

飞机复合材料层合板胶结修理有限元分析

孙志娟¹, 戴京涛²

(1. 国家开放大学 理工教学部, 北京 100039; 2. 海军航空大学青岛校区 航空机械工程与指挥系, 山东 青岛 266041)

摘要: 将复合材料层合板补片胶结修理的方法应用到飞机受损结构的维修中, 将补片固定在损伤结构上从而恢复结构强度和传力路径。基于ANSYS Workbench有限元分析软件, 针对飞机复合材料层合板胶结修补的结构特点和使用状态进行了分析, 从而得出最优的复合材料补片的结构参数, 包括补片的直径和厚度。结果表明, 使用复合材料层合板胶结修理能够有效提高铝合金板结构的强度, 一定程度上恢复受损结构的刚度。进一步优化设计补片最佳结构, 提高了胶结修理的可操作性和经济效益。

关键词: 复合材料; 飞机维修; 胶结; 有限元分析; 结构优化

中图分类号: TB 21

文献标志码: A

文章编号: 1002-2333(2020)11-0022-03

Composite Plywood Patch-bonded Repairing for Aircraft Based on Finite Element Analysis

SUN Zhijuan¹, DAI Jingtao²

(1. Engineering College, The Open University of China, Beijing 100039, China; 2. Aero Mechanical Engineering and Command Department, Naval Aviation University Qingdao Branch, Qingdao 266041, China)

Abstract: The composite plywood patch-bonded method is used for repairing the damaged structure of the aircraft. The composite plywood patch is bonded to the damaged structure, and then the strength and force transmission path can be restored. Based on the ANSYS Workbench finite element analysis software, the structural characteristics and usage status of the composite plywood patch-bonded repairing model is analyzed, and then the optimal structural parameters of the composite patch are obtained, including the diameter and thickness. The results show that the composite plywood patch-bonded method could effectively restore the rigidity of the structure, improving the strength and load capacity of the structure. Furthermore, the engineering operability and economic benefits can also be improved by optimizing the patch structure.

Keywords: composite materials; aircraft repair; bonding; finite element analysis; structural optimization

0 引言

复合材料具有轻质、高强、耐腐蚀、抗疲劳性能好、设计自由度大等优点^[1], 因此, 复合材料修补较广泛应用于飞机结构修理中。飞机在飞行过程中, 不可避免地会受到意外冲击、鸟撞、冰雹等破坏, 采用复合材料层合板胶接修理方法对飞机结构进行修理, 具有表面处理及周围环境的要求不高、恢复强度较好等优点。

本文以飞机结构中常见的圆形穿孔形式损伤为研究对象, 采用复合材料层合板补片胶结修理的方法, 将圆形补片固定在损伤结构上, 从而恢复结构强度和传力路径^[2]。基于 ANSYS Workbench 有限元分析软件的 Mechanical Products 模块和 ACP 模块, 分析了飞机复合材料层合板胶结修补的使用状态和结构特点, 从而得出最优的复合材料补片的直径和厚度。结果表明, 采用有限元分析方法, 提高了复合材料层合板胶结修理的质量和效率, 可作为飞机复合材料层合板胶粘修理开发与设计的参考依据。

1 有限元模型的建立

1.1 修理模型

以飞机结构中常见的圆形穿孔形式损伤为研究对象, 母板和补片通过胶层粘接在一起, 建立的几何模型如图 1 所示。

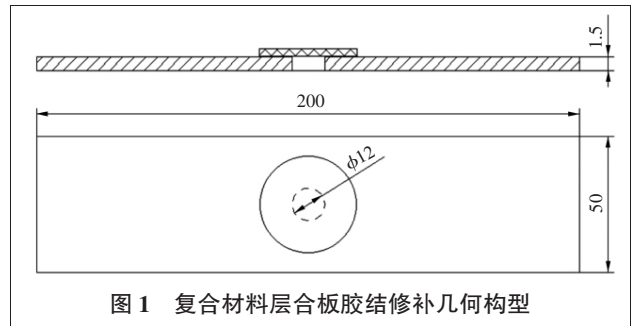


图 1 复合材料层合板胶结修补几何构型

图 1 中, 母板为铝合金板, 其外形尺寸为 200 mm×50 mm×1.5 mm, 中心损伤孔直径 $D=12$ mm, 为中心对称结构。铝合金板的边界条件为: 一边为固支, 另一边受压力载荷 $P=10$ Pa。以复合材料层合板补片的直径 d 和厚度 t 为研究变量, 来分析复合材料层合板胶结修理的可靠性。

铝合金板对应的材料为 2A12, 拉伸强度为 447 MPa, 弹性模量为 71 GPa, 泊松比为 0.33。复合材料补片采用平纹玻璃纤维/环氧树脂复合材料, 在有限元计算中, 将其假设成均匀正交各向异性的线弹性材料, 单层厚度为 0.2 mm, 铺层形式均为 $[0^{\circ}/90^{\circ}]^3$ 。胶层的厚度约为 0.1 mm。补片和胶层材料性能参数如表 1^[4] 所示。

1.2 有限元模型的建立

在 ANSYS Workbench 下构建飞机复合材料层合板胶

表1 修理所用材料的性能参数

结构	弹性模量 E/GPa	剪切模量 G/GPa	泊松比 μ
补片	$E_{11}=208.000$	$G_{12}=7.24000$	$\mu_{12}=0.1677$
	$E_{22}=25.440$	$G_{23}=4.94000$	$\mu_{23}=0.0350$
	$E_{33}=25.440$	$G_{31}=7.24000$	$\mu_{31}=0.1677$
胶层	$E=1.077$	$G_{12}=0.40489$	$\mu=0.3300$

结修补结构的分析流程。首先对结构进行三维建模,随后划分网格,然后在有限元模型上施加载荷、设置约束条件。根据结构分析中物理场的不同,Workbench Meshing平台自动规划不同的网格划分方法,而计算结果的精度会受到网格结构和网格疏密程度的直接影响^[5]。理想的情况下,用户进一步细化网格密度,求解结果不再发生明显改变,并通过合理调整收敛控制选项,使计算结果满足要求。根据复合材料层合板胶结修补模型中的各部分结构和受力等因素生成合适的有限元单元,使其具有较高的

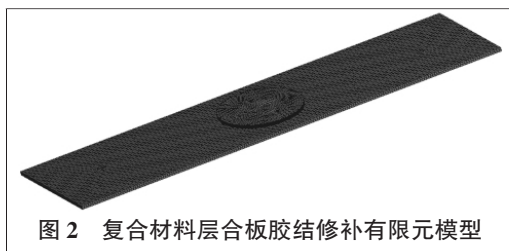


图2 复合材料层合板胶结修补有限元模型

求解精度。复合材料层合板胶结修补有限元模型如图2所示。进而,利用 ACP(Pre) 前处理模块对补片模型进行复合材料铺层的设置。对补片的每一层详细定义厚度、材料和纤维主方向的方向角等材料参数,定义的过程是从下至上逐层详细定义。最后在 ACP(Post) 后处理模块中可以查看各种分析结果,包括应力、应变和最危险的失效区域等。通过对不同补片结构的多方案分析对比,选择最优的设计方案。7层复合材料补片的复合层结构如图3所示。

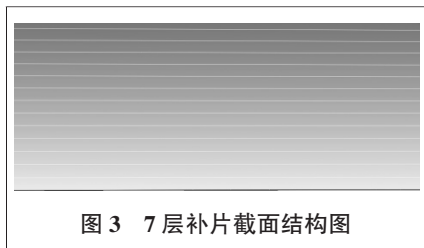


图3 7层补片截面结构图

2 修复效果的参数化计算

研究复合材料层合板胶结修补结构时,采用第四强度理论。如果结构中的任意一点达到屈服极限,那么该结构的弹性极限承载能力就是结构所承受的端面拉载荷。因此,本文引入孔边应力衰减率和相对刚度来表征结构的极限承载能力和修复后的抗变形能力,衡量修复效果^[6]。

孔边最大应力衰减率可以表征铝合金板的抗破坏能力:

$$\varphi = \frac{\sigma_{sh} - \sigma_{sr}}{\sigma_{sh}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: σ_{sr} 为修复后铝合金板孔边最大应力; σ_{sh} 为损伤铝合金板孔边最大应力。

相对刚度可以表征铝合金板的抗变形能力:

$$R = \frac{(EA)_h}{(EA)_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $(EA)_0$ 为完整铝合金板的抗拉刚度, $(EA)_0 = Ewt$, w 为铝合金板的宽度, t 为铝合金板的厚度; $(EA)_h$ 为修复

后铝合金板的折算刚度, $(EA)_h = \frac{PL}{\Delta L}$, P 为铝合金板所承受的拉力, L 为修补区域的长度, ΔL 为修补区域的伸长量。

由式(1)和式(2)可知,孔边最大应力衰减率和相对刚度计算所得的数值越大,表征复合材料层合板的修复效果越好。

3 补片结构优化设计

以直径为 12 mm 的损伤孔的铝合金板为研究对象,研究圆形复合材料层合板补片的直径 d 和厚度 t 对修复效果的影响。

3.1 补片直径优化设计

基于损伤孔的直径,选择不同补片直径,使其为损伤孔直径的倍数,研究补片直径和损伤孔直径的关系。计算所得的孔边应力衰减率

表2 补片直径对修复效果的影响

补片长度/mm	修复效果	
	应力衰减率/%	相对刚度/%
18	46.21	65.01
24	57.10	65.71
30	75.33	65.87
36	80.83	66.98
42	79.68	68.49
48	59.50	71.94

和相对刚度的数值如表2所示。图4较为直观地表示出随着补片直径的变化,孔边应力衰减率和相对刚度的变化趋势。

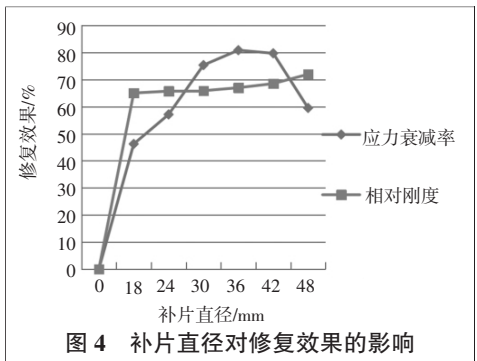


图4 补片直径对修复效果的影响

由表2和图4可知,当补片的直径为1.5倍的损伤孔直径时,复合材料层合板胶结修补结构的应力衰减率达到了46.21%,相对刚度为65.01%。由此证明,使用复合材料层合板胶结修理受损结构,能够有效地提高铝合金板结构的强度,在一定程度上恢复受损结构的刚度。

随着补片直径的增加,当补片直径达到了损伤孔直径的3倍,应力衰减率达到了80.83%,相对刚度为66.98%。随着补片直径的继续增加,虽然相对刚度的数值还在提高,但是应力衰减率数值呈下降趋势。由此可知,如果补片厚度不变,其直径并非越大越好,而是存在一个最优范围,即为损伤孔直径的3倍左右时,修复结构的应力衰减率达到极大值。因此,考虑到实际应用中的可操作性和经济效益,补片直径一般取36mm为最优。

3.2 补片厚度优化设计

基于之前对圆形复合材料补片的直径进行优化的结果,选取补片的直径为36mm,进而研究补片厚度对修复效果的影响。计算所得的孔边应力衰减率和相对刚度的数值如表3所示。图5较为直观地表示出随着补片厚度的变化,孔边应力衰减率和相对刚度的变化趋势。

由表3和图5可知,复合材料层合板胶结修补结构在进行单层贴补之后,孔边应力衰减率就达到30.98%,相对刚度也达到65.55%,由此证明,使用复合材料层合

表3 补片厚度对修复效果的影响

补片长度/mm	修复效果	
	应力衰减率/%	相对刚度/%
0.2	30.98	65.32
0.4	60.23	66.19
0.6	72.01	66.60
0.8	77.40	66.80
1.0	79.12	66.91
1.2	80.83	66.98
1.4	81.50	67.03
1.6	81.43	67.08
1.8	81.24	67.15
2.0	81.10	67.22

板胶结修理受损结构,能够有效地提高铝合金板结构的强度,一定程度上恢复受损结构的刚度。随着补片厚度的增加,当补片厚度达到 1.4 mm,应力衰减率达到 81.5%,相

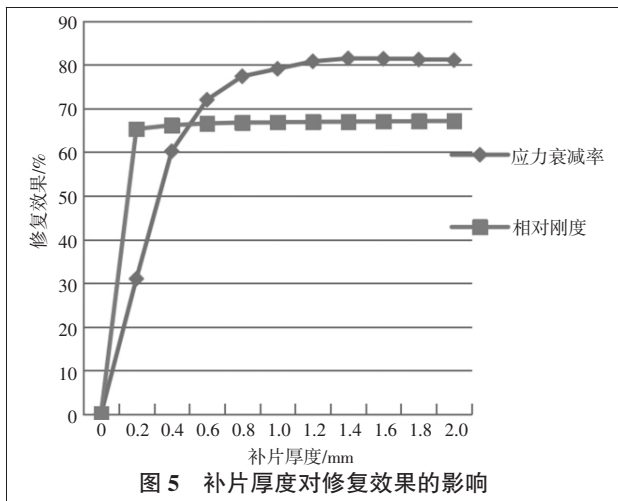


图5 补片厚度对修复效果的影响

对刚度为 67.03%。补片厚度继续增加,虽然相对刚度的数值还在提高,应力衰减率开始缓慢地下降。由于随着补片直径的增加,修补区域的局部刚度增加;随着补片厚度的增加,修补区域的刚度亦会增加,因此,补片厚度的优化会对补片直径的优化结果产生积极影响。故补片厚度的最优值为 1.4 mm。

4 计算结果分析

在 ANSYS Workbench 软件中,对飞机复合材料层合板胶结修补结构的计算结果进行相关参数提取,最主要的为变形和应力^[8],因此选择 Evaluate(Von-Mises)应力和 Total Deformation 总变形。图 6 和图 7 分别为补片直径为 36 mm、厚度为 1.4 mm 时贴补复合材料铝合金板的整体结构应力云图和位移云图。

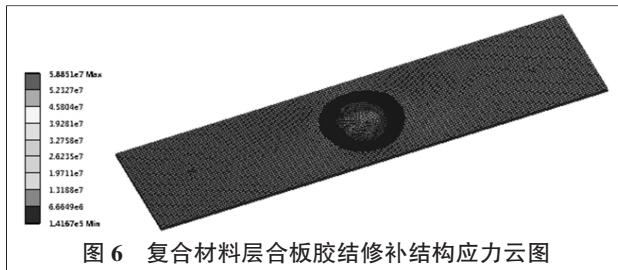


图6 复合材料层合板胶结修补结构应力云图



图7 复合材料层合板胶结修补结构位移云图

通过图 6 可以观察到铝合金板和复合材料补片的应力大小;通过图 7 可以观察到铝合金板和复合材料补片的变形,随着载荷的增加,变形增加。

5 结论

本文在 ANSYS Workbench 环境下构建了复合材料层合板胶结修补结构设计模型,面向飞机机身的铝合金板上直径为 12 mm 的损伤孔进行修补,采用复合材料层合板胶粘修补方法,将圆形补片固定在损伤结构上从而恢复结构强度和传力路径。以补片的直径和厚度为研究变量,以孔边应力衰减率和相对刚度来衡量修复效果,最终计算获取了补片的最优结构。计算结果表明,当补片的直径为损伤孔直径的 3 倍、补片的厚度为 1.4 mm 时,修补效果最佳。

使用复合材料层合板胶结修理受损结构,能够有效地提高铝合金板结构的强度,在一定程度上恢复受损结构的刚度。通过优化设计补片的最佳结构,提高了可操作性和经济效益。

[参考文献]

- [1] 杨卓懿,宋磊.基于 ANSYS ACP 的复合材料潜水器结构设计[J].玻璃钢/复合材料,2017,28(4):24-28.
- [2] 彭新未.复合材料层合板胶接修理强度研究[D].南京:南京航空航天大学,2015:5-6.
- [3] 王昌昊.复合材料层合板阶梯式挖补修理的刚度分析[J].成都航空职业技术学院学报,2014,30(2):42-43,46.
- [4] 沈观林,胡更开,刘彬.复合材料力学[M].2 版.北京:清华大学出版社,2013.
- [5] 殷咏胜,陈伟山.基于 ANSYS Workbench 大口径复合橡胶软管有限元分析[J].特种橡胶制品,2016,37(3):66-70.
- [6] 陈礼威,章向明,苏意驹.复合材料修复含孔洞钢板有限元分析[J].船海工程,2008,37(3):14-16.
- [7] 刘有艳,周昌玉.复合材料层合板胶贴补修理渐进损伤分析[J].复合材料学报,2011,28(3):197-202.
- [8] 李占营.基于 ANSYS 的复合材料有限元分析和应用[M].北京:中国水利水电出版社,2017.

(责任编辑 邵明涛)

作者简介:孙志娟(1981—),女,博士,副教授,研究方向为机械工程。
通信作者:孙志娟,19136628@qq.com。
收稿日期:2020-04-28

(上接第21页)

- [5] 王治国,刘玉文.宝钢特殊螺纹油管的设计分析[J].宝钢技术,2000(6):54-57,62.
- [6] 史彬,周晓锋.G3耐蚀合金油管特殊螺纹接头TP-G2的设计与开发[J].钢管,2019,48(5):63-67.
- [7] 张炜,杨力能,张鸿博,等.XGC1特殊螺纹接头螺纹加工刀具的选用[J].机床与液压,2013(16):37-39.

- [8] 杨晓龙,白鹤,周新义,等.特殊螺纹接头加工及常见问题解决方法[J].工具技术,2017(6):80-84.

(责任编辑 马忠臣)

作者简介:闫凯(1985—),男,硕士研究生,高级工程师,从事石油管相关研究与技术服务工作。
收稿日期:2020-05-11