

# 复合材料连接手册

中国航空研究院 编

航空工业出版社

V261.3-62

33257803

01

# 复合材料连接手册

中国航空研究院 编

HK09/05



航空工业出版社



C0402274

(京)新登字 161 号

## 内 容 简 介

复合材料连接是复合材料结构设计的关键环节。本手册全面系统地总结了航空系统多年来关于复合材料连接研究的丰硕成果,内容涉及理论研究、试验验证和设计经验。本手册介绍了胶接、机械连接、混合连接及特殊连接的设计原理、计算方法及实例,连接工艺和国内外常用紧固件。为方便应用附录中给出了国内外常用复合材料单向板的力学性能、复合材料力学基础和开孔板的应力集中和强度。

本手册技术先进可靠、工程应用方便。主要供从事复合材料飞机结构设计、强度校核及工艺人员使用。对于航天、机械、建筑、材料等方面的研究和设计人员及高等院校的师生也很有借鉴和参考作用。

## 图书在版编目(CIP)数据

复合材料连接手册/中国航空研究院编. —北京:航空工业出版社,  
1994.11 ISBN 7-80046-866-6

I. 复… I. 中… III. 航空器复合材料-热加工-手册 IV. V261.3-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 11481 号

责任编辑 程志远

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

航空工业出版社印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

1994 年 10 月第 1 版

1994 年 10 月第 1 次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:18

字数:461 千字

印数:1-900

定价:19.00 元

## 绪 言

先进复合材料因其高比强度、高比刚度、良好的抗疲劳性和材料铺层的可设计性等优异特性,而在航空航天飞行器的结构中得到日益广泛地应用。国内外的实践表明:将其用于飞机结构上,可获得减轻重量20~30%的显著效果,已成为改善产品性能的关键性材料。

在结构设计中,为提高结构效率,结构的整体性始终是主要的手段之一。相对金属结构而言,复合材料虽然具有提高结构整体性的优越条件,但是由于设计、工艺和使用维护等方面的需要或限制,还是必须安排一定的设计和工艺分离面、维护口盖和多种外挂接口等。这些部位的载荷传递必须有相应的连接方式来解决,所以连接设计在复合材料结构中是必不可少的关键环节。复合材料连接可分为胶接、机械连接和混合连接等类型。其中机械连接主要指螺栓连接和铆接,适合于传递较高载荷或强调可靠性的部位,是最常用的一种连接形式。

复合材料结构部位的设计和强度分析具有与金属材料结构连接部位不完全相同的内容和特点,有些方面与金属材料结构有着本质的差别,而且影响复合材料连接强度的因素要复杂得多。例如,复合材料结构连接部位的钉孔切断了纤维,导致孔边应力分布较复杂,加之复合材料本身属脆性材料,孔边的应力集中较严重,使得多排钉孔传力时的钉孔载荷分配更不均匀;连接强度与铺叠方式、载荷方向和环境影响等多种因素密切相关;连接的失效模式多而且预测强度较困难等等。这些特点决定了复合材料连接强度问题变得更复杂,解决其静强度和疲劳强度更为困难,必须予以足够的重视。同时这些特点也表明复合材料的连接强度问题具有较强的可设计性,因而进行该领域的深入研究,具有重要的意义,这本手册就是本着上述要求和精神来编写的。

为满足军机、民机复合材料结构设计的需要,组织了在复合材料结构连接设计和强度研究方面有着丰富实践经验的工程技术人员和造诣颇深的教授、专家,在认真总结航空系统该领域十多年来研究成果的基础上,收集了以国产复合材料为主的大量试验数据和研究资料,并适当

纳入国外有代表性的重要研究成果,编写了这本专业工具书。手册编写遵循工程应用方便、技术先进可靠、分析科学严谨和内容系统完整的原则,力求反映出国内外复合材料连接技术发展的最新水平。期望这本手册的出版能对从事这一领域工作的工程技术人员有所帮助和借鉴,从而创造性地设计出重量更轻、可靠性更高的复合材料结构。

本手册共编写了十一章,分别介绍了复合材料各种连接设计和强度分析的基本原理和方法,提供了大量的试验数据、图表和曲线。第一章是名词术语和符号,第二章介绍胶接连接的设计和强度计算,第三章至第七章介绍机械连接的设计和强度,第八章和第九章分别介绍混合连接和特殊连接,第十章和第十一章分别介绍连接工艺和紧固件。为方便应用还在附录中给出了国内外常用复合材料单向板的性能数据和复合材料力学基础知识,以及与机械连接密切相关的开孔应力集中系数和强度值。

本手册的编写得到航空系统 611、623、601、602、603、625、650 等飞机研究所及西北工业大学的大力支持,他们无偿提供了多年来积累的有关复合材料连接技术的宝贵经验和最新的研究成果,为充实手册的内容和提高手册的水平作出了贡献。

本手册是在中国航空研究院有关主管部门的直接领导下完成的,主管领导王公镛、王惠杰同志参加了编写会议,指导手册编写工作,对保证手册编写质量和及时出版起了重要作用。

复合材料结构的连接技术还在不断发展,许多研究工作还在不断深化,手册不可避免地存在内容和技术上的局限与不足,衷心地希望来自各方面的补充指正,以期改进。

# 编 审 委 员 会

主 编： 谢鸣九

副 主 编： 汪裕炳

常 务 编 委： 黄承恭      窦润龙      施丽中  
                 陈业标      王洪珠      蒋 昊

主 校： 李武铨

副 主 校： 迟之范      羊 矜      王全荣

主 审： 黎观生

副 主 审： 章怡宁      钟至人

## 各章编写、校核人员

绪言	编写	章怡宁	黎观生	
第一章	编写校核	谢鸣九		
第二章	编写校核	俞树奎		
第三章	编写校核	汪裕炳*	梁惠钧	
第四章	编写校核	黄承恭	廖品贵	
第五章	编写校核	施丽中*	廖品贵	
第六章	编写校核	窦润龙	王洪球	
第七章	编写校核	谢鸣九*	张开达	李志刚
第八章	编写校核	陈业标	张斌儒	宋恩鹏
第九章	编写校核	谢鸣九*	陈业标	
第十章	编写校核	周辰福	汪海	
第十一章	编写校核	王洪珠*	窦润龙	
附录 A	编写校核	蒋昊		
附录 B	编写校核	俞树奎*	张开达	
附录 C	编写校核	赵永枢	刘英蔚	
		谢鸣九*	王少妮	
		廖品贵		
		黄承恭*	赵永枢	
		周之鷗	杨斌	
		汪裕炳		
		王洪珠		
		汪裕炳*	施丽中	
		王洪珠		
		谢鸣九		
		汪裕炳		
		谢鸣九		
		张开达		
		谢鸣九		
		张开达		

注:带\*号者为章主编

# 目 录

<b>第一章 名词术语和符号</b> .....	(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)
<b>第二章 胶 接</b> .....	(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)
<b>第三章</b>	<b>机械连接设计</b>	<b>(56)</b>
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)
<b>第四章</b>	<b>机械连接静力分析</b>	<b>(74)</b>
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)
<b>第五章</b>	<b>螺栓连接强度</b>	<b>(111)</b>

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)
<b>第六章</b>	<b>铆 接</b> .....	(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)
<b>第七章</b>	<b>机械连接的疲劳</b> .....	(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)
<b>第八章</b>	<b>胶铆(螺)混合连接</b> .....	<b>(160)</b>
8.1	概述 .....	(160)
8.2	胶铆(螺)混合连接强度 .....	(161)
	参考文献 .....	(162)
<b>第九章</b>	<b>特殊连接</b> .....	<b>(163)</b>
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)
<b>第十章</b>	<b>连接工艺</b> .....	<b>(190)</b>
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	镗窝	(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)
<b>第十一章 紧固件</b>		(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)
<b>附录 A 复合材料性能数据</b>		(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)
<b>附录 B 复合材料力学基础</b>		(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)
<b>附录 C</b>	<b>开孔应力集中和强度 .....</b>	<b>(272)</b>
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、刚度和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 $\theta$ 的参考坐标轴。

**耦合**(Coupling)——一种外力引起与其不对应的变形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。

**最先一层失效**(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先一层失效。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  $\sigma_z, \tau_{zx}, \tau_{zy}$ 。

**层间剪切**(Interlaminar Shear)——指层间应力分量中的两个剪切分量,即  $\tau_{zx}, \tau_{zy}$ ,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  $0^\circ$  和  $90^\circ$  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