

金属损伤结构复合材料 原位胶接修补指南

In-situ Composite Bonded Repair Guide of
Aircraft Metallic Structure with Damage

廖圣智 刘元海 李旭东 等著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

金属损伤结构复合材料 原位胶接修补指南

In - situ Composite Bonded Repair Guide of
Aircraft Metallic Structure with Damage

廖圣智 刘元海 李旭东 著
王浩伟 韦利军 张辰玉

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书从复合材料修补金属损伤结构的工程实用性出发,系统介绍了复合材料快速原位胶接修补设计方法,包括修补材料体系、修补强度计算与评估分析、修补方案、修补工艺及设备等问题,同时也给出了部分修补试验验证以及国内外典型修理案例实践等相关内容。内容比较全面系统,具有较强的工程指导性,能够指导国内航空装备金属损伤结构复合材料补强修理的实践,同时亦可为民用和工业设备等其他方面的修理提供参考和借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

金属损伤结构复合材料原位胶接修补指南/廖圣智

等著. —北京:国防工业出版社, 2017. 1

ISBN 978-7-118-11144-6

I. ①金… II. ①廖… III. ①金属结构—胶接—指南
IV. TU39-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 316215 号

※

· 国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 4 $\frac{7}{8}$ 字数 126 千字

2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

随着飞机服役时间的推移,飞机金属结构在外场环境有害气体
的持续侵蚀下,容易发生严重腐蚀。这在沿海地区、湿热气候及酸雨
严重的地区表现得尤为明显。而且,新飞行训练大纲实施后,飞机结
构频繁承受大过载,不断出现严重损伤。飞机金属结构的腐蚀及裂
纹日益突出,成为影响或限制飞机正常飞行的重要因素之一。

金属结构腐蚀损伤复合材料修理技术是将高性能纤维增强复合
材料补片、高强度胶粘剂在加热加压条件下胶接在结构腐蚀部位,从
而缓解腐蚀损伤部位应力集中程度,以达到恢复结构的使用功能和
延长结构使用寿命的目的,涵盖修理设计技术、表面预处理规程、原
位表面处理技术、腐蚀损伤填充技术、复合材料胶接修理工艺规程以
及修补后的腐蚀防护措施等实用技术,与传统的机械修理方法(铆
接、焊接或螺接修理)相比,具有结构增重少、可靠性高、不引入新的
损伤源、便于现场原位修理等突出优点,是一种具有广阔应用前景的
飞机损伤结构修理新技术。

自 20 世纪 70 年代,澳大利亚科学与技术研究中心的航空和海运研
究室提出采用复合材料修复 F-111 战斗机金属部件损伤断裂破损处的
最新理论和技术以来,国外以美国为代表,在热固化复合材料补片胶接
修补金属结构技术领域做了大量理论分析方法与试验验证研究工作,
这些国家已研究出性能优异且工程实用的金属基体表面处理(如磷酸
无槽阳极化(PANTA)、磷酸包容系统(PACS))工艺及设备、多种适用
于不同环境下的高性能胶粘剂和复合材料补片材料、性能稳定的后固

化与检测设备,并制定了规范化的修补工艺、尺寸与铺层参数选取技术等,逐渐进入工程实用阶段,并广泛应用于军民用飞机(如 F-111、C-130、C-141、Mirage 等)和舰船等损伤结构的外场/现场修理。

国内航空工业部门从“八五”开始就意识到金属损伤复合材料修补技术的技术优势和重要性,并陆续开展了一些理论分析方法和试验研究工作,进行了某些实际的修理并取得了一定的经验。但总的看来尚不够深入、系统,也没有正式的修理设计规范和指南供实践中遵照执行。鉴于此,中航工业特种飞行器研究所于“十一五”“十二五”期间,以“金属腐蚀损伤复合材料原位修理技术研究”为题,对典型金属裂纹和腐蚀损伤的复合材料原位修补问题进行了较为系统的发展研究。本书即在该项目具体工作的基础上,适当参考国内外相关技术资料总结而成。

本指南从复合材料修补金属损伤结构的工程实用性出发,共分为 6 章,重点介绍了复合材料快速原位胶接修补设计方法,包括修补材料体系、修补强度计算与评估分析、修补方案、修补工艺及设备等相关问题,同时也给出了修补试验验证及典型修理案例实践等相关内容。内容比较全面系统,具有较强的工程指导性,能够指导国内航空装备金属损伤结构复合材料补强修理的实践,同时亦可为民用和工业设备等其他方面的修理提供参考和借鉴。

全书由中航工业特种飞行器研究所的廖圣智、刘元海主持撰写和统稿,参加本书相关研究工作的还有王浩伟、韦利军、张辰玉,以及海军航空工程学院青岛校区的李旭东。本书在编写过程中参考了大量的国内外文献、著作和各类手册,所有参考资料均在书中列出,我们在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,书中的内容肯定存在疏漏和不足,谬误之处也在所难免,敬请广大读者、同行批评指正。

作者

2016 年 9 月

目 录

第 1 章 金属损伤复合材料修补技术简介	1
1.1 复合材料胶接修补方法分类	2
1.2 复合材料补片胶接修补方法的优缺点	4
1.2.1 优点	4
1.2.2 缺点	6
1.3 复合材料补片胶接修补的关键技术及设计分析	6
1.3.1 关键技术	7
1.3.2 复合材料补片胶接修补的设计分析	9
第 2 章 胶接修补设计方法	10
2.1 结构损伤检测评估	11
2.2 修补材料体系的选择	11
2.2.1 增强材料的选择	11
2.2.2 树脂材料的选择	12
2.2.3 预浸料的选择	13
2.2.4 胶粘剂的选择	14
2.3 修补结构设计	16
2.3.1 补片构形设计	16
2.3.2 补片尺寸设计	17
2.3.3 补片边缘设计	18
2.3.4 补片铺层设计	19

2.4	修补工艺设计	20
2.4.1	修理前的表面处理	20
2.4.2	损伤缺陷填充设计	20
2.4.3	补片固化工艺设计	21
2.5	修补中的腐蚀/老化防护	23
2.5.1	修补中的金属基体腐蚀防护	23
2.5.2	修补结构的复合材料补片老化控制	23
2.6	修补后的结构无损检测	23
2.7	修补后的结构强度、寿命评估	24
第3章	胶接修补表面处理技术	25
3.1	铝合金常见表面处理方法	25
3.1.1	脱脂	26
3.1.2	打磨和喷砂	26
3.1.3	铬-硫酸浸蚀法	27
3.1.4	铬酸阳极化	28
3.1.5	磷酸阳极化	28
3.2	波音飞机铝合金结构胶接修补前表面处理技术	29
3.2.1	Tank PAA	30
3.2.2	PACS	30
3.2.3	PANTA	32
3.2.4	Boegel EP II (AC-130)	33
3.2.5	糊状酸浸蚀	35
3.2.6	HF Alodine 氧化	36
3.2.7	硅烷表面处理	36
3.3	飞机结构表面原位表面处理工艺研究	36
3.3.1	磷酸局部包容处理(PACS)	36
3.3.2	非槽式磷酸阳极化(PANTA)	41

3.4	原位表面处理方法优选与验证	44
3.4.1	PACS 与 PANTA 的比较	44
3.4.2	PACS 与 Alodine 氧化、硅烷表面处理、槽式 PAA 的比较	46
第4章	胶接修补试验研究	52
4.1	不同修补设计方案对含裂纹薄板结构修补效果的 影响	52
4.1.1	金属损伤 - 复合材料修补件的制备	52
4.1.2	腐蚀环境试验	55
4.1.3	静力拉伸试验	58
4.1.4	疲劳试验	61
4.2	不同修补胶粘剂对含裂纹薄板修补效果的影响	67
4.2.1	裂纹损伤复合材料修补试样的制备	67
4.2.2	预腐蚀环境试验与力学特性试验	69
4.3	不同填充方法对腐蚀损伤薄板结构修补效果的影响 ...	74
4.3.1	金属腐蚀损伤复合材料修补试样的制备	74
4.3.2	预腐蚀环境试验与力学特性试验	76
4.4	不同设计方案对含裂纹厚板结构修补效果的影响	80
4.4.1	损伤结构复合材料修补件的制备	80
4.4.2	腐蚀环境试验	83
4.4.3	力学性能试验	85
第5章	修补工艺及质量控制	101
5.1	修补实施工艺	101
5.1.1	修补前准备	101
5.1.2	主要工艺过程	104
5.2	修理后的质量控制	109

5.2.1	外观检查	110
5.2.2	内部缺陷检测	110
第6章 修补实例		117
6.1	国外典型修补案例	117
6.1.1	F-111 战机的修理	119
6.1.2	F-16 燃油透气孔的修理	120
6.1.3	L-1011 飞机舱门框的修理	121
6.1.4	C-5A 机身顶部裂纹的修理	123
6.1.5	B-1 轰炸机群的修理	123
6.1.6	波音 747-300 飞机的修理	124
6.1.7	波音 767 机身龙骨梁的腐蚀修理	124
6.1.8	英国皇家空军的修理	125
6.2	国内典型修补案例	126
6.2.1	某型歼击机平尾蒙皮腐蚀损伤修理	126
6.2.2	某型战斗机右翼翼根蒙皮裂纹损伤原位 修理	130
6.2.3	某型教练机右起落架舱内机翼主梁裂纹 的修理	134
6.2.4	某型水上飞机中央翼上壁板腐蚀损伤 原位修理	138

第 1 章 金属损伤复合材料 修补技术简介

损伤飞机结构的修理技术和老龄飞机结构的延寿问题,已经日益引起了世界各国航空航天界的高度重视,建立和完善一套优质、高效、低成本的结构损伤修理技术就成为飞机结构修理的核心内容。复合材料修理金属结构技术是用胶接的复合材料加强件减缓或阻止疲劳裂纹的扩展,增强由于疲劳损伤、腐蚀损伤、磨损及冲击等多种形式的损伤而耗损的结构区域力学性能,并从结构上增强小裕量或负裕量的区域,这是国外 20 年前发展起来并在推广应用的一种高效、快速、低成本的结构修理技术。早在 1978 年,澳大利亚航空研究所(ARL)就首先使用硼纤维增强材料(BFRP)补片对某型飞机的起落架疲劳试验裂纹进行了现场修理。自 1979 年以来用此方法对澳大利亚皇家空军(RAAF)的“幻影”(Mirage)Ⅲ飞机机翼下表面蒙皮的疲劳裂纹进行了数百次的现场修理。之后,美国空军也利用该技术对包括 F-111、B-1 在内的部分军机进行了修理。近年来,复合材料补片胶接修补技术已广泛用于民机损伤结构的修理。图 1-1 和图 1-2 分别为美国空

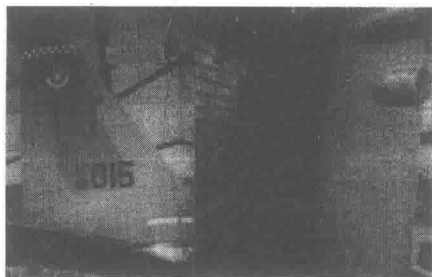


图 1-1 F-15 垂尾的复合材料胶接修补

军对 F-15 战斗机的垂尾和 B-52 战斗机的机身的复合材料胶接修补实例。



图 1-2 复合材料胶接修补 B-52 机身疲劳裂纹

1.1 复合材料胶接修补方法分类

飞机复合材料胶接修理是将已固化的、半固化的(B 阶段)、未固化的预浸料,用胶接的方式粘贴到结构损伤区以恢复结构的原有强度、刚度、寿命的方法。该方法可分为贴补和挖补两种基本的修理方法。

贴补修理是在损伤结构的外部粘贴补片以恢复结构的强度、刚度及使用寿命,它又分为预浸贴片与胶粘剂共同固化和胶粘剂粘贴预固化片两种方法(见图 1-3、图 1-4)。该方法操作简单,施工效率高,通常能恢复原有强度的 70%~80%,适用于损伤较轻和对气动外形要求不严的飞机结构的维修。

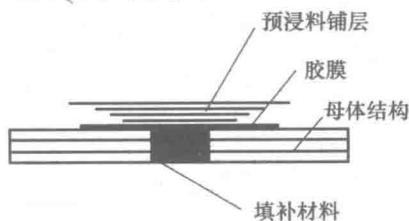


图 1-3 预浸料贴补修理

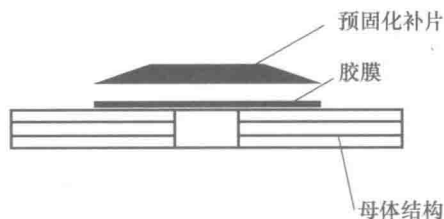


图 1-4 预固片贴补修理

挖补修理是先采用铣切等方式将损伤结构挖除,并形成斜接式或阶梯式的粘接面,然后采用预浸料或其他填充物填充挖补区,最后经固化得到平整修理表面(见图 1-5、图 1-6)。这种修理方式能获得良好的气动外形,胶接面上的剪应力分布比较均匀,此外,由于不存在偏心载荷,补强板的剥离应力比较小。但是,挖补修理比贴补修理工艺复杂,对操作的要求更高,修理周期也比较长。因此,适用于大修厂内的大修,不太适合外场快捷维修。

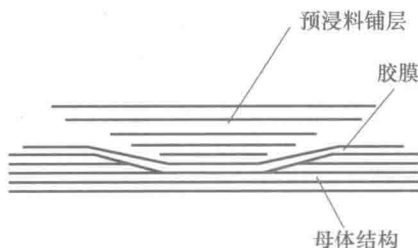


图 1-5 非穿透性损伤挖补修理

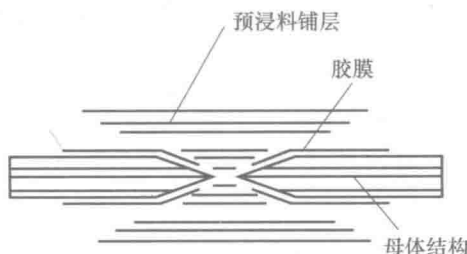


图 1-6 穿透性损伤挖补修理

1.2 复合材料补片胶接修补方法的优缺点

1.2.1 优点

与传统的机械修理方法相比,复合材料补片胶接修补技术具有以下优点:

(1) 结构增重小。由于复合材料的比强度、比刚度较高,因此要达到同样的修补效果,复合材料补片的厚度较小,一般同样大小的损伤,所需复合材料补片的厚度仅为相应铝合金板厚度的 $1/3$ 到 $1/2$; 复合材料结构具有可设计性。可以根据损伤结构的具体受力特点,采用改变补片铺层方式的方法达到最佳受力状态,最大限度地发挥复合材料的优势,降低修补结构的重量。

(2) 提高或恢复腐蚀/损伤区的刚度、静强度,减小裂纹尖端的应力强度因子。与机械修理方法相比,该修补方法一般不需要对原结构开孔,完全无损伤,因此不会形成新的应力集中源,有利于提高结构的抗疲劳性能和损伤容限性能。1991 年 1 月,美国空军 (USAF) 发现 B-1 轰炸机机群中有 37 架飞机的前机身大梁区域有疲劳裂纹,首先采用螺接铝板、在裂纹尖端钻止裂孔的方法进行修理,但钻孔和螺接进一步恶化了该区域的受力情况,半年后即发现有 17 架飞机的裂纹继续扩展。

(3) 提高抗腐蚀性能。由于复合材料的抗腐蚀性能极好,该方法特别适于结构局部裂纹、损伤和腐蚀等多发性故障的修理,修后能够有效阻止裂纹和破坏的进一步发展,满足可靠性和耐久性的要求。

(4) 简单方便易用且成本低。采用复合材料补片胶接修补技术的一个显著优点是可以大大地缩短修理时间和降低修理成本。该方法易于采用,便于修补复杂表面,成形性好,适合外场修理。且修理所用的时间低,大约为常规方法的 $1/3$ 。例如,C-141 飞机机翼下

壁板出现腐蚀损伤后,采用机械修理方法需要6个星期,如果采用复合材料修补胶接修理技术,仅仅需要2个星期就可以完成,其中实际修理时间仅为12h(表面处理4h和胶接固化8h),有效地降低了工人的劳动强度,提高飞机的出勤率,且修理后结构的使用寿命增加了4.3倍。又如,波音767-200机身龙骨梁使用4年后发现存在大面积的腐蚀损伤,在长达1m的距离上,铆钉周围严重腐蚀,最大腐蚀深度达到结构厚度的1/3以上,使连接铆钉容易脱落,已经超出了波音飞机的修理规范,采用常规的修理方法需要更换龙骨梁,耗时费力。采用复合材料补片胶接修补技术,据报道仅需2人花8h就能够完成修理工作,经过2年多的飞行,检查完好无损。

(5) 修理效率高。在复合材料胶接修补过程中,一般不需要对原结构开孔,因此不会形成新的应力集中源,可以改善应力集中和载荷情况,有利于提高结构的抗疲劳性能和损伤容限性能。

(6) 成形性能好。可以通过二次共固化技术改变复合材料的表面形状,对于复杂曲面,采用复合材料补片胶接共固化修补技术进行原位修补,修补后补片与母体能紧密贴合,具有恢复原有结构形状和保持光滑气动外形的能力。此外,这种修理方法不受结构施工条件的限制,对于封闭结构或者复杂类型的结构,都可以从单面进行胶接修理。例如,对于机翼上、下蒙皮活动机身表面损伤,无需拆下原结构就可以进行修理,且修理后补片形状与损伤区域都保持一致。

(7) 无损探伤简单。国外对于金属构件的修复大多使用硼/环氧复合材料。由于硼/环氧复合材料不导电,采用涡流探伤方法可以有效地检测出补片下裂纹等损伤的扩展情况,外场使用也很方便。最近资料表明,对于碳/环氧复合材料补片,涡流探伤方法也同样有效。超声波探伤方法不仅可以有效地检测出补片中存在的损伤,也可以用于检测胶层的粘接质量(如气孔、胶层分层等)。由于超声波穿透能力强,灵敏度高,并且对人体无害,因此超声波探伤技术已得

到广泛应用。特别是外场使用时,因其成本低和结构轻便而备受欢迎。

1.2.2 缺点

复合材料补片胶接修补技术具有以下缺点:

(1) 复合材料,尤其是碳/环氧复合材料性能不稳定,且胶接修补质量影响因素很多,引起修补强度的离散性很大。

(2) 修理之前必须进行表面处理,并且表面处理很难控制,过程不好控制,而且表面的处理质量对于结构修理后的疲劳寿命有较为显著的影响。

(3) 复合材料补片和金属结构的热膨胀系数相差较大,胶接固化后热膨胀系数差异将导致在金属损伤结构中存在残余热应力,这种残余热应力对修补效果产生不利影响。

(4) 在复合材料补片胶接修理过程中,按照结构胶粘剂的使用要求,需在一定的温度和压力下进行胶接固化,才能获得较好的胶接质量。用复合材料补片胶接修理飞机金属结构有一个很大的特点和难点,就是整个飞机的金属骨架传热很快,这不同于复合材料结构,因此,在修理区域保持一个局部的恒定温度场是相当困难的。

(5) 采用碳/环氧复合材料补片修理铝合金结构时,两者之间易发生电偶腐蚀,应采取有效的防范措施。

1.3 复合材料补片胶接修补的关键技术及设计分析

复合材料补片胶接修补的服务对象是在使用过程中因各种原因造成了一定程度的破坏与损伤的飞机,被修理部位已具有经检查发现的损伤(如裂纹、腐蚀、磨损等)。因此在飞机剩余使用寿命期间进行修理应贯彻耐久性设计思想。对损伤部位的修理要综合考虑以

下几方面因素:

1. 损伤结构的修理容限

复合材料补片胶接修补方法适用于飞机次/主要受力构件和采用损伤容限准则设计的结构件的损伤修理。应根据结构的损伤程度来分析确定是否可修及采用何种修理方法。在对飞机的重要受力构件和属于耐久性设计的关键结构部位的损伤进行修理时,应慎重决策;对于这些构件的轻度损伤,若更换构件成本过高或没有更合适的修理方法,可考虑采用此方法。

2. 损伤部位的开敞性及实施胶接修补的方便程度

被修补损伤部位良好的敞开性及较高的方便程度可充分保证修补工艺质量并有助于修补后的检测与评估。

3. 修补用材料体系与修补工艺

具有良好综合性能、使用方便、经济的胶粘剂与复合材料预浸料补片直接影响着被修补结构件的耐久性。满足胶粘剂和补片材料性能、适应外场修理的工艺方法及辅助工艺、设备,最终决定了修理的效果。

1.3.1 关键技术

对复合材料补片胶接修补技术而言,胶粘剂、补片材料、待修部位的表面处理和修补固化工艺及施工工艺保障是几项关键技术。

1. 胶粘剂

选择胶粘剂,不应片面追求胶的高剪切强度,应考虑胶的综合性能。所选用的胶粘剂应具有良好的抗疲劳性能,具有较高的剪切、剥离强度,良好的耐介质和耐湿热老化性能。

同时,胶粘剂应与预浸料补片的固化温度尽量匹配,以产生良好的胶接效果。尽管高温固化胶粘剂的粘接强度较高,但会使铝合金的疲劳强度下降(由于铝合金加热至120℃以上,开始出现晶界腐蚀倾向,并随温度升高而加剧),同时使金属结构与复合材料补片之间

因热膨胀系数不同而产生内应力,进而影响胶接的整体强度,降低修补的耐久性。

2. 复合材料补片

补片材料一般应具备以下特性:在尽量低的使用温度下固化并能与胶粘剂的固化温度相匹配;热膨胀系数应在连接零件的范围内,补片受温度影响应尽量小。硼/环氧复合材料补片在国外的修理实践中应用较多,而在国内的一些修理实践中碳/环氧复合材料及玻璃/环氧复合材料补片应用较多。

3. 待修部位的表面处理

在胶接修补之前,通过物理和化学方法对待修损伤结构表面进行恰当的预处理将显著提高修补的胶接强度和耐久性。

对金属结构表面进行预处理的作用在于净化表面,去除不利于胶接的物质;通过机械方法除去结构表面的氧化层、污染物,增加机械结合面;通过化学方法在结构表面有控制地沉积一层均匀的特种氧化物或在胶接面形成化学键,使经过处理的结构表面具有较高的表面能,从而获得较高的胶接强度和耐久性。

常见的净化表面的方法有溶剂清洗、蒸汽脱脂等。常用的化学方法有槽式磷酸阳极氧化、无槽磷酸阳极化及涂硅烷偶联剂等。应根据待修部位的实际情况合理选择适用于现场施工、不产生二次污染和二次损伤的表面处理方法。

4. 修补固化工艺及施工工艺保障

修补固化的主要控制因素是温度、压力和时间。应根据补片与胶粘剂的性质及修理现场所能提供的施工条件综合制定固化压力、温度和时间,以期使复合材料补片在具有较好力学性能的同时又具有较高的胶接强度,保证胶接的质量。由于被修补部位与周围机体结构组成了一个庞大的热导体,而且结构形式多样,因此,需通过专用修理设备、配套材料及特配工具对待修区域提供连续的温度和压力保障。