

陈祥宝 编著

复合材料 结构损伤修理



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心



复合材料结构损伤修理

陈祥宝 编著

化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

复合材料结构损伤修理/陈祥宝编著. —北京: 化学工业出版社, 2001.1

ISBN 7-5025-3084-3

I. 复… II. 陈… III. 玻璃钢-损伤(力学)-维修
IV. TQ327-1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 77203 号

复合材料结构损伤修理

陈祥宝 编著

责任编辑: 龚浏澄

责任校对: 李 丽 郑 捷

封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社 出版发行
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982511

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市昌平振南印刷厂印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 787 × 1092 毫米 1/32 印张 4½ 字数 96 千字

2001 年 1 月第 1 版 2001 年 1 月北京第 1 次印刷

印 数: 1—4000

ISBN 7-5025-3084-3/TQ·1328

定 价: 12.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

随着现代科学技术的进步，复合材料在航空、航天、体育、卫生、建筑、化工和交通运输等各个领域的应用日益广泛。复合材料的比强度和比模量高，性能可设计，制件可整体成型，因而发展迅速，采用复合材料可一次成型获得形状复杂、轻质、高性能的制件。由于复合材料制备和零件成型同时完成，材料制备过程中的缺陷不可避免地会带到制件中。复合材料层间性能较弱，对冲击损伤敏感，在使用过程中受到冲击、超载、挤压等和受环境条件影响，都可能产生损伤，从而影响复合材料制件的性能。因此，复合材料的发展和应用对其缺陷损伤修理提出了迫切需求。

复合材料的损伤形式与金属材料显著不同，不能简单地将传统的金属结构修理方法直接应用于复合材料结构的修理。采用不恰当的方法修理复合材料，往往得不到好的修理效果。本书系统介绍复合材料修理技术，主要包括复合材料损伤评估、修理材料、修理设备和工具、损伤修理设计和结构损伤修理等。本书编写过程中，北京航空材料研究院复合材料修理站陈萍同志提供了部分修理实例，在此表示感谢。

限于作者水平，不妥之处难免，恳请读者指正。

内 容 提 要

本书系统介绍树脂基复合材料修理技术，主要包括复合材料损伤特点和损伤评估，修理材料，修理设备和工具，结构损伤修理设计和结构损伤修理技术，最后专章介绍修理实例。本书兼具理论性和实用性。

本书对从事复合材料设计、研究、生产和应用维护的工程技术人员有很大的参考价值，也可作为高等院校有关专业师生的参考用书。

目 录

第一章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 复合材料结构损伤特性	3
1.3 复合材料结构损伤常用修理方法	4
1.4 复合材料结构损伤修理分类	6
参考文献	7
第二章 复合材料损伤评估	8
2.1 概述	8
2.2 常见缺陷和损伤	8
2.2.1 常见典型缺陷和损伤	8
2.2.2 许可损伤	8
2.2.3 需修理损伤	11
2.3 损伤检测	12
2.4 损伤评估	16
参考文献	17
第三章 修理材料和工具	19
3.1 概述	19
3.2 修理材料	19
3.2.1 胶粘剂	19
3.2.2 干态纤维织物	23
3.2.3 预浸料	25
3.2.4 蜂窝材料	28
3.2.5 辅助材料	29
3.3 修理设备和工具	30

3.3.1 修理设备	30
3.3.2 修理工具	33
参考文献	34
第四章 结构损伤修理设计	35
4.1 概述	35
4.2 损伤修理主要要求	35
4.3 损伤修理基本程序	38
4.4 胶接修理设计	42
4.4.1 胶接连接形式和特点	42
4.4.2 单面搭接连接设计	45
4.4.3 双面搭接连接设计	48
4.4.4 楔形搭接连接设计	50
4.4.5 阶梯形搭接连接设计	53
4.5 螺接和铆接修理设计	54
4.5.1 螺接连接设计	55
4.5.2 铆接连接设计	60
4.6 夹层结构连接设计	64
4.6.1 夹层板的边缘处理与局部增强	64
4.6.2 夹层结构的连接	65
参考文献	68
第五章 结构损伤修理	69
5.1 概述	69
5.2 常用修理方法	70
5.3 层合结构修理	73
5.4 蜂窝夹层结构修理	77
5.5 复合材料修理金属飞机结构	85
5.6 复合材料微波修理技术	87
参考文献	88
第六章 胶接表面处理	89
6.1 概述	89

6.2 胶接界面的润湿和粘结作用	91
6.3 胶接性能表征	99
6.4 表面处理方法	104
6.4.1 脱脂处理法	105
6.4.2 机械处理法	107
6.4.3 化学处理法	108
6.4.4 涂偶联剂（底胶）处理法	108
6.5 表面处理和胶接性能	109
6.5.1 表面处理和胶接强度	109
6.5.2 表面处理和胶接耐久性	111
参考文献	114
第七章 修理实例	116
7.1 复合材料方向舵损伤修理	116
7.2 TU-154 机头雷达罩修理	122
7.2.1 修理材料	123
7.2.2 修理过程	123
7.3 A-8B 飞机机翼蒙皮的外场螺接修理	124
7.4 A320 飞机机腹整流壁板修理	128
参考文献	131

第一章 绪 论

1.1 概述

复合材料是由基体和纤维增强材料构成的一类材料。目前发展最迅速、应用最广泛的复合材料是树脂基复合材料，它具有比强度和比刚度高、可设计性强、抗疲劳性能好、耐腐蚀性能好以及便于大面积整体成形和具有特殊的电磁性能等独特优点。和传统的钢、铝合金结构材料相比（表 1-1），树脂基复合材料的密度约为钢的 1/5，铝合金的 3/5，其比强度和比模量高于钢、铝合金和钛合金。这样在强度和刚度要求相同的情况下，用树脂基复合材料可以明显减轻结构质（重）量。

表 1-1 不同材料的比强度、比模量

材 料	纤维体积含量 /%	密度 /(g/cm ³)	比模量 /(MN/kg)	比强度 /(MN/kg)
芳纶/环氧	60	1.4	29	0.46
碳/环氧	58	1.54	54	0.25
低碳钢		7.8	27	<0.11
铝合金		2.7	27	0.15

树脂基复合材料的力学、物理性能除了由纤维、树脂的种类及含量决定外，还与纤维的排列方向、铺层次序和层数密切相关。可根据使用条件的不同，选取相应的材料及铺层设计来满足既定要求，做到安全可靠、经济合理。

树脂基复合材料对于即使结构形状复杂的大型制件也能实现一次成型，从而使部件中零件数目明显减少，避免了接头过多，显著降低了应力集中，减少了制造工序和加工量，大量节省原材料。树脂基复合材料以其独特的优点，在许多工业领域得到了大量应用。

树脂基复合材料的应用在汽车工业增长极快。从 20 世纪 50 年代采用模压技术首次成功制备 Citroen DS 19 车顶盖后，到 60 年代，Prosche Carrera GTS, DJET, M530 等车身都采用复合材料，复合材料汽车发动机风扇叶片也在 Citroen Ami 6 和 Renault Dauphine 上得到应用。随着 SMC、BMC 和 RTM 技术的发展，复合材料在汽车工业的应用发展到扰流片、保险杠、反射器、分配器盖、风扇座、车门、散热器护栅和轻型卡车弹簧片等。

在船舶工业，短切玻璃纤维增强聚酯复合材料是最常用的材料。粗纱织物和短切粗纱毡由于具有较高的性能得到越来越多的应用。一些二维和三维玻璃纤维缝编织物、芳纶织物、蜂窝芯材和乙烯基酯树脂也在高性能赛艇上得到应用。为了获得较高的生产效率，一些船舶生产厂已经开始发展快速生产技术，如 RTM 技术。在船舶工业使用 RTM 技术的难点在于可以承受注射压力的超大型模具的制造。

在航空航天领域，为了减轻结构质（重）量，提高飞行器性能和降低燃油消耗，树脂基复合材料也得到大量使用，已经迅速发展成为继铝、钢、钛之后的又一航空结构材料。复合材料在新一代军用战斗机、民用客机和直升机上的用量比例已分别达到机身结构质量的 24%、11% 和 54%，复合材料在飞机上的用量及其性能水平已成为飞机先进性的重要标志之一。图 1-1 所示为复合材料在新一代军用战斗机上的应用部位。

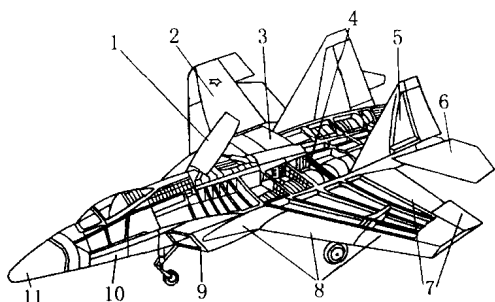


图 1-1 复合材料在新一代军用战斗机上的应用

- 1—复合材料机身减速板（含接头）；2—复合材料机翼（含整体油箱等）；
 3—复合材料中机身受力耐温蒙皮；4—复合材料发动机外涵道压气机匣；5—复合材料垂尾（含承力接头）；6—复合材料平尾（含平尾大轴）；7—复合材料襟翼副翼（有隐身要求）；
 8—翼面前缘和锥形受力蒙皮（隐身要求）；9—进气道受力蒙皮、唇口、隔栅壁板（隐身）；10—前机身和前设备舱段（减重和电磁兼容）；11—复合材料雷达罩（高电磁性能和隐身性能）

1.2 复合材料结构损伤特性

虽然复合材料用于飞机结构有许多优点，但是复合材料也存在固有缺点。首先，纤维增强树脂基复合材料属于脆性材料，在过载情况下，应力重新分配的能力差。甚至在较小的冲击载荷作用下，也可能造成内部分层损伤，这种损伤会降低结构的刚度和强度，其压缩强度的降低更加明显。在受冲击的复合材料零件表面，损伤不明显甚至完全看不见，但零件内部已产生分层损伤。

复合材料制备和零件成型同时完成，因而材料制备过程中的缺陷不可避免地带到了制件中，包括由于工艺过程控制不好、混入脱模剂、零件装配不协调等造成的空隙、分层、脱

粘等。

复合材料在使用过程中由于使用不当，如冲击、超载、挤压等，和受环境条件影响，如雨蚀、砂蚀、热冲击、雷击、溶剂等，也会形成分层、脱粘、表面氧化、腐蚀坑、边缘损伤、表面鼓泡等缺陷和损伤。

复合材料的损伤形式与金属材料显著不同，因此不能简单地将传统的金属结构修理方法直接应用于复合材料结构修理，必须根据其损伤特点，发展新的修理方法。特别要重视铺层设计和修理设计。采用不恰当的方法修理复合材料结构，往往得不到好的修复效果，甚至会出现修理后的结构比原损伤结构的强度更低的现象。

1.3 复合材料结构损伤常用修理方法

根据制件的结构、缺陷和损伤的类型与大小，复合材料制件的修理采用不同的方法。最常用的方法包括树脂注射、树脂灌注和填充、机械连接贴补、胶接贴补和挖补等。

(1) 树脂注射修理 树脂注射修理用于修补复合材料制件的小面积分层和脱胶，其修理效果取决于脱胶和分层形成的原因。如果脱胶或分层是由于成型时压力不足或胶接表面有包容物，采用树脂注射修理一般效果并不理想。如果脱胶和分层是由于机械损伤引起的，里面不存在包容物，树脂注射修理能获得满意的效果。

树脂注射修理工艺过程如下：

- ①采用准确的无损检测技术，确定脱胶或分层位置；
- ②在分层区按一定距离钻若干个树脂注射孔和泄出孔，其深度恰好到达分层或脱胶层面；
- ③向分层或脱胶区注入树脂，直至从泄出孔溢出树脂；

④施加一定压力，加温固化。

(2) 树脂灌注和填充修理 树脂灌注填充可用来修理复合材料制件的表面和边缘缺陷及损伤。灌注填充修理可稳定面板并密封损伤区。如果蜂窝芯受损，可将凹陷区面板和受损蜂窝芯去除，通常是将损伤区下挖，切成圆柱形，然后灌注短切玻璃纤维或玻璃微珠填料和树脂的混合物。树脂灌注和填充修理的优点是方便快捷，但不能承受高载荷。

(3) 机械连接贴补修理 机械连接贴补常用钛合金作倍板。与铝合金相比，钛合金热膨胀系数低，能与纤维增强材料较好地匹配，热应力和残余应力较低。机械连接贴补用的倍板，边缘做成楔形，以减小应力集中和对气流的扰动。

机械连接贴补修理具有操作简单、快捷的特点，适于吸湿太大而无法进行胶接修理制件的修理。

(4) 胶接贴补和挖补修理 胶接贴补修理用于下列制件：不太重要的构件、较薄层板、受背面通道限制或有子构件妨碍而不便采用其他方法修补又没有严格外形要求的制件。为减少剥离和剪切应力集中，应把贴补倍板边缘做成一定斜度或阶梯形，用压花剪修成锯齿状。

胶接挖补修理是复合材料制件修理的一种重要方法，用胶接挖补可修理以下制件：

- ①有严格外形表面的制件；
- ②有最大连接效率要求的制件；
- ③必须避免载荷集中及偏心的制件；
- ④采用贴补会引起厚度超出型线的厚壁制件。

胶接挖补可采用共固化或预固化补块二次胶接。如采用共固化胶接挖补，先将受损部分切除。将孔的边缘修成需要的斜面形式，如为全厚度挖补，则在制件一侧应固定一块模板，然

后在修补区域铺贴按斜面接头的预浸料铺层。为防止边界剥离，通常应使最外几层材料的覆盖区比整个区域大 20mm 左右。最后在一定温度和压力下胶接固化。如采用预固化复合材料层板补块进行修补，先将预固化补块和被修补制件加工出密切配合的斜面，在补块与修补制件间放一层胶膜，然后在补块上再用预浸料覆盖，最后一起固化。胶接挖补可用来修补蜂窝夹层结构，破损的蜂窝芯一般以新的蜂窝芯替换，面板的修补和层板的修补相同。

1.4 复合材料结构损伤修理分类

复合材料结构损伤修理的一般过程是：

①确定损伤部位；

②确定损伤范围；

③对损伤结构进行损伤容限和剩余强度分析，根据分析结果决定：不修理，继续使用；进行修理；损伤零件报废，更换新零件；

④对于需进行修理的零件，根据现场设备及人员技术等条件确定修理方法；

⑤完成修理；

⑥对修理后的零件进行评定。

对复合材料结构修理可分为以下几类。

(1) 暂时修理 所谓暂时修理就是在永久修理之前，对许可损伤或者带时间限制的许可损伤进行的修理工作或保护性措施，目的是防止外物进入损伤区或损伤的进一步扩展。暂时修理时，可用结构材料或非结构材料覆盖损伤区，在永久修理时，再除去这些覆盖材料。

(2) 非结构性的永久装饰修理 这种修理采用非结构性材

料对结构的许可损伤进行修理,以保护结构不再受外来物体的损伤,并隔绝潮气及污染。非结构性的永久装饰修理应在零部件使用寿命范围内都是有效的。

(3) 永久结构修理 对结构进行修理从而恢复其完整性的修理为永久结构修理。对于可修理损伤和带时间限制的许可损伤,应采用这种方法进行修理。应注意如果两种类型的损伤重叠,例如同时有刮痕及分层损伤,则应采用两种修理方案重叠修理。本书主要介绍复合材料结构损伤的永久修理,包括复合材料结构损伤类型及损伤评估、各种修理材料、结构损伤修理设计、不同修理方法以及修理过程中的质量控制等。

参 考 文 献

- 1 Timothy G. gutowski. Advanced Composites Manufacturing. New York,: Wiley, 1997
- 2 Daniel I. M. and Ishai O. Engineering Mechanics of Composite Materials. Oxford University Press, 1994
- 3 航空航天材料咨询研究组. 航空航天材料咨询报告. 北京: 国防工业出版社, 1999
- 4 Wegman R. F. and Tullos T. R. SAMPE Jourual. 1993, 29: 4~6
- 5 Wegman R. F. and Tullos T. R. Handbook of Adhesive Bonded Structural Repair. Noyes Publications. Park Ridge, 1992
- 6 Heslehurst R. B. SAMPE Jourual. 1997, 33: 5~6
- 7 薛克兴. 复合材料结构的损伤与修补. 北京: 航空工业出版社, 1992
- 8 Bar-Cohen Y. Engineered Matrerials Handbook. Adhesives and Sealants, ASM. 1990, 3: 777
- 9 陈绍杰. 高科技纤维与应用. 1999, 24 (5): 37
- 10 Davis M. J. Proc. Symp on Comp. Repair of Aircraft Structures. Vancouver, 1995, 4: 1~15

第二章 复合材料损伤评估

2.1 概述

复合材料缺陷损伤包括在使用过程中的损伤和在制造过程中形成的缺陷。在讨论复合材料结构修理时，首先必须了解其破损的程度，然后从安全性、经济性的角度考虑，确定复合材料结构的修理办法。因此损伤评估是复合材料修理的基础。

从复合材料结构的安全性考虑，习惯上复合材料的损伤被分为三大类：即许可损伤、需修理损伤和不可修理损伤。许可损伤是指在设计寿命之内不需进行修理的结构损伤和缺陷。不可修理损伤是指损伤已经超过可修理极限，在这种情况下，复合材料结构只能进行更换。虽然零部件更换本身也是一种结构修理的手段，但本书不将其作为一种修理方法列出。本节主要讨论复合材料许可损伤和可修理损伤的类型、形成原因以及有关检测方法和评估。

2.2 常见缺陷和损伤

2.2.1 常见典型缺陷和损伤

复合材料由于在制造中工艺控制不当，或在使用过程中受到重物冲击、环境条件等的影响，会造成缺陷和损伤。表 2-1 为复合材料在制造和使用过程中常见缺陷和损伤。

2.2.2 许可损伤

许可损伤是指不影响完整性或部件性能的小损伤。这种损

表 2-1 复合材料典型制造缺陷和损伤

缺陷类型		产生原因
典型制造缺陷	钻孔错误 孔隙 分层	钻孔模板有错误 固化工艺控制不当 混入脱模剂；固化工艺控制不当；机械加工形成
	表面损伤 脱胶	脱模不正确 零件装配不协调；混入脱模剂；固化工艺控制不当
典型使用损伤	刀痕划伤	操作不当
	腐蚀坑	雨蚀、砂蚀
	分层	冲击损伤
	圆孔变形	超载、挤压
	脱胶	冲击损伤；超载
	凹痕	冲击损伤
	边缘损伤 穿透损伤	使用不当 高速物体冲击损伤；严重操作失误
典型环境损伤	表面氧化	雷击；过热；枪弹冲击损伤
	夹层结构面板脱胶	表面处理不充分
	分层	热冲击；热应力
	表面鼓泡 蜂窝芯腐蚀	错误使用溶剂 蜂窝芯中有水分

伤在设计寿命之内不需要进行结构修理。许可损伤的具体尺寸在复合材料结构的验收拒收标准或有关手册中查出。注意这些尺寸指的是结构本身的尺寸，并不包括表面涂层的尺寸。

有的许可损伤是有时间限制的。这些损伤虽然是不影响结构完整及部件功能的小损伤，但在使用条件下，这些缺陷和损伤可能扩展，使结构的剩余强度下降，从而降低设计寿命。因此，在时间限制结束之前，必须进行永久修复。

有些损伤在许可损伤尺寸范围的边缘，这些损伤会轻微地影响部件的完整性及设计寿命。因此对这些损伤在按规定进行永久修复之前，要进行暂时修复。