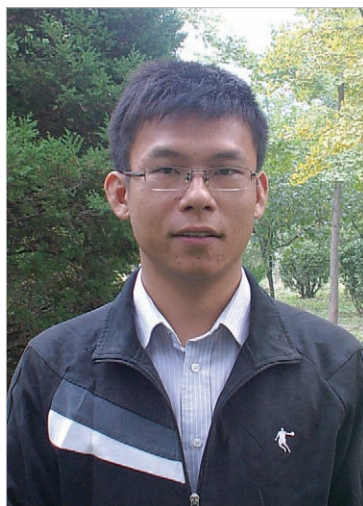


# 先进复合材料挖补修理技术的研究进展

## Research Progress of Composites Scarf Repair

北京航空航天大学航空科学与工程学院 高宇剑 程小全



高宇剑

北京航空航天大学飞行器设计专业硕士研究生,研究方向为复合材料结构修理技术。

复合材料凭借众多优点在航空业已得到了广泛应用。最新的大型客机,如波音 787 的复合材料用量已经达到 50%;空客 A350XWB 的复合材料用量将会达到 52%;现代军用直升机和小型飞机的机体为了减重,采用全复合材料结构。复合材料结构在制造、安装、使用过程中可能会出现各种不同程度的损伤,例如在安装过程中工具坠落造成的冲击损伤;战场中枪弹造成穿透损伤;飞行过

胶接修理作为修理复合材料损伤的一种主要手段,可分为贴补修理和挖补修理。挖补修理因其修理后强度高,能够保持原有结构气动外形等优点,在飞机结构的修理中被广泛应用。

程中的鸟撞损伤、雷击损伤。

胶接修理作为修理复合材料损伤的一种主要手段,可分为贴补修理和挖补修理。挖补修理因其修理后强度高,能够保持原有结构气动外形等优点,在飞机结构的修理中有广阔的发展前景。

### 挖补修理的材料和设备

根据修理所用材料的不同,复合材料挖补修理分为预浸料(Prepreg)修理、预固化片(Precured)修理和湿铺层(Wet-layup)修理 3 种修理工艺。需要注意的是,除非在修理时确有需要,否则很少采用预固化补片的工艺来修理。这是因为采用预固化片修理虽然省去了铺贴修理层的工序、节省了时间,但是在胶接时,胶接面处容易出现胶层厚度不一致,胶层中以及胶接面出现孔隙等问题,严重影响胶接质量以及修理结构的强度。

胶粘剂(Adhesive)是修理中另一个重要材料,通常飞机结构维修中使用的胶粘剂都以胶膜(Adhesive film)的形式提供。胶粘剂的主要成分为:合成树脂以及稀释剂、固化剂等多种添加剂。胶粘剂的成分对胶接性能起决定性作用。不同成分的胶粘剂的固化、使用条件各不相同,其剪切强度、模量等力学性能也不同;即使是同种树脂的胶粘剂,其添加剂不同,也会造成胶接性能的差别。因此维修中针对不同胶接物的结构承载状况,采用相匹配的胶粘剂对胶接修理至关重要。

挖补修理的设备主要有:材料贮存设备(冰箱)、加热设备(电热毯、烘箱)、抽真空设备(真空袋)、切割设备(铣刀、打磨器)。由于飞机客户对效率、成本的要求,现场/前线快速修理技术的迅速发展。很多国外复合材料维修公司(如 WichiTech、

HEATCON)都开发了便携式的胶接维修系统(Hot Bond System)。

### 挖补修理的步骤

复合材料挖补修理的步骤和其他复合材料胶接修理的基本步骤相同,主要包括以下7点:(1)利用目视、敲击和超声波无损检测等方法确定损伤程度和范围;(2)清除损坏材料、斜坡打磨或阶梯打磨挖补角;(3)使用丙酮、甲基异丁基甲酮(MIBK)等有机溶剂清洁胶接面;(4)铺设修理层(湿铺层和预浸料修理)或放置补片(预固化修理),保证胶层厚度一致,胶接连续;(5)加热毯、真空袋等固化设备的封装,按照修理固化条件和时间进行固化;(6)拆除封装材料,对修理表面打磨修整;(7)对修理情况进行检查评估。

### 挖补修理的试验研究

复合材料挖补修理的研究,根据

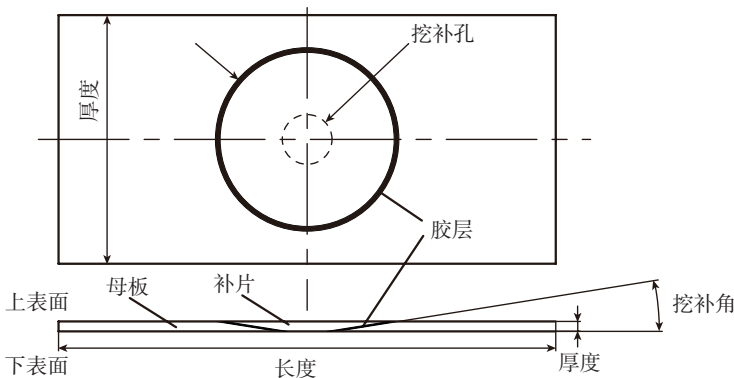


图1 挖补修理层合板的修理参数

方法可以分为试验研究和数值研究。研究的对象包括修理结构的应力分布、胶层的破坏模式,以及修理后强度。如图1所示,挖补修理层合板的最终强度与挖补角、胶层厚度、挖孔直径以及层合板的铺层顺序等多个因素有关。为了研究不同因素对挖补修理的影响,可以改变挖补修理层合板不同的参数,得到修理后强度与参数的关系。表1所示即为不同挖补参数和所对应试件的最终强度。

表1 不同挖补参数和所对应的试件最终强度

试件编号	材料	挖补角 / (°)	铺层顺序	下表面圆直径 /mm	平均强度 /MPa	离散度 /%
A	T300/NY9200G	6	[ ± 45/90/0 <sub>2</sub> / ± 45/0] <sub>s</sub>	20	305	7.5
B	T300/NY9200G	6	[ ± 45/90/0 <sub>2</sub> / ± 45/0] <sub>s</sub>	10	319	2.1
C	T300/NY9200G	6	[ ± 45/90/0 <sub>3</sub> / ± 45/0] <sub>s</sub>	20	293	6.2
D	T300/NY9200G	6	[ ± 45/90/0 <sub>3</sub> / ± 45/0] <sub>s</sub>	10	294	11.8
E	T700SC/NY9200GA	6	[ ± 45/90/0 <sub>3</sub> / ± 45/0] <sub>s</sub>	20	348	5.7
F	T700SC/NY9200GA	10	[ ± 45/90/0 <sub>3</sub> / ± 45/0] <sub>s</sub>	20	434	5.2

在综合考虑各因素的影响程度和范围,能够对挖补修理方法进行最优化设计,提高修理效率和修理强度。

试验研究的一般步骤为:首先在试验机上等速加载修理试件,观察其破坏路径并记录位移-载荷曲线、破坏强度;其次对破坏的试件进行失效分析,一般包括挖补截面的金相分析和断口扫描电镜(SEM)观察;最后利用这些失效分析

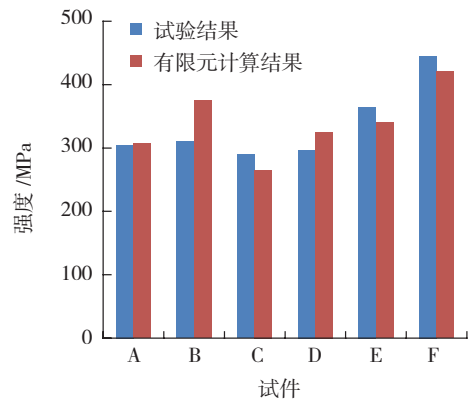


图2 计算结果和试验结果的比较

方法来观察细观破坏模式,找出失效原因和机理。

### 挖补修理的数值研究

挖补修理数值研究的主要目的是与试验研究的结果进行对照(图2),得到试验中无法采集或者无法观察到的力学性能表征。数值研究能够帮助试验研究定位失效破坏的损伤源位置,损伤发展的路径,胶层中损伤的累积扩展情况等。

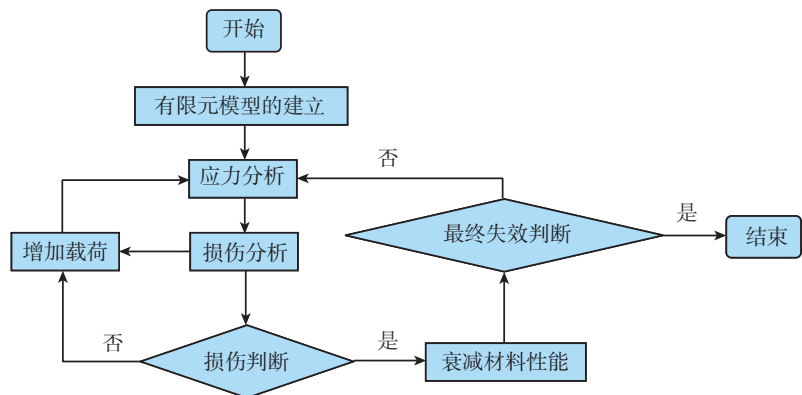


图3 扩展损伤有限元方法的流程图

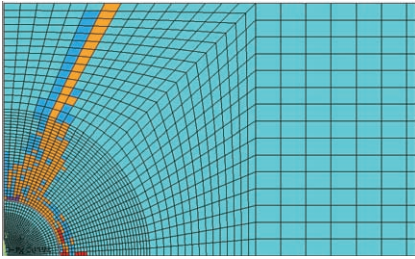


图4 挖补修理层合板单层损伤情况

挖补修理有限元研究方法在过去的20年里取得了很大的发展。已经从过去简单的2维研究发展为3维有限元仿真研究。材料的失效判断也从过去简单判断破坏与否的蔡-吴、蔡-希尔失效判据发展完善为目前常采用的能够区分材料多种不同失效模式(纤维断裂、基体开裂、纤维-基体剪切破坏和分层破坏)的Hashin失效判据。目前,修理结构有限元仿真研究的最常用方法为扩展损伤方法的运算流程图。

通过扩展损伤有限元方法,可以直观、清晰地得到修理层合板各层的损伤位置、损伤类型以及损伤扩展的情况(图4),载荷增加过程中胶层的损伤扩展情况。通过有限元计算还能够得到修理结构的位移-载荷曲线,并能够从位移-载荷曲线中找到胶层破坏载荷以及结构失效载荷(图5)。

总结试验和数值研究的结果,发现挖补修理层合板在受载作用下,初始裂纹损伤会萌生在母板、胶层以及补片界面结合强度较弱的部位。随着载荷不断增大,在一个相对小的局部区域,即界面结合力较弱的区域,裂纹汇合成一条主裂纹;当载荷接近某一临界载荷时,主裂纹的扩展占据了主导位置,并快速沿胶接面扩展,导致修理结构最终失效。

随着挖补修理研究的不断发展,目前最新的研究结果表明:挖补修理结构的失效包括胶层的失效和结构的破坏,而挖补角对胶层失效和结构破坏的影响并不相同。如图6所示,随着挖补角度的增大,胶层的失

效载荷在不断减少而结构的破坏载荷却在不断增加。 $4^{\circ}$ 时胶层的失效载荷与结构的破坏载荷相同,此时的角度即为拉伸载荷下挖补修理的最佳挖补角。通过研究,同样也可以得到压缩载荷下胶层失效和结构破坏载荷随挖补角变化的趋势(图7),并得到压缩载荷下挖补修理的最佳挖补角 $6^{\circ}$ 。与试件受到单一拉伸载荷或压缩载荷不同,一般实际修理结构使用时即会受拉伸载荷也会受压缩载荷,因此综合考虑可以得到飞机修理结构的最佳挖补角为 $6^{\circ}$ 。

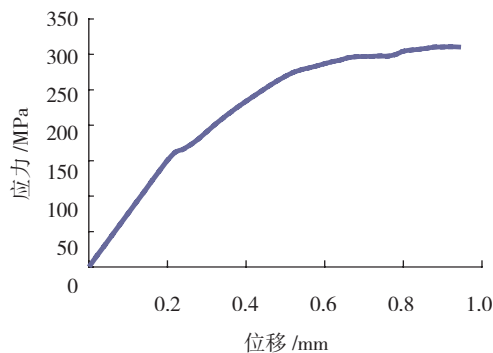


图5 挖补修理层合板位移-载荷曲线

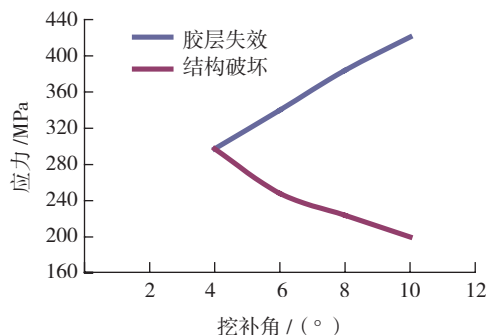


图6 拉伸载荷下胶层失效载荷和结构破坏载荷随着挖补角变化的趋势

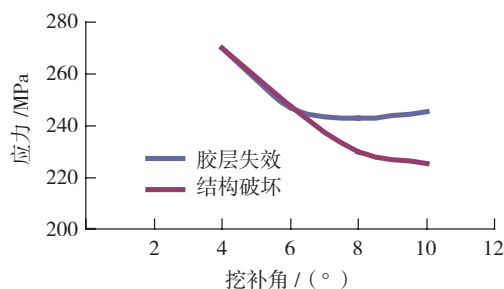


图7 压缩载荷下胶层失效和结构破坏载荷随着挖补角变化的趋势

## 目前挖补修理中亟待解决的问题

虽然复合材料挖补修理的应用和研究已经发展了30多年,但是修理还存在着很多亟待解决的问题。

(1)虽然修理后的静强度恢复率较高,但是挖补修理抗疲劳载荷能力差。这使得目前国内修理的应用范围局限在非承力结构或者应力水平很低的结构。搞清挖补修理疲劳损伤的机理,提高修理结构抗疲劳能力,准确估计修理后结构寿命是突破挖补修理应用局限性的关键。

(2)修理结构的湿热问题同样是目前限制挖补修理发展的重要因素。由于复合材料和胶粘剂的热膨胀系数不同,在固化过程中修理结构会出现不同程度的残余热应力,加上胶层中不可避免存在的孔隙,这些都使修理结构的湿热问题对修理质量,修理后强度造成严重影响。

(3)现场/战场快速修理时,胶粘剂的贮存,胶接工艺、固化条件等与工厂修理差距较大。而现有维修修理质量评估技术落后,提高快速维修的质量与维修后的质量评估是发展快速修理需要解决的重要问题。

(4)不同成分胶粘剂的力学性能差别很大。维修时不同胶接物结构不同的受载情况造成对胶粘剂的力学性能要求不同。如何选择合适的胶粘剂匹配相应的胶接物、受载情况,成为未来发展胶接技术的研究重点。

本文有参考文献6篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 三丰)