

复合材料结构连接件 设计与强度

薛克兴 周 瑾 编著



航空工业出版社

复合材料结构连接件 设计与强度

薛克兴 周瑾 编著

航空工业出版社

1988

内 容 简 介

本书对复合材料结构连接设计中遇到的各种连接型式和连接方法,包括胶接、螺接或铆接,胶-螺(铆)连接以及夹层结构连接的分析方法和设计方法作了全面介绍。书中给出了连接的设计参数选择和应力、变形计算公式以及破坏形式。简述了接头的疲劳特性和剩余强度特性。可供设计、研究单位和工厂从事复合材料工作的广大工程技术人员参考。对各向同性材料(金属)和木材、塑料等结构设计同样有重要参考价值。

复合材料结构连接件设计与强度

薛克兴 周 瑾 编著

航空工业出版社出版

(北京安定门外北苑大院2号)

新华书店总店科技发行所发行

北京通县向阳印刷厂印刷

1988年12月第1版 1988年12月第1次印刷

850×1168毫米1/32 印张: 12.125

印数: 1—3500 字数: 316千字

ISBN 7-80046-089-4/Z·026

定价: 3.50元

前 言

复合材料的许多优良特性，引起广大科技工作者的兴趣，十几年来在这方面开展了大规模的研究和开发工作并取得明显的成绩。目前在航空、航天、造船、原子能、建筑、汽车和化工等工业部门已得到了日益广泛的应用，而且取得了巨大的效益。随着时间的推移，复合材料发展的广阔前景和在国民经济中的重要性将会被越来越多的人所认识。

在复合材料应用中，结构连接设计是结构设计的重要组成部分。成功的连接设计是提高强度、减轻重量、以及充分发挥复合材料各种优良特性的重要条件之一。

本书是在总结国内外近年来对复合材料结构连接分析研究和设计实践的基础上编写的。在内容的选取上，着眼于工程应用。对于连接分析中涉及的许多分支理论，一般只引用其有用结果，不作系统阐述。书中编入的计算公式和结构连接型式，绝大多数已经过实际使用的考验，或者有试验数据的支持。

全书共九章，可以分为四部分：

第一部分包括第一、二、三、四章，为胶接连接部分。前三章对典型胶接连接接头的内力、变形分析方法作了较详细介绍。第四章叙述了胶接接头的设计。

第二部分包括第五、六、七等三章，为机械连接部分。这三章分别给出了机械连接元件的内力、变形分析方法、接头的破坏分析方法以及机械连接的设计方法等。

第三部分是第八章。运用前两部分的结果，讨论了夹层结构连接的设计问题，并分析了胶-螺(铆)连接的主要特性。

第四部分是第九章，简述了复合材料接头的疲劳特性和剩余

强度特性。

在本书的一些章节中简述了某些主要公式的推导，这是为了给设计应用者提供编制计算机程序所必要的条件，同时可以加深对设计计算公式的理解，以便灵活运用；也便于对计算结果进行分析和校核。

作者希望本书能帮助复合材料结构设计工作者较深入地了解复合材料的连接特性，灵活运用各种连接型式和连接方法，设计出满足各种使用要求的复合材料产品结构。

通过本书可以看出，尽管国内外已经公布了大量有关复合材料连接的试验和分析方面的文献，进行了卓有成效的工作，但是在理论分析，试验数据的完整、系统，连接结构的设计和工艺成型方法等方面仍有许多工作需要深入探讨和研究。作者希望我国科技工作者能在这个领域内取得重要进展。

承蒙南京航空学院李顺林副教授对本书作了认真审阅，提出了许多宝贵改进意见；此外，航空工业出版社的王崇明、丛选超、金允汶等同志为本书付出了大量劳动，航空部科技局王慧杰等同志给了很大支持，对此，作者表示衷心感谢。

限于作者水平，本书一定存在不少缺点和错误，恳请读者提出批评指正。

作者 1987.7.2

目 录

主要符号表	(1)
绪论	(4)
第一章 双面搭接胶接接头	(7)
§1.1 搭接板弹性内力分析	(9)
§1.2 考虑温度和搭接板刚度影响的胶层剪切弹性 分析.....	(11)
§1.3 接头一端的胶层进入塑性时接头内力分析	(15)
§1.4 接头两端胶层均进入塑性时接头的内力分析...	(18)
§1.5 胶层剪切应力-应变曲线为双线性的接头内力 分析.....	(25)
§1.6 胶层全部进入塑性时接头的内力分析	(30)
§1.7 搭接板之间热应变不匹配对接头强度的影响 ...	(31)
§1.8 搭接板刚度不均衡对接头强度的影响	(34)
§1.9 双面搭接胶接接头的剥离应力	(38)
§1.10 搭接板首先发生破坏的情况.....	(43)
§1.11 接头承受压剪载荷的情况.....	(43)
§1.12 接头承受面内(边缘)剪切载荷的情况.....	(44)
§1.13 接头设计参数对连接强度的影响.....	(48)
§1.14 减小剥离应力的设计计算.....	(52)
第二章 单面搭接胶接接头	(56)
§2.1 单面搭接胶接接头的弹性内力分析	(57)
§2.1.1 不考虑载荷偏心影响的弹性内力	(57)
§2.1.2 计入载荷偏心影响的弹性内力	(61)

§2.2	均衡单面搭接接头考虑胶层塑性的胶层剪应力分布	(69)
§2.3	均衡单面搭接接头的剥离应力	(80)
§2.4	搭接板刚度不均衡对接头两端搭接板破坏的影响	(84)
§2.5	刚度不均衡对接头端部剥离(层间拉伸)破坏的影响	(95)
§2.6	单面搭接胶接接头效率	(101)
第三章	阶梯形和楔形搭接胶接接头	(107)
§3.1	阶梯形搭接胶接接头的弹性分析	(107)
§3.2	阶梯形搭接胶接接头的弹-塑性分析	(111)
§3.3	考虑一般情况的阶梯形胶接接头的分析	(114)
§3.4	楔形搭接胶接接头的弹性分析	(124)
§3.5	楔形搭接胶接接头的弹-塑性分析	(132)
第四章	胶接连接设计	(145)
§4.1	胶接连接设计需考虑的主要因素	(145)
§4.2	几种典型胶接连接的设计	(153)
§4.2.1	双面搭接胶接连接的设计	(158)
§4.2.2	单面搭接胶接连接的设计	(162)
§4.2.3	胶接阶梯形和楔形接头的设计	(164)
§4.3	胶接盖板或垫板	(168)
§4.3.1	连接板应力	(170)
§4.3.2	胶层剪应力	(177)
§4.4	结构元件的局部增强	(183)
§4.4.1	均匀厚度的薄板条增强	(184)
§4.4.2	具有楔形端部的增强板条	(188)
§4.5	在复合材料螺接孔周围胶接金属加强件	(194)
§4.6	多闭室扭力盒中胶接连接的面内剪切载荷传递	(199)

第五章	机械连接件的内力和变形分析	(208)
§5.1	简单接头传递载荷的计算	(210)
§5.1.1	弹性基本公式	(210)
§5.1.2	弹-塑性紧固件载荷计算	(218)
§5.1.3	多紧固件连接的紧固件组合	(221)
§5.1.4	紧固件连接接头中紧固件柔度系数的近似计算	(225)
§5.2	一般机械紧固件连接接头的应力和变形分析	(229)
§5.2.1	解析法	(229)
§5.2.2	有限元素法	(245)
第六章	机械连接的破坏分析	(260)
§6.1	紧固件破坏计算	(260)
§6.2	连接板破坏分析	(263)
§6.2.1	普通方法	(265)
§6.2.2	带有开孔板的孔边应力和破坏预计	(266)
§6.2.3	加载孔孔边应力	(275)
§6.2.4	螺接接头破坏分析的应力集中系数法	(281)
§6.2.5	有加载孔层合板的挤压强度	(283)
§6.2.6	有加载孔板的断裂力学破坏分析法	(285)
第七章	机械连接接头设计	(308)
§7.1	设计的一般原则	(308)
§7.2	紧固件的选择与设计	(309)
§7.3	连接板设计	(312)
§7.4	紧固件孔周围侧向限制, 即紧固件拧紧力矩的确定	(316)
§7.5	紧固件间距、端距和边距的确定	(320)
§7.6	复合材料接头的设计许用应力和安全系数的选取	(324)
第八章	复合材料夹层结构的连接设计和胶-螺(铆)连	

接	(329)
§8.1 复合材料夹层结构的连接设计	(329)
§8.1.1 夹层板的边缘处理和局部增强	(331)
§8.1.2 平直接头	(333)
§8.1.3 角接头	(336)
§8.2 胶-螺连接.....	(341)
§8.2.1 胶-螺连接用于接头维修.....	(346)
§8.2.2 胶-螺连接的破损—安全特性.....	(348)
第九章 复合材料结构连接的疲劳特性	(351)
§9.1 纤维增强树脂性复合材料的疲劳特性	(351)
§9.2 机械连接接头的疲劳特性	(356)
§9.3 胶接接头的疲劳特性	(373)
主要参考文献	(378)

主要符号表

符号	意义
$A, B, C, F, H, J,$ A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}	积分常数 分别为层合板面内刚度系数、耦合刚度系数和弯曲刚度系数
C	紧固件柔度系数
a, b, c	胶接接头端部胶层剪切塑性区长度
CTM	无量纲搭接热不匹配系数
D	连接板的弯曲刚度系数
d	胶接接头胶层剪切弹性区长度, 紧固件直径, 钉孔直径
E	连接板等效纵向拉压弹性模量
E_0, E_0'	胶层剥离模量, 层合板横向拉伸模量
ETR	搭接板拉压刚度比
e	载荷偏心距, 接头紧固件端距
f	安全系数, 柔度系数
G	剪切模量
I	轴惯性矩
J_0	接头效率
K, k	弹簧常数, 系数, 层合板层数
L	长度
l	搭接长度
M	弯矩
m	铺层方向角余弦函数
N	层合板铺层总层数, 内力, 加载循环数

n	铺层方向角正弦函数
P	载荷
p	钉距, 单位长度上的作用力
Q_{1j}	单向层合板的模量分量
Q	剪切载荷
q	分布力
R	圆孔半径, 应力比, 紧固件横向剪切载荷
S	剪流, 面内剪切强度
s	接头紧固件边距
T	温度, 连接板内力
t	连接板厚度
u, v, w	沿 x, y, z 轴方向的位移
V	横向剪力
w	重量, 板宽
X	纵向强度
Y	横向强度
α	热膨胀系数
β	系数, 转角
γ	剪应变
δ	纵向位移
ε	线应变
η	胶层厚度
θ	倾角
λ	胶层剪应力分布指数
ν	泊松比
σ	正应力
σ_{av}	平均正应力
σ_b	拉伸强度

τ	剪应力
φ	夹角
下标:	
b	挤压, 极限
c	剥离, 压缩
e	等效, 弹性
i	内搭接板
o	外搭接板
j	接头
p	塑性
t	拉伸
s	剪切

绪 论

复合材料结构连接，包括复合材料元件之间和复合材料元件与金属元件之间的连接，在复合材料结构设计中占有重要地位。大量事实表明，设计合理的连接设计，不但能够满足使用要求、减轻结构重量，而且可以延长结构的使用寿命。否则，可能首先在结构连接处产生破坏，甚至造成重大事故。

由碳和硼等高模量和高强度纤维增强的复合材料与一般金属材料的重要区别，除了强度和刚度的各向异性以及层间强度较低外，复合材料的延性较小，在连接部位的应力或应变集中区的载荷重新分配能力较弱。因此连接区的内力和变形分析就变得更重要。

连接接头应力和变形分析的一般步骤是：

1. 对结构部件进行内力——变形分析，确定接头的外载荷；
2. 确定各连接件的载荷和变形；
3. 校核接头强度和变形是否满足使用要求；
4. 给出接头的破坏载荷、破坏型式和安全裕度。

复合材料结构元件的连接方法主要分为两大类：即胶接连接和机械连接。在接头应力和变形分析中，这两类接头都可以采用有限元素法。实践表明，采用合适的解析公式，运用计算机编程计算，可以大大缩短计算时间、减少计算费用，并能得到满足工程要求的精度，因此在设计分析时应尽可能采用解析解。

在连接设计中，采用胶接或者机械连接，要根据具体使用技术条件确定。一般来说，对于受力不大的薄壁结构，尤其对纤维增强树脂性复合材料元件，应尽量采用胶接连接。近年来，通过

改进接头的设计型式、提高工艺水平、改善胶粘剂性能，在某些受力较大的结构上也开始采用胶接连接，并取得了成功。对于连接元件较厚、受力大的结构，多采用螺接或铆接，在某些情况，为了提高结构的破损-安全特性而采用胶-螺连接。

胶接连接的主要优点是：

1. 不会因钻孔引起应力集中和纤维切断，不减少承载横剖面面积；
2. 与型式相同的机械连接件比较，在受力较小的次要结构上，胶接件能够减重约25%；在受力大的主要结构上，胶接件能够减重约5~10%；
3. 能够获得平滑的结构表面。连接元件上的裂纹不易扩展。密封性较好；
4. 大面积胶接成本低；
5. 可用于不同类材料之间的连接，无电化腐蚀问题；
6. 加载后的永久变形小。

胶接连接的缺点是：

1. 连接元件表面需要仔细清理；
2. 强度分散性大。由于温度、湿度等环境因素的影响，胶接强度会逐渐减低；
3. 对胶接质量的无损探伤比较困难；
4. 在大多数情况下是不可拆卸的。

机械连接的优点是：

1. 高温、蠕变强度大；
2. 连接强度的分散性较小；
3. 抗剥离能力大；
4. 易于拆卸、组合、检查。

机械连接的缺点是：

1. 开孔会产生应力集中，可能导致接头提前破坏；
2. 接头重量较大，总的接头效率低。

在连接设计中，用接头效率 J_e 作为衡量接头设计成功与否的重要指标。一般用连接后的接头能够承受的最大载荷与无接头的完整结构能够承受的最大载荷之比定义为接头效率^[1]，即

$$J_e = \frac{P_J}{P_o} \quad (1)$$

式中

P_J ——接头能够承受的最大载荷；

P_o ——无接头的完整结构能够承受的最大载荷。

对于结构重量有控制要求的连接设计，则采用下式表示接头效率 J_e ^[2]

$$J_e = J_p \times J_w \quad (2)$$

而

$$J_p = \frac{P_J}{P_o}, \quad J_w = \frac{w_o}{w_j} \quad (3)$$

式中 J_p ——接头承载效率；

J_w ——接头重量效率；

w_j ——接头重量；

w_o ——无接头完整结构的重量。

J_e 越接近 1，接头设计越好。即表示结构因连接造成的结构承载能力损失和重量增加最少。

在金属元件连接中，有时将接头效率表达为

$$J_e = \frac{(w - nd)}{w} \quad (4)$$

式中 w ——连接元件宽度；

n ——沿元件宽度方向的紧固件数；

d ——紧固件孔直径。

显然，(4)式是元件因有连接孔削弱后能够承受的最大载荷和无孔元件承受的最大载荷之比转化来的。这个公式只能适用于简单拉剪的机械连接情况。

第一章 双面搭接胶接接头^{[3], [7], [9]}

双面搭接胶接接头是由三个连接元件，通过两个胶接面粘接而成的接头，如图 1.1 所示。中间连接元件称为内搭接板，用下标 i 表示其几何和物理量，两侧连接元件称为外搭接板，用下标 o 表示其几何和物理量。

双面搭接胶接接头有三个重要特性：

(1) 对于给定的搭接板和胶粘剂，接头的胶接强度存在一个极限值。随着搭接长度的增加，接头的承载能力达到这个极限值后，进一步增加搭接长度，不会再增加承载能力；

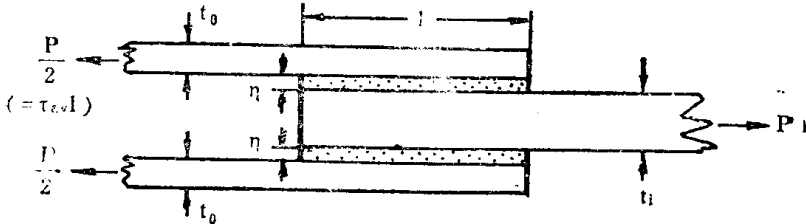
(2) 决定胶层剪切强度的唯一参数是每单位粘接面积的胶层剪切应变能。胶层的剪切应力——应变曲线形状仅仅影响胶层的剪应力分布，不会影响接头胶层的承剪强度；

(3) 复合材料搭接板厚度较大时，连接处容易产生剥离破坏。存在一个搭接板的厚度界限，超过某一厚度，就应采用阶梯形或变厚度接头代替双面搭接接头。

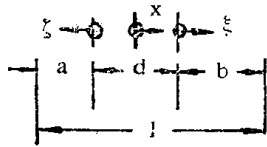
由等厚度搭接板组成的粘接接头，在接头两端存在严重的应力(或应变)集中。大部分载荷是由接头两端区域传递的，接头中间区域传递的载荷很少。

本章给出双面搭接胶接接头的内力(或应力)分布计算公式，其中，搭接板的应力和应变均处于弹性范围，而胶层特性包含弹性和塑性情况。在接头粘接长度上的胶层可能出现：(1) 完全弹性；(2) 在接头一端或两端的胶层进入塑性范围；(3) 沿整个粘接长度的胶层全部进入塑性范围。另外，还给出各搭接板刚度和热膨胀系数同时对胶层剪切强度的影响的有关公式。最后给出

接头效率图线，供设计参考。

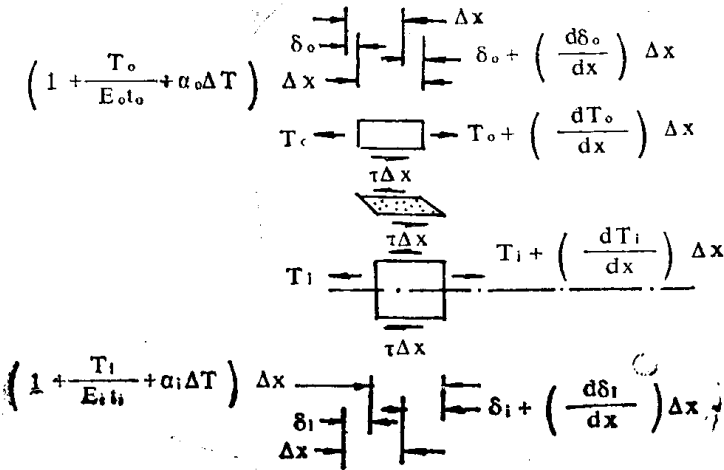


(a) 几何形状



a, b: 胶层剪切塑性区
d: 胶层剪切弹性区

(b) 胶层特性



(c) 位移和力

图 1.1 双面搭接胶接接头的几何尺寸和变形