X, Y 对应于拉应力时用拉伸强度,而对应于压应力时用压缩强度。

B. 3. 5 霍夫曼(Hoffmon)失效准则

$$\frac{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} + \frac{X_c - X_t}{X_t X_c} \sigma_1 + \frac{Y_c - Y_t}{Y_t Y_c} \sigma_2 + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1 \quad (\text{B. 25})$$

B. 3. 6 蔡-胡(Tsai-Wu)失效准则

$$F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_6^2 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 = 1$$

式中:

$$F_{11} = \frac{1}{X_t X_c} \quad F_{22} = \frac{1}{Y_t Y_c} \quad F_{66} = \frac{1}{S^2}$$

$$F_1 = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \quad F_2 = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \quad \sigma_6 = \tau_{12}$$

$$\text{一般,} \quad -1 < \frac{F_{12}}{\sqrt{F_{11}F_{22}}} < 1$$

计算时注意,工作应力为代数量,正面正向为正,负面负向为正,否则为负;基本强度为绝对值。

参 考 文 献

[B-1] 琼斯 R M 著,朱颐龄等译. 复合材料力学. 上海科学技术出版社,1981

[B-2] 航空航天部科学技术研究院编,复合材料设计手册. 北京:航空工业出版社,1990,42~88

附录 C 开孔应力集中和强度

本节给出各向异性板圆孔的应力集中系数,预示开孔板破坏强度的断裂准则,实测的特征尺寸和开孔强度。

C.1 开孔应力集中

影响复合材料应力集中的因素比各向同性材料复杂得多。各向同性材料的应力集中系数仅是零构件几何特征的函数,与其他任何因素无关。而各向异性的复合材料,开孔产生的应力集中效应不仅与几何尺寸有关,还与层压板的工程弹性常数有关,即与材料体系和铺叠方式有关。当选定某一种复合材料和结构尺寸时,不同层压板的应力集中系数的差别很大。以碳纤维 T300 树脂基复合材料体系为例,对于无限大正交异性板含圆孔情况,100%0°层压板的应力集中系数高达 7 以上,而 100%±45°层压板的应力集中系数只有 2 左右,对于连接区推荐使用的铺层比例范围的层压板(0°层≥25%,±45°层≥40%,90°层≥10~25%),应力集中系数在 3~3.7 之间。0°层比例愈大,应力集中也就愈严重。±45°层具有降低应力集中的作用。

C.1.1 无限大正交各向异性板圆孔的应力集中

当坐标轴与材料主方向一致时,含圆孔无限大正交各向异性板在远处受均匀拉伸应力 σ 作用时(图 C.1),沿坐标轴的应力分布如下所述。

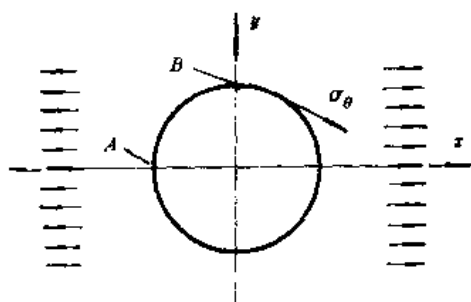


图 C.1 含圆孔的无限大正交各向异性板

沿 $x=0$ 截面(y 轴)上的法向应力分布为:

$$\sigma_x(0, y) = \sigma \left[1 + \frac{1}{\beta_1 - \beta_2} \left\{ \frac{\beta_1^2}{1 - \beta_1} \left(1 - \frac{\beta_1 y}{\sqrt{R^2 + \beta_1^2 (y^2 - R^2)}} \right) \right\} \right]$$

$$-\frac{\beta_2^2}{1-\beta_2}\left\{1-\frac{\beta_2 y}{\sqrt{R^2+\beta_2^2(y^2-R^2)}}\right\} \quad (C.1)$$

上式可近似表示为:

$$\sigma_x(0,y)=\frac{\sigma}{2}\left\{2+\left(\frac{R}{y}\right)^2+3\left(\frac{R}{y}\right)^4-(K_1^\infty-3)\left[5\left(\frac{R}{y}\right)^6-7\left(\frac{R}{y}\right)^8\right]\right\} \quad (C.2)$$

B 点的应力集中系数:

$$\begin{aligned} K_1^\infty &= K_{1B} = \sigma_x(0,b)/\sigma = 1 + \beta_1 + \beta_2 \\ &= 1 + \sqrt{E_x/G_{xy} + 2(\sqrt{E_x/E_y} - \nu_{xy})} \end{aligned} \quad (C.3)$$

沿 $y=0$ 截面(x 轴)上的法向应力分布为:

$$\sigma_y(x,0)=\frac{\sigma}{\beta_1-\beta_2}\left\{\frac{1}{1-\beta_1}\left(1-\frac{x}{\sqrt{x^2-R^2+\beta_1^2R^2}}\right)-\frac{1}{1-\beta_2}\left(1-\frac{x}{\sqrt{x^2-R^2+\beta_2^2R^2}}\right)\right\} \quad (C.4)$$

A 点的应力集中系数:

$$K_{1A} = \sigma_y(a,0)/\sigma = -1/\beta_1\beta_2 = -\sqrt{E_y/E_x} \quad (C.5)$$

沿圆孔周界的法向应力分布为:

$$\sigma_\theta = E_\theta \epsilon_\theta \sigma \quad (C.6)$$

式中:

$$\begin{aligned} \epsilon_\theta &= [-\beta_1\beta_2\cos^2\theta + (1+\beta_1+\beta_2)\sin^2\theta]/E_x \\ &= [\cos^2\theta/K_{1A} + \sin^2\theta K_{1B}]/E_x \end{aligned} \quad (C.7)$$

$$1/E_\theta = \frac{\sin^4\theta}{E_x} + \left(\frac{1}{G_{xy}} - \frac{2\nu_{xy}}{E_x}\right)\sin^2\theta\cos^2\theta + \frac{\cos^4\theta}{E_y} \quad (C.8)$$

θ , 孔周界某点的法向与 x 轴的夹角

$$\beta_1 \cdot \beta_2 = \sqrt{E_x/E_y} \quad (C.9)$$

$$\beta_1 + \beta_2 = \sqrt{2(\sqrt{E_x/E_y} - \nu_{xy}) + E_x/G_{xy}} \quad (C.10)$$

对于大多数层压板, B 点的应力集中系数是最严重的。但是, 对于碳纤维复合材料层压板, 如果 $\pm 45^\circ$ 层含量特别多, 约在 90% 以上, 最大应力集中的位置稍微偏离 B 点, 其值略高于 B 点的值。今后如不特别说明, 应力集中系数均指 B 点而言, 用 K_{1B} 表示, 在不致混淆的情况下用 K_1 表示, 无限大板时记作 K_1^∞ 。

实验和分析表明, 对于纤维/树脂基体复合材料, 影响应力集中的主要因素是纤维, 不同树脂基体对应力集中的影响可以忽略。图 C.2 给出了适用于纤维 T300/4211、5222 和 QY8911 等热固性树脂基体复合材料体系的应力集中系数 K_1^∞ 。

C.1.2 应力集中的板宽修正系数

应力集中的板宽修正系数 η 定义为:

$$\eta = K_1/K_1^\infty \quad (C.11)$$

式中 K_1 ——有限宽板的应力集中系数;

实验和分析表明, 在工程精度范围内复合材料应力集中的板宽修正系数可以采用具有同

样几何形状的各向同性材料的数值,对于圆孔情况有下列关系:

$$\eta = \frac{K_1}{K_1^\infty} = \frac{2 + [1 - (D/W)]^3}{3[1 - (D/W)]} \quad (C.12)$$

式中 W ——板宽;

D ——孔径。

于是,由式(C.11)可得复合材料有限宽板圆孔的应力集中系数,

$$K_1 = \eta K_1^\infty \quad (C.13)$$

式中的 K_1^∞ 可由式(C.3)得到,特别是对于 T300 碳纤维树脂基体复合材料,可由图 C.2 得到。

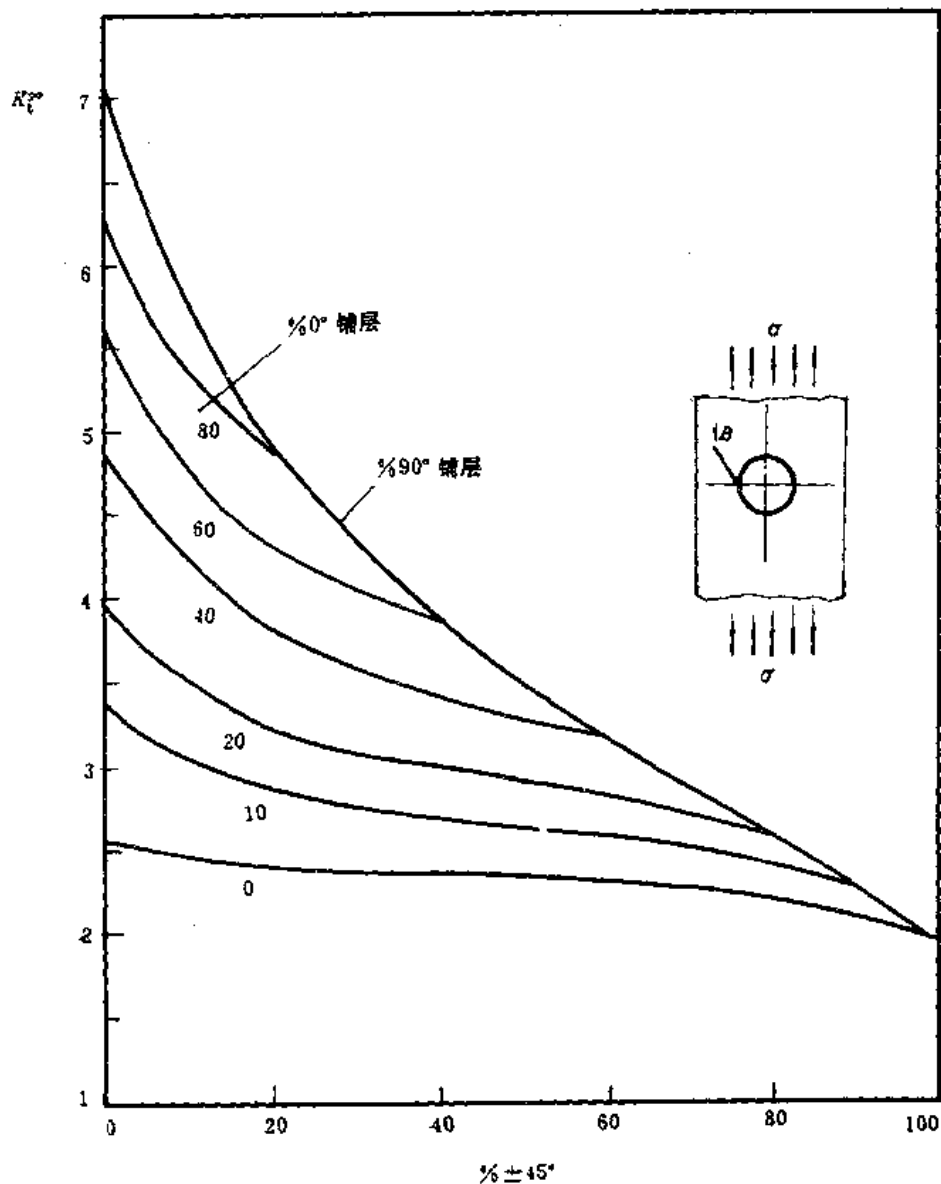


图 C.2 无限大正交各向异性板圆孔的应力集中系数

C.2 开孔板强度预示

经验表明,预示开孔板强度,如果用光滑层压板强度值除以应力集中系数 K_t 来得到,其值将过于保守,而采用点应力准则和平均应力准则具有足够的工程精度,且简单、方便。准则只含有两个参数,一个参数是光滑层压板强度,可由实验得到,也可由层压板理论计算得到;另一个参数是点应力准则的特征尺寸 d_0 或平均应力准则的特征尺寸 a_0 。表 C.1 和 C.2 给出了碳纤维复合材料 T300/4211、T300/5222 和 T300/QY8911 等多种层压板的特征尺寸 d_0 和 a_0 值。

C.2.1 点应力准则

对于含半径为 R 的圆孔在无限远处受与 x 轴平行的均匀应力 σ 的无限大各向异性板,点应力破坏准则假定,当离开孔边某一距离 d_0 处的应力达到或超过光滑层压板强度 σ_{ult} 时,层压板发生破坏(图 C.3),即:

$$\sigma_x(0, y) \Big|_{y=R+d_0} = \sigma_{ult} \quad (C.14)$$

式中 $\sigma_x(0, y)$ —— $x=0$ 截面上的法向应力分布;

R —— 孔半径(mm);

d_0 —— 特征尺度(mm);

$$\sigma_{ult} = \begin{cases} \sigma_b(\text{MPa}) & \text{当受拉伸载荷时;} \\ \sigma_c(\text{MPa}) & \text{当受压缩载荷时。} \end{cases}$$

将式(C.2)代入上式,可以得到含圆孔无限大板的破坏强度 σ_R^∞ :

$$\sigma_R^\infty = \frac{2\sigma_{ult}}{(2+\xi_1^2+3\xi_1^4-(K_t^\infty-3)(5\xi_1^6-7\xi_1^8))} \quad (C.15)$$

$$\text{式中 } \xi_1 = R/(R+d_0) \quad (C.16)$$

K_t^∞ 见式(C.3)。

应当指出,方程(C.15)只能用在缺口强度比 $\sigma_R/\sigma_{ult} \geq 1/K_t^\infty$ 的情况,否则 d_0 值就会成为负值,这是没有物理意义的。

C.2.2 平均应力准则

平均应力破坏准则假定,离开孔边某一距离 a_0 之内的平均应力达到或超过光滑层压板强度 σ_{ult} 时,层压板发生破坏(图 C.4)即:

$$\frac{1}{a_0} \int_{R_x}^{R+a_0} \sigma_x(0, y) dy = \sigma_{ult} \quad (C.17)$$

将式(C.2)代入上式可得含圆孔无限大板的破坏强度 σ_R^∞ :

$$\sigma_R^\infty = \frac{2(1-\xi_2)\sigma_{ult}}{2-\xi_2^2-\xi_2^4+(K_t^\infty-3)(\xi_2^6-\xi_2^8)} \quad (C.18)$$

$$\text{式中 } \xi_2 = R/(R+a_0); \quad (C.19)$$

K_t^∞ 见式(C.3)。

含圆孔有限宽板的临界破坏强度 σ_R 与含圆孔无限大板的 σ_R^∞ 有如下关系:

$$\sigma_R = \sigma_R^\infty / \eta \quad (C.20)$$

式中 η —— 应力集中的板宽修正系数,由式(C.11)得到。

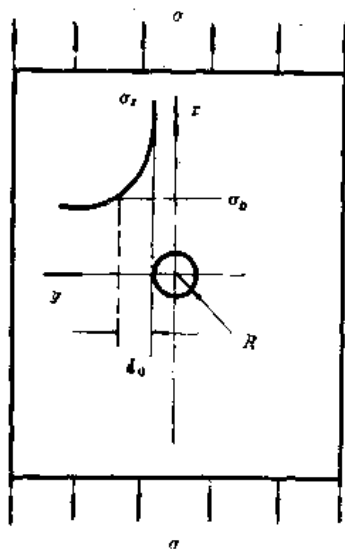


图 C.3 点应力准则示意图

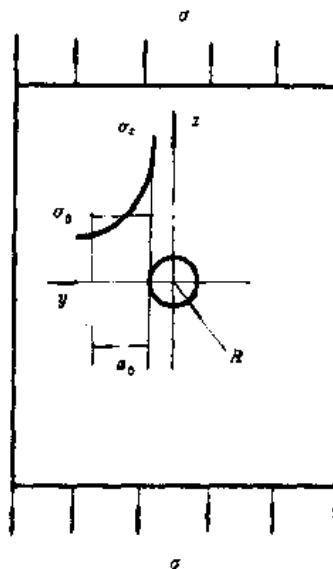


图 C.4 平均应力准则示意图

C.2.3 特征尺寸 d_0 和 a_0

特征尺寸是材料的函数。对于特定的材料体系,从理论上说,只用两组试件就可以确定特征尺寸 d_0 和 a_0 值,即由光滑试件得到 σ_b (或 σ_c) 和含圆孔试件得到缺口强度 σ_g 。然后用应力集中板宽修正系数式(C.11)将 σ_g 化为 σ_g^∞ ,于是从式(C.15)和(C.18)就可以计算出 d_0 和 a_0 。实际上,特征尺寸与纤维的铺叠方式有关,孔尺寸大小对其也有影响。宜选择有代表性的层压板得到各自的特征尺寸。

表 C.1 给出了碳纤维 T300/QY8911、T300/4211 和 T300/5222 复合材料的拉伸特征尺寸 d_0 和 a_0 值。表 C.2 给出了 T300/5222 复合材料的压缩特征尺寸。计算中所用的光滑层压板强度 σ_b (或 σ_c) 均由单向板力学性质按层压板理论采用蔡-希尔失效准则计算得到。

应当指出,对于某种材料体系来说,特征尺寸并不是一个常数,它与纤维的铺叠方式有密切关系。但是在连接区要求的铺层范围内(0° 层 $\geq 25\%$, $\pm 45^\circ$ 层 $\geq 40\%$, 90° 层 $\geq 10 \sim 25\%$),特征尺寸可近似认为是常数。对于碳纤维 T300/QY8911 复合材料,实际应用中可取 A4、A5、A6 和 A10 层压板的平均值,即 $d_0 = 0.905 \text{ mm}$, $a_0 = 2.533 \text{ mm}$ 。

还应指出。如果用较小孔径得到的 d_0 或 a_0 值去预示较大孔径试件的破坏强度将偏于危险。建议先预示相同孔径试件的破坏强度,然后除以图 C.5 给出的孔径修正系数来得到较大孔径情况的破坏强度。

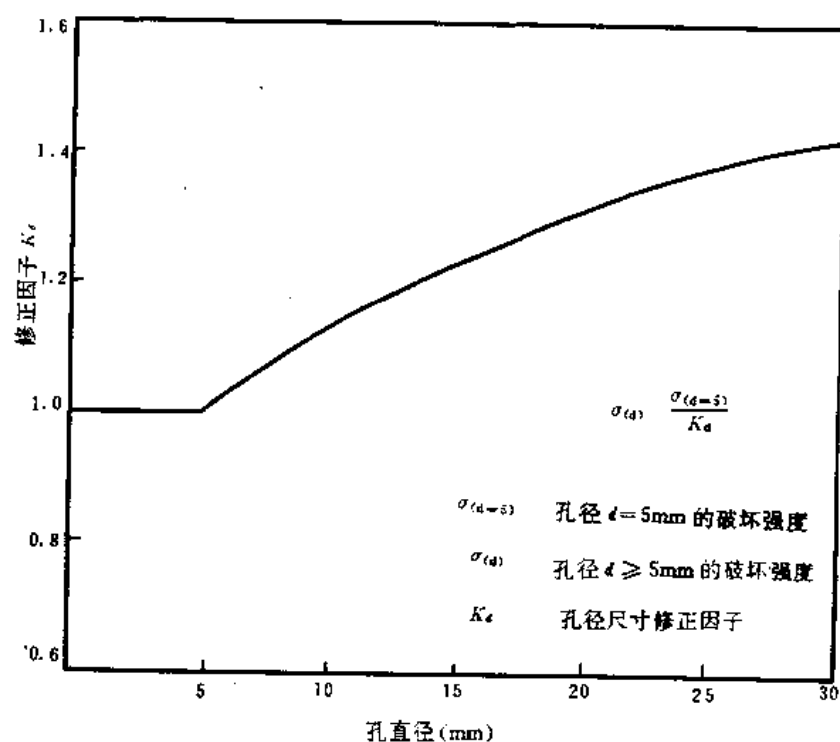


图 C.5 孔径修正因子

经验表明，一般来说，平均应力准则稍优于点应力准则。

表 C.1 国内碳纤维复合材料的拉伸特征尺寸

层压板 代号	W (mm)	D (mm)	σ_k (MPa)	η	σ_k^* (MPa)	d_0 (mm)	a (mm)
A2	30	5	848	1.032	876	1.60	7.31
A3	30	5	706	1.032	729	1.64	6.55
A4	30	5	475	1.032	491	0.787	2.33
A5	30	5	406	1.032	419	0.903	2.58
A6	30	5	339	1.032	350	0.940	2.53
A7	30	5	274	1.032	283		3.11
A8	30	5	144	1.032	149		14.16
A9	30	5	384	1.032	397	0.672	2.50
A10	30	5	303	1.032	313	0.988	2.69
B2	30	5	578	1.032	597	0.713	2.47
B4	30	5	398	1.032	411	0.650	1.83
B6	30	5	303	1.032	313		3.09
C2	30	8	679	1.088	739	1.661	6.37
C4	30	8	392	1.088	427	0.97	2.66
C6	30	8	296	1.088	322	1.58	4.32

表 C.2 T300/5222 复合材料的压缩特征尺寸

层压板 代号	W (mm)	D (mm)	σ_c (MPa)	η	σ_c^∞ (MPa)	d_0 (mm)	a_0 (mm)
C2	30	5	643	1.033	664	1.17	4.84
C4			541		559	1.94	7.74
C6			362		374	1.96	7.03

C.2.4 破坏准则应用实例

求:碳纤维 T300/QY8911 复合材料($0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$)=[40/50/10],板宽 $W=60$ mm,孔径 $d=10$ mm 的圆孔试件拉伸破坏应力。

解:用平均应力准则的解题步骤如下:

(a) 由单向板力学性质(附录 A)按层压板理论计算工程弹性常数, $E_x=67.84$ GPa, $E_y=33.96$ GPa, $G_{xy}=19.62$ GPa, $\nu_{xy}=0.472$ 。由式(C.3)或图 C.2 得 $K_x^\infty=3.311$ 。

(b) 采用蔡-希尔失效准则计算层压板拉伸破坏强度, $\sigma_b=703$ MPa。

(c) 特征尺寸 a_0 取连接铺层范围内的平均值,即 $a_0=2.533$ mm。该值是由孔径 5 mm 的试件得到的。

(d) 计算无限大板圆孔($d=5$ mm)情况的临界破坏应力。

由(C.19)得 $\xi_2=2.5/(2.5+2.53)=0.497$

由式(C.18)得 $\sigma_k^\infty=417$ MPa

(e) 化为有限宽板情况

由式(C.11)得板宽修正系数 $\eta=1.047$

由式(C.20)得破坏强度 $\sigma_k=\sigma_k^\infty/\eta=417/1.047=398$ MPa

由表 C.1 可知,实测值 $\sigma=406$ MPa,符合得很好。

(f) 化为孔径 $D=10$ mm 的情况。由图 C.5 得 $d=10$ mm 的孔径尺寸修正系数 $K=1.12$ 。故孔径 $D=10$ mm 的试件破坏强度为 $398/1.12=355$ MPa。

参 考 文 献

- [C-1] Слян, Г. Н., 卢鼎霍译. 孔附近的应力集中. 北京: 科学出版社, 1958.
- [C-2] 谢鸣九等. 碳纤维环氧复合材料层板的应力集中系数研究. 航空学报, 1988, 9(16), 233~239.
- [C-3] Nuismer R J, Whitney J M. Uniaxial Failure Composite Laminates Containing Stress Concentrations. In: ASTM STP 593, 1975, 117~142.
- [C-4] Whitney J M, Kim R Y. Effect of Stacking Sequence on the Notched Strength of Laminated Composites. In: ASTM STP 617, 1977, 229~242.
- [C-5] Garbo C P., Ogonowsik J M. Effect of Variances and Manufacturing Toierances on the Design Strength and Life of Mechanically Fastened Composite Joints, AD A101657, 1981.
- [C-6] Peterson R E. Stress Concentration Factors wiley 1974.
- [C-7] 谢鸣九等. 复合材料应力集中宽度修正系数, 飞机强度研究所, Q/125-8601-09
- [C-8] 谢鸣九等. 复合材料层压板的特征尺寸研究. 飞机强度研究所, Q/125-9001-11
- [C-9] 谢鸣九等. T300/QY8911 复合材料开孔拉伸强度研究. 飞机强度研究所, Q/125-9201-06
- [C-10] 谢鸣九等. 复合材料开孔拉伸强度许用值研究. 飞机强度研究所, Q/125-9201-16