

# 复合材料胶接修复工艺过程及其影响因素\*

## Bond Repair Process for Composites Structure and Influencing Factor

上海飞机制造有限公司 孔娇月 晏冬秀 孙 凯

**[摘要]** 复合材料胶接修复是复合材料结构修理中非常重要的一类方法,可以针对层压板结构以及夹层结构。胶接修复包含贴补修理和挖补修理两种基本的修理方法。本文从修理工艺步骤入手,介绍了复合材料结构件不同胶接修理工艺流程,包括修理区域确定、损伤去除、以及损伤修理等内容。文中还总结了修理过程中可能影响修理质量的各种因素。

**关键词:** 胶接修理 贴补修理 挖补修理 工艺过程 影响因素

**[ABSTRACT]** Bond repair for composites structure is a very important method for composites repair and can be used in laminate structure and sandwich structure. Bond repair includes patch-bond repair and flush repair. Different bond repair processes are introduced. The process is described step by step including determining the repair area, removing damage and repairing the plies. The influencing factors that may affect the repair quality are also summarized.

**Keywords:** Bond repair Patch-bond repair Flush repair Process Influencing factor

在世界百年航空发展进程中,素有“一代材料,一代飞机”之说,一语道破了提高飞机性能与采用高性能新材料之间的密切关系。复合材料在新一代节能、环保和舒适性更高的民用飞机,以及高性能的军用飞机中的应用也充分证明了这一论断。复合材料比强度高、比刚度高及可设计性强的优点,可以使飞机结构有效减重,降低油耗;优异的抗疲劳和耐腐蚀性能,提高了飞机结构的使用寿命<sup>[1-2]</sup>。复合材料结构在制造和使用营运过程中,由于受外来物撞击、交变载荷、雷击以及环境条件等因素的作用,不可避免会出现不同程度的损伤。为了恢复复合材料构件的功能,需要对其实施修理<sup>[3]</sup>。

### 1 复合材料修理分类

在飞机复合材料结构修理中,常用的修理方法可分为广义的胶接修理和机械连接修理两大类,如图1所示。广义的胶接修理包括室温下固化的冷修理(通常包

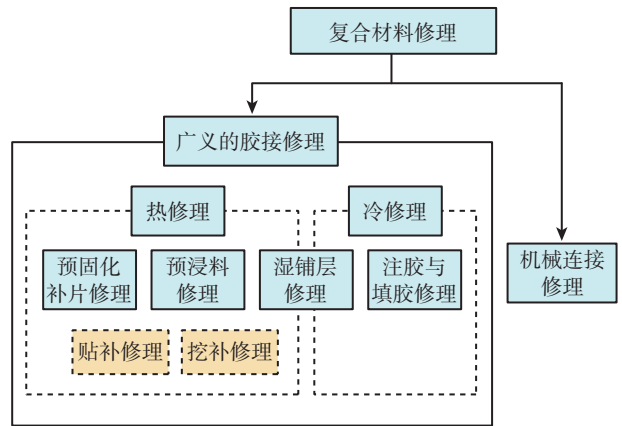


图1 复合材料修理分类  
Fig.1 Classification of composites repair

括室温湿铺层修理、注胶与填胶修理)以及需要加热固化的热修理(预浸料修理、预固化补片修理与湿铺层修理)。冷修理通常在室温下固化,有时为了加速固化、减少固化时间,得到高质量的修理,也会利用加热设备加热,但通常不超过 65.5℃。冷修理不能恢复原结构的强度和耐久性,不能用在高应力区和主要结构件的修理上,通常为临时性修理,应定期检查。本文介绍的胶接修理是指较为狭义的胶接修理,主要指永久性的热修理<sup>[3-5]</sup>。

#### 1.1 胶接修理的优点

复合材料从 1985 年起用于飞机的主承力构件,但维修工艺的变化却不大,大多仍采用机械连接修理,即在损伤的复合材料上通过螺栓连接金属补丁进行修理。但机械连接修理存在结构增重多、修理区应力大等缺点<sup>[6-7]</sup>。而胶接修理可以使碳纤维板的损伤去除最小、强度和外形得到尽可能的恢复、增重维持在最低限度,所以胶接修理是首选的修理方法<sup>[8]</sup>。

#### 1.2 胶接修理的分类

胶接修理主要包括贴补修理和挖补修理两种基本的修理方法。

贴补修理是指在损伤结构的外部,通过胶接或胶接共固化来固定外部补片以恢复结构的强度、刚度以及使用性能的一种修理方法。主要针对气动外形要求不严格的结构进行,其示意图如图2所示,其中,图2(a)为胶接共固化贴补修理,(b)为胶接贴补修理示意图。胶

\* 中国商飞关键技术攻关项目(C919-C030601-24-3)资助。

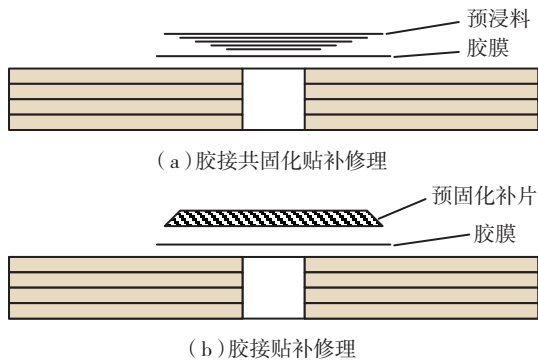


图2 贴补修理示意图  
Fig.2 Diagram of patch-bond repair

接共固化贴补修理是指在损伤区域粘贴胶膜和一定层数和取向的预浸料,通过胶接共固化恢复结构功能。胶接贴补修理是指在在损伤区域粘贴胶膜和预先固化好的复合材料补片(也可是金属补片)以恢复结构功能。

图3为挖补修理示意图。挖补修理适用于修理面积较大、较严重的损伤,增重量小,对于修理曲率较大或有气动外形要求的表面具有一定的优越性。从修理材料选用分类,挖补修理可以分为预浸料修理以及湿铺层修理;从修理过程分类,挖补修理可分为非穿透性损伤挖补修理和穿透性损伤挖补修理,其中穿透性损伤挖补修理可以采用双面修理或单面修理。

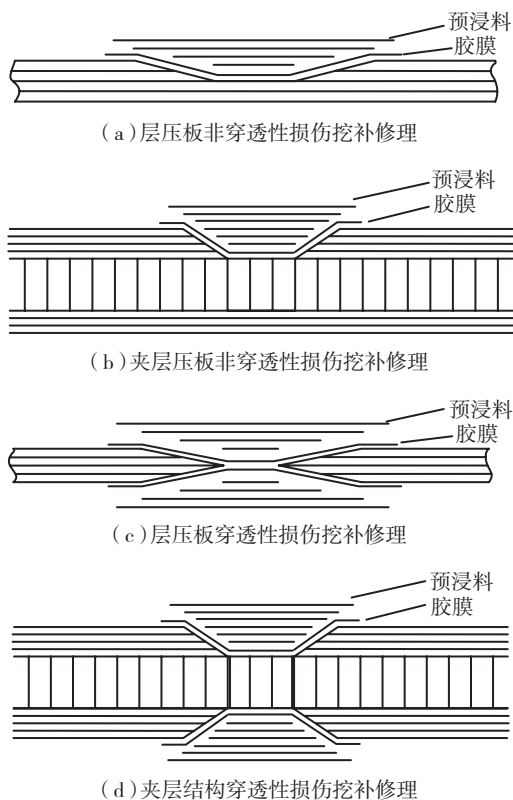


图3 挖补修理示意图  
Fig.3 Diagram of flush repair

## 2 胶接修理流程

一般损伤结构件较为完整的修理流程包括:损伤检测与评估→确定修理方法→修理区域准备→修理材料准备→实施修理→修理区固化→修理后检测。本文将从修理区域准备开始介绍胶接修理的具体流程。

### 2.1 贴补修理流程

(1)确定损伤及修理区域。清洗损伤区域,去除所有污物 and 水分并充分干燥,以便准确确定损伤区域。如图4所示按照缺陷的大小形状,用光滑的线条将其圈出,圈出的范围要尽可能小,但是曲率不可过小,不可有过于尖锐的部分。根据圈出的损伤区域确定修理区域尺寸,用压敏胶带进行标记以便修理区域打磨,并防止打磨到修理区域之外。

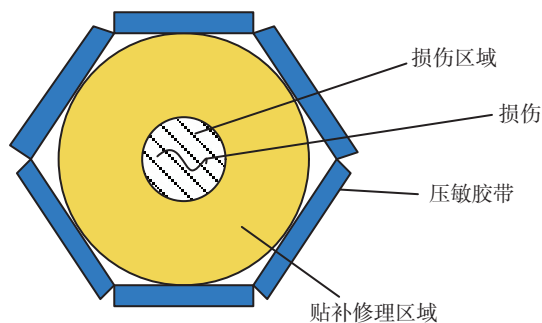


图4 损伤及修理区域的确定  
Fig.4 Determining size of damage and repair area

(2)修理区准备。在压敏胶带标记区域,用细砂纸打磨,去除修理区域的表面膜或表面漆层等防护层,注意不要伤及纤维。对于损伤需要去除的情况,还要去除松散的损伤。打磨后去除标记用压敏胶带,并进行再次清洁,使修理区域充分干燥。

(3)修理材料准备及实施修理。若去除了损伤,需要用灌封料对去除损伤的部分进行填充,并在固化后打磨至与周围平齐,清洁干燥后再进行后续的铺层修理。若采用胶接共固化贴补修理,需要按照待修理区域的铺层信息、尺寸大小准备胶膜和预浸料,将胶膜铺放在修理区域,再逐层铺放预浸料,胶膜要比预浸料尺寸略大;若采用预固化补片进行贴补修理,先要将准备好的预浸料逐层铺叠并固化,再通过胶膜将预固化补片粘接在待修理区域,胶膜尺寸依然要略大于补片尺寸。

(4)修理区固化。若使用热补仪修理,如图5在修理区域放置隔离膜、加热毯、透气毡,热电偶放置在加热毯下方的修理区附近,用来控制加热毯升温 and 监测修理区的温度,在加热毯以外的位置放置真空嘴连接真空源。编制热补仪固化程序,进行修理固化。若采用热压罐或烘箱修理,则不需要在真空袋内放置加热毯。

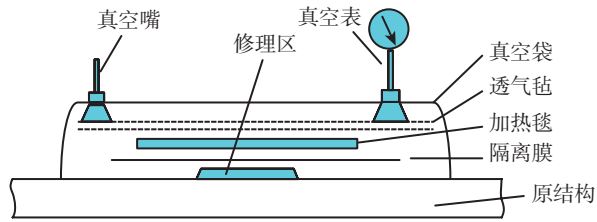


图5 修理区固化  
Fig.5 Curing of repair area

(5) 修理完成检测合格后,再恢复表面的保护层。

## 2.2 挖补修理流程

挖补修理的流程与贴补修理类似,但是在实际操作过程中仍然略有不同。

(1) 确定损伤及修理区域。挖补修理流程的损伤及修理区域的确定与贴补修理类似,但是由于挖补修理需要在每个铺层制造出搭接面,因此用压敏胶带进行标记修理区域尺寸时,需要考虑到搭接面尺寸。

(2) 损伤去除及修理区准备。挖补修理和预固化补片贴补修理很重要的一点区别在于,挖补修理需要去除铺层,形成搭接面。去除铺层一般采用阶梯法和斜接法,目的都是为了使修理铺层与原铺层进行搭接修复。需要注意在去除铺层时避免伤及周围和下一层纤维。

(3) 修理材料准备及实施修理。先按照待修理区域的铺层信息、确定的搭接长度准备胶膜和预浸料,将胶膜铺放在修理区域,再逐层铺放预浸料,预浸料方向与原铺层方向相同,在完成所有结构修理铺层铺放后,还需要铺放一层附加修理层。若用湿铺层进行,则不需要铺放胶膜。

(4) 修理区固化、修理区检测及表面层恢复与挖补修理相同。

## 2.3 夹层结构夹芯损伤修理

上述修理流程主要针对层压板或夹层结构蒙皮损伤。若损伤已达到夹芯部分,还需要对夹芯部分进行修理,可以采用注入灌封料(只针对蜂窝芯)进行加强或替换夹芯,之后再按照上述流程修理夹层结构蒙皮。若蜂窝芯芯格轻微变形,可以不用替换新的蜂窝芯,采用灌封料灌封并固化即可。若需要替换损伤的夹芯,按照下述流程进行:

(1) 去除损伤夹芯。去除损伤需替换的夹芯,去除形状通常为圆柱、椭圆柱等,避免尖锐的形状。

(2) 按照去除夹芯的形状裁切出替换的夹芯塞,若为蜂窝芯,需要注意蜂窝芯的条带方向。

(3) 清洗去除损伤的部位及替换用夹芯塞,并充分干燥,避免溶剂残留。

(4) 替换夹芯。在夹芯和下面板之间铺放胶膜(对于部分去除的夹芯,在替换夹芯塞和保留的蜂窝芯之间

也需要用胶膜连接),然后将缠绕了一圈泡沫胶的替换夹芯塞按照方向放入去除部位。

(5) 固化。完成替换后,需要固化使替换的夹芯塞与原结构粘接在一起,固化的封装方式与蒙皮修理的固化封装方式相同。可以待蒙皮修理完成后,一同固化,此为一次固化;还可以分别固化替芯和蒙皮,为二次固化。为了保证修理质量,一般推荐采用二次固化。

## 3 修理效果影响因素

在选定一种胶接修理方法之后,影响胶接修理效果的主要有两方面因素。一方面为修理方案的影响,主要为补片大小厚度(贴补法)的设计和挖补角度(挖补法);另一方面为工艺影响因素,包括温度和压力。

### 3.1 修理设计影响因素<sup>[9-10]</sup>

#### 3.1.1 补片的大小

补片大小影响了搭接长度和胶接面积,若搭接长度比较短,则所有胶黏剂都处于较高的剪应力状态,胶层破坏是修补结构失效的主因,胶层强度决定修补板强度;搭接长度较长,则大部分交界区域只承受很小的载荷或不受载,补片破坏成为修补结构失效的主因,修补板的强度由补片强度决定。通过模型计算分析,优化搭接长度大约为 12mm,再考虑到不完全胶接、补片端部分层和安全系数等因素,搭接长度一般应在 20~30mm。直径超过临界值后,继续增大直径对改善修理效果没有意义。

#### 3.1.2 补片的厚度

在相同尺寸补片的情况下,随着补片厚度增加,补片强度逐渐增大,主要失效位置由补片破坏转移到胶层破坏。且补片厚度会影响修理刚度,总的补片面内刚度的最优值等于母板的面内刚度值。对于贴补修理,仍然考虑为双搭接接头分析,当母板和补片的弹性模量相同时,最优的补片厚度为母板厚度的 1/2。

(3) 挖补角度。挖补角度主要针对斜接法而言,阶梯法则从阶差体现出来,但改变阶梯挖补的阶差改变的仍然是总体挖补角度,因此在此一并讨论。挖补角度越小胶接面越大,但去除的未损伤材料越多;挖补角度越大,修理过程中去除的母板材料就会越少,但是对于胶黏剂的抗剪强度要求更高。传统胶接模型分析认为,挖

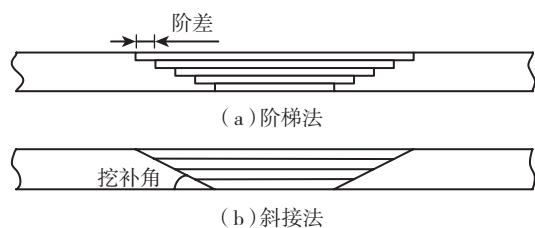


图6 挖补角度及阶差示意图  
Fig.6 Diagram of flush angel and ply stagger

补斜度应在在 1:15 到 1:18 之间。有研究通过有限元方法分析,采用剪切强度不小于 20MPa 的胶进行挖补修理时,6°的挖补角为最优楔形角。从国外的研究和实践经历,斜接法挖补的斜度为 1:30,阶梯型挖补的每层阶差为 0.5inch (1inch=25.4mm),如图 6 为挖补角度及阶差示意图。

### 3.2 修理工艺影响因素

#### 3.2.1 温度的影响<sup>[8]</sup>

在进行胶接修理时,温度是至关重要的因素,复合材料修理只有在规定的温度范围内固化,才可能达到最大粘结性能。出现温度偏差会导致补片以及胶接面粘接不合格,在运行过程中整个修理将逐渐失效。在实际修理过程中,由于结构材料、材料厚度以及内部结构不同,会导致修理区域温度存在偏差。典型的容易出现温差的位置为蜂窝夹层结构蜂窝区与装配区的过渡,由于蜂窝芯格中充满空气,空气的导热系数非常小,因此蜂窝区温度变化慢;装配区全部为层压板,碳纤维导热系数略大,导致温度变化较蜂窝区快。使用修补仪电热毯进行试验时,若没有特殊措施,当达到保温温度 180℃ 时,蜂窝区与层板区温差一定会超过 10℃ 以上,这就需要在低温区域外面遮盖一定层数的保温材料,或者采用其它措施来均衡温差。因此,实际结构件修理之前,需要进行热传导分析,甚至通过试验验证修理方案以保持温度均匀性保证修理质量。若采用热压罐修理,则整个修理可以处于较为均匀的温度环境中。

#### 3.2.2 压力的影响

修补仪较为轻巧便携,可以适用于外场修理。但采用修补仪进行修理时,一般只能提供略大于 22inHg 的真空压力,不能提供外压,因此固化区域不如采用热压罐固化密实,可能不能达到原结构要求的孔隙率等。但采用热压罐固化存在维修成本高、大型制件难以进罐等缺点,且不适于外场飞机复合材料的修理<sup>[11]</sup>。因此在选择固化方式时,需要综合考虑各项指标要求和可实现性。另外,非热压罐成型预浸料对成型压力不敏感,可以在复合材料修理应用中进行研究和应用。

### 参考文献

[1] 杜善义,关志东. 我国大型客机先进复合材料应对策略思考. 复合材料学报,2008,25(1):1-10.  
 [2] 陈绍杰. 一代飞机 一代材料 谈复合材料技术发展及我国航空工业面临的挑战. 国际航空杂志,2009,10:18-21.  
 [3] 田秀云,杜洪增. 复合材料结构及维修. 北京: 中国民航出版社,1996.  
 [4] 虞浩清,刘爱平. 飞机复合材料结构修理. 北京: 中国民航出版社,2010.  
 [5] 陈绍杰. 复合材料结构修理指南. 北京: 航空工业出版社,

2001.

[6] Bill Burchell,陈石卿. 未来的复合材料修理. 航空维修与工程,2010,6:26-27.  
 [7] 郑立胜,李远才,董玉祥. 飞机复合材料粘接修理技术及应用. 粘接,2006,27(2):51-52.  
 [8] 彭名鹏. 复合材料修理传热分析. 航空维修与工程,2012,5:44-46.  
 [9] 孟凡颖,陈绍杰,童小燕. 层压板修理设计中的参数选择问题. 复合材料学报,2001,18(4):123-127.  
 [10] 王跃全,童明波,朱书华. 复合材料层合板胶接贴补修理渐进损伤分析. 复合材料学报,2011,28(3):197-202.  
 [11] 王凤文,贺旺,许光群. 飞机复合材料修理中固化技术的探讨. 航空维修与工程,2012,3:78.

(责编 亿霖)

(上接第 113 页)

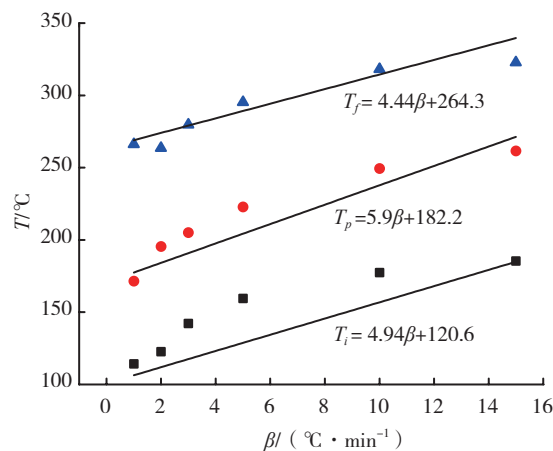


图5 预浸料固化的 $T-\beta$ 外推曲线  
 Fig.5 Extrapolated  $T-\beta$  curve of prepreg curing

### 3 结论

- (1) 用 DSC 研究了预浸料在不同升温速率下的非等温固化过程。
- (2) 利用 Kissinger 方程和自催化模型计算得到了预浸料的固化动力学参数和固化动力学方程。
- (3) 通过  $T-\beta$  外推法确定了预浸料的最佳固化温度。

### 参考文献

[1] 王兴业,唐羽章. 复合材料力学性能. 长沙: 国防科技大学出版社,1988:366-382.  
 [2] Hinton E, Owen D R. Finite element programming. New York: Academic Press Inc, 1977:124-140.  
 [3] 周杰,曹国荣,王巍,等. DSC 法研究不饱和聚酯树脂的固化反应动力学及其固化过程. 玻璃纤维,2011(3):16-24.  
 [4] Kissinger H E. Reaction kinetics in differential thermal analysis. Analytical Chemistry, 1957, 29(11): 1702-1706.

(责编 小城)