

复合材料贴补工艺参数的研究及优化模拟

杨龙英 杨永忠

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司,成都 610092)

摘 要 贴补是复合材料修补中一种重要的修补方式,研究了贴补的补片直径和补片厚度对树脂基复合材料层压板弯曲强度恢复值的影响,确定了最佳的贴补工艺参数。并通过有限元分析建立了修补模型,对贴补工艺参数进行了优化。

关键词 复合材料,贴补,补片直径,补片厚度,弯曲强度,修补模型

Study on the patch bonder repair technical parameter and optical simulation of composite

Yang Longying Yang Yongzhong

(Chengdu Aircraft Industrial Group Co.,Ltd.,Chengdu 610092)

Abstract Patch bonder repair is one of the most important composite material repair methods. How the patch diameter and ply of patch bonder repair effected the bending strength of resin-based composite laminate was studied, then the optimum technical parameters of patch bonder repair were obtained. The repair simulation mold was established by finite element analysis, and the technical parameters of patch bonder repair were optimized by the repair simulation mold.

Key words composite material, patch bonder repair, patch diameter, patch ply, bending strength, repair mold

树脂基复合材料因其优越的性能在航空领域得到越来越广泛的应用。但是,一方面由于树脂基复合材料制件成型工艺特殊,制造的中间环节及影响因素众多,制件不可避免地会产生一些缺陷和损伤^[1]。另一方面在使用过程中,由于承载和环境的影响因素等,制件会产生裂纹和损伤^[2]。并且复合材料结构件是高附加值的产品,对其进行更换、再生产无疑会造成资源的巨大浪费;相对而言,对其进行修复的成本却要低得多,并且通过选择合适的修补工艺方法和修补参数,修复后的复合材料有望达到与原复合材料同等的使用性能和寿命^[3],同时还能消除环境污染的顾虑。因此复合材料修补技术成为一项影响复合材料进一步扩大应用的关键技术^[4]。

贴补作为一种快速的修理方式在复合材料修补中得到广泛应用。通过复合材料的可设计性,可以根据损伤结构的应力应变场,采用改变复合材料铺层方向设计补片性能,从而适应特殊应用的要求,最大限度提高结构的修补效果^[5]。本研究以双马来酰亚胺 QY8911 树脂和 3234 环氧树脂层压板贴补结

构试验件为研究对象,考察了补片直径和补片厚度对层压板贴补修补性能的影响,对通过有限元分析建模优化修补工艺参数。

1 实验部分

1.1 试验件的制备

试验件分别采用 T300/QY8911 和 T700/3234 两种预浸料制造,铺层角度、层数及尺寸见表 1。

表 1 修补试验件的制造参数

修补试验件	铺层角度	单层厚度/	尺寸/
		mm	mm
T300/QY8911	[0] ₁₅	0.200	220×100
T700/3234	[0/45/-45/90/0/45/-45] ₂	0.125	220×100

1.2 损伤孔的加工

试验件的损伤孔加工采用气动铰的方式单面打孔,损伤孔的直径为 20mm,深度为 1mm。

1.3 试验件的修补

试验件采用贴补工艺修补,补片选择与母板一

样的预浸料,补片与母板之间采用胶膜粘接,如图 1 所示。T300/QY8911 试验件采用 J-116B 胶膜粘接补片与母板,如图 2 所示;T700/3234 试验件采用 SY-24C 胶膜粘接补片与母板。按照试验设计进行加工,补片厚度和补片直径见表 2。

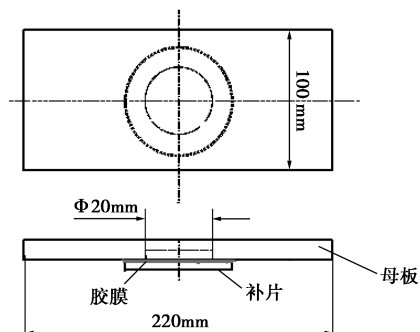


图 1 贴补试验件修补示意图

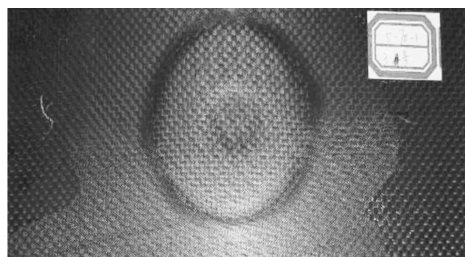


图 2 T300/QY8911 贴补试验件实物图

表 2 试验件贴补修补片厚度和补片直径

修补结构/试验件	补片厚度/层	补片直径/mm
贴补	5	40
		70
	6	40
		70
	7	50
		60
	8	50
		60

1.4 试验件的力学性能测试

对贴补试验件进行弯曲性能测试,测试的加载速度为 5mm/min, T300/QY8911 试验件测试的跨距为 220mm, T700/3234 试验件测试的跨距为 170mm。

2 结果与讨论

2.1 补片直径对修补效果的影响

T300/QY8911 试验件完好件母板强度为 604.64MPa,补片直径对 T300/QY8911 强度恢复值的影响见图 3。贴补修补试验件弯曲破坏后的实

物图片见图 4。补片直径为 70mm 试样的挠度-载荷曲线见图 5。

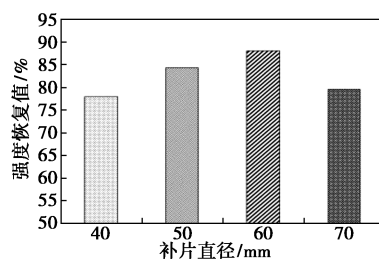


图 3 补片直径对 T300/QY8911 强度恢复值的影响

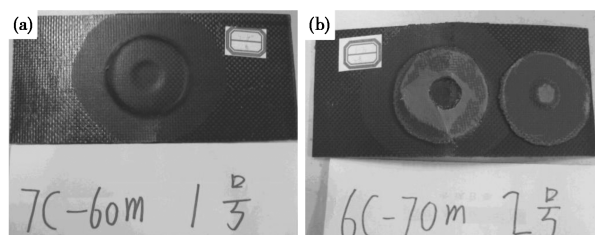


图 4 贴补修补 T300/QY8911 试验件弯曲破坏后的实物图

[(a)补片直径为 60mm;(b)补片直径为 70mm]

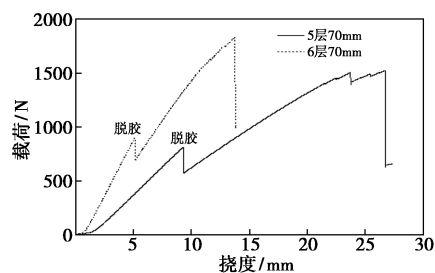


图 5 补片直径为 70mm 时 T300/QY8911 的挠度-载荷曲线图

由图可见,随着补片直径从 40mm 增大到 60mm 时,强度恢复值逐渐增大。补片直径为 60mm 时,强度恢复值达到 88.1%(弯曲强度达到 532.74MPa),弯曲试样补片没有剥落或分层。但是当补片直径为 70mm 时,强度恢复值迅速减小为 79.66%,而且在加载过程中,载荷很小时补片就开始脱胶破坏,造成修补失效,弯曲测试完后补片已经剥落。这是由于当补片直径为 40mm 时,单边搭接长度为 10mm,比较短,这时所有的胶粘剂都处于较高的剪应力状态^[6];当补片直径为 60mm 时,单边搭接长度为 20mm,比较长,则大部分的胶接区域只承受很小的载荷或不受载,载荷主要通过胶接接头搭接部分端部的两个狭小区域来传递^[7]。然而,当补片直径为 70mm 时,由于搭接面积过大,造成应力集中于补片边缘,这时胶接长度不会增加失效应力,反而降低了修复效果^[8]。所以补片直径为

60mm时,修补效果最好,母板损坏后补片仍然完好。

T300/3234 试验件完好件母板强度为 859.41MPa。补片直径对 T300/3234 强度恢复值的影响见图 6。由图可见,随着补片直径从 40mm 增大到 70mm 时,强度恢复值逐渐增大。当补片直径为 70mm 时,强度恢复值最大达到 105.84%,弯曲强度达到 909.55MPa,起到补强的效果。

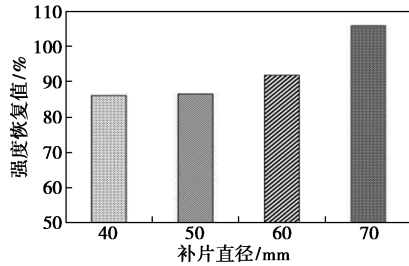


图6 补片直径对 T300/3234 强度恢复值的影响

贴补 T300/3234 的挠度-载荷曲线见图 7。图 8 为贴补修补结构试验件后的实物图片。由图可见,在相同补片厚度条件下,补片直径为 70mm 的结构试验件在补片脱胶时载荷最大,而补片直径为 40mm 的结构试验件在没有达到最大载荷时就已经脱胶,载荷迅速减小,随着实验的进行,载荷又重新增大,这时主要为母板承载^[9]。因此,当补片直径为 70mm 时,即补片直径为孔直径的 3.5 倍时,修补效果最好。

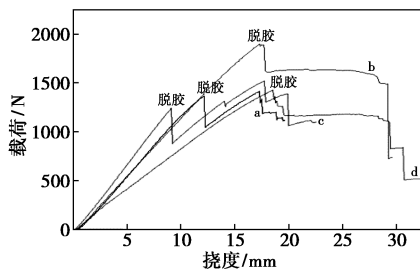


图7 贴补结构试验件的挠度-载荷曲线图
(a:补片厚度 5 层补片直径 40mm;b:补片厚度 5 层补片直径 70mm;c:补片厚度 6 层补片直径 40mm;d:补片厚度 6 层补片直径 70mm)

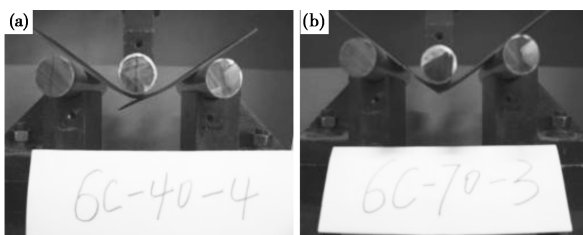


图8 贴补修补结构试验件测试实物图
[(a)补片厚度 6 层补片直径 40mm;
(b)补片厚度 6 层补片直径 70mm]

2.2 补片厚度对修补效果的影响

对于 T300/QY8911 贴补试验件,图 9 为补片厚度对其弯曲强度恢复值的影响。由图可见,当补片厚度从 1mm(5 层)增到 1.4mm(7 层)时,弯曲强度恢复值逐渐增大,补片厚度为 1.4mm(7 层)时达到 87.68%,此时弯曲强度达到 530.16MPa。而当补片厚度进一步增加到 1.6mm(8 层)时,强度恢复值又变小,但仍然大于补片厚度为 5 层和 6 层时,说明补片厚度对贴补结构试验件弯曲强度恢复值有显著影响。这是因为对于层压板贴补修补,随着补片厚度的增大,修补后板的承载能力随之增大^[10],但补片厚度增大到一定值后,它对修补弯曲强度恢复值的影响就不明显了,而且随着补片厚度的增大,胶层中的剪应力也随之增大,因此其弯曲强度恢复值减小。所以不能一味通过增加补片厚度来提高贴补修补结构的承载能力^[11]。通过以上实验确定优化的补片厚度为 1.4mm(7 层)。

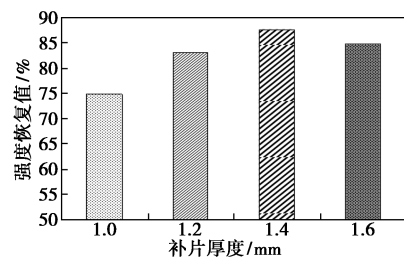


图9 补片厚度对 T300/QY8911 贴补试验件弯曲强度恢复值的影响

因此,T300/QY8911 层压板,15 层厚,损伤孔直径为 20mm,贴补优化工艺参数为:补片直径为 60mm,补片厚度为 7 层。在此工艺参数下,得到的弯曲强度恢复值最大,达到 89.96%。

补片厚度对 T300/3234 贴补试验件弯曲强度恢复值的影响见图 10。由图可见,当补片厚度从 0.625mm(5 层)增到 1.000mm(8 层)时,强度恢复值逐渐减小,当补片厚度为 0.625mm(5 层)时,弯曲强度恢复值最大,达到 97.19%,弯曲强度达到

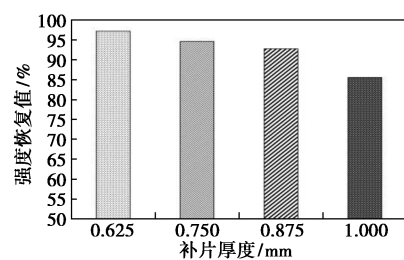


图10 补片厚度补片厚度对 T300/3234 贴补试验件弯曲强度恢复值的影响

835.20MPa,说明补片厚度对修补效果有重要的影响。对于层压板贴补修补,随着补片厚度的增大,修补后板的承载能力随之增大,但补片厚度增大到一定程度后,它对修补效果的影响就不显著了;随着补片厚度的增大,胶层中的最大剪应力也随之增大^[12]。因此,不能一味依靠增加补片厚度来提高修补结构的承载能力,故选择补片厚度为 0.625mm (5 层)。

因此,T700/3234 层压板,14 层厚,损伤孔直径为 20mm,贴补优化工艺参数为:补片直径为 70mm,补片厚度为 0.625mm (5 层)。在此工艺参数下,得到的强度恢复值最大,达到 107.64%,弯曲强度达到 925.14MPa。

2.3 利用有限元分析模型优化修补工艺参数

通过 MSC/Patran 平台二次开发建立了修补方案模型,图 11 为 T300/QY8911 层压板贴补试验件弯曲试验模拟有限元模型,模拟的变形及应力云图见图 12,对 T300/QY8911 层压板贴补试验件进行了 8 次试验,试验结果和模拟值的对比情况见图 13。

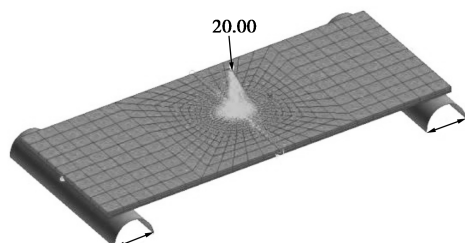


图 11 弯曲试验模拟有限元模型图

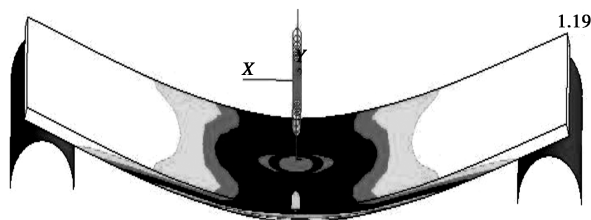


图 12 模拟变形及应力云图

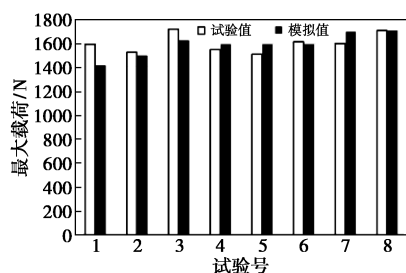


图 13 试验件贴补修补试验及模拟结果对比图

采用 Kriging 模型构建结构设计变量与极限载荷之间的近似映射关系对复合材料修补结构进行优化设计,T300/QY8911 层压板贴补结构优化后的修补工艺参数见表 3。由表 3 可见,补片直径 60.1mm,厚度 7 层,即 $0.2\text{mm} \times 7 = 1.4\text{mm}$,最大载荷为 1703N。预测值与试验值的误差为 -12.07%。

表 3 试验件贴补修补试验及模拟结果

长度:220mm 宽度:100mm 厚度:0.2×15mm					
损伤孔直径:20mm 损伤孔深:0.2×5mm					
优化对象	补片直径/mm	补片厚度/层	最大载荷(试验值)/N	最大载荷(模拟值)/N	误差/%
试验设计	40	5	1589.2	1439	9.45
	40	6	1538.6	1521	1.14
	70	5	1602.8	1702	-6.19
	70	6	1559.8	1610	-3.22
检验数据	50	7	1694.9	1607	5.19
	50	8	1584.2	1608	-1.50
	60	7	1703.1	1703	0.006
	60	8	1660.7	1608	3.17
优化结果	60.1	7	1936.8	1703	-12.07

T700/3234 层合板弯曲试验模拟有限元模型见图 14,模拟应力云图见图 15;对 T700/3234 层压板

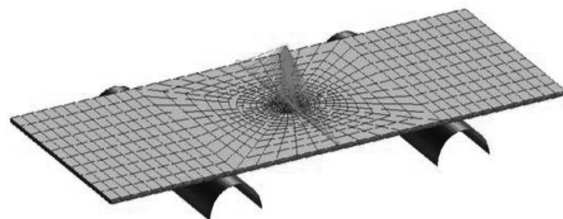


图 14 T700/3234 弯曲试验模拟有限元模型图

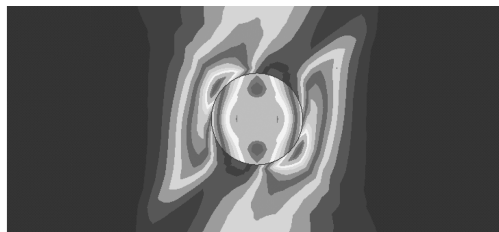


图 15 T700/3234 弯曲试验模拟应力云图

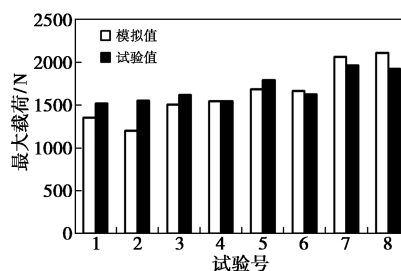


图 16 T700/3234 层合板贴补修补试验及模拟结果对比图

贴补试验件进行了8次试验,试验结果和模拟值的对比情况见图16。

T700/3234层合板贴补的优化修补参数为:补片直径78.65mm,厚度6层,即 $0.125\text{mm} \times 6 = 0.75\text{mm}$,最大载荷为2328.16N。

3 结论

(1)通过对T300/QY8911层压板贴补工艺参数对弯曲强度恢复值影响的研究,确定了最佳贴补参数。15层的T300/QY8911层压板,损伤孔直径为20mm,贴补最佳工艺参数为:补片直径为60mm,补片厚度为7层。

(2)通过对T700/3234层压板贴补工艺参数对弯曲强度恢复值影响的研究,确定了最佳贴补参数。14层的T700/3234层压板,损伤孔直径为20mm,贴补优化工艺参数为:补片直径为70mm,补片厚度为5层。

(3)通过有限元分析建立的修补方案设计模型模拟的T300/QY8911和T700/3234层压板贴补优化工艺参数与修补试验研究的结果基本一致。

参考文献

[1] 陈祥宝.复合材料结构损伤修理[M].北京:化学工业出版社,

(上接第190页)

铜纳米片均匀地分布在石墨烯表面,HRTEM图表明为硫化铜的(102)晶面。

因此,本技术不仅适用于石墨烯/硫化锌纳米片的制备,还可以推广到其他石墨烯/金属硫化物纳米片的合成中,是一种制备石墨烯/金属硫化物纳米片的通用技术。

3 结论

发展了制备石墨烯/硫化物纳米片的通用技术;以石墨烯/硫化锌纳米片为代表进行了光催化性能的研究,表明石墨烯/金属硫化物纳米片具有优异的光催化效果。

参考文献

- [1] 肖力光,庞博.硅藻土/纳米氧化锌/氧化石墨烯复合光催化材料的制备及其光催化性能研究[J].人工晶体学报,2018,47(2):441-451.
- [2] Chang K, Mei Z W, Wang T, et al. MoS₂/graphene cocatalyst for efficient photocatalytic H₂ evolution under visible light irradiation[J]. ACS Nano, 2014, 8(7): 7078-7087.
- [3] Zhang N, Zhang Y, Xu Y J, et al. Recent progress on graphene-based photocatalysts: current status and future per-

2001, 1.

- [2] 耿魁,崔旭.复合材料修理技术研究[J].沈阳航空工业学院学报,2005,22(4):43-46.
- [3] 杨龙英,罗辑.树脂基复合材料挖补修复工艺及性能研究[J].塑料工业,2015,43(7):82-85.
- [4] 梁重云,曾竟成,肖加余,等.复合材料补片胶接修补研究进展[J].宇航材料工艺,2002(4):7-11.
- [5] 乔新.波音飞机复合材料结构修理教程[M].北京:中国民航出版社,1996,38-75.
- [6] 王跃全.飞机复合材料结构修理设计渐进损伤分析[D].南京:南京航空航天大学,2010.
- [7] Aymerich F, Priolo P, Sun C T. Static and fatigue behaviour of stitched graphite/epoxy composite laminates[J]. Composites Science and Technology, 2003, 63: 907-917.
- [8] Denny J J, Mall S. Characterization of disbond effects on fatigue crack growth behavior in aluminum plate with bonded composite patch[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1997, 57(5): 507-525.
- [9] Alawi H, Saleh I E. Fatigue crack growth retardation by bonding patches[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1992, 42(5): 861-868.
- [10] Mahler M A. Bonded composite repair of composite structures [M]. Los Angeles, USA: 1999, 165-167.
- [11] 孟凡颖,陈绍杰,董善艳,等.复合材料损伤结构胶接补强修补分析及设计[J].飞机设计,2002(1):18-21.
- [12] 苗学周.基于渐进损伤理论的复合材料贴片修补结构参数分析[D].郑州:郑州大学,2015.

收稿日期:2019-10-30

spectives[J]. Nanoscale, 2012, 4: 5792-5813.

- [4] Li Q, Guo B, Yu J, et al. Highly efficient visible-light-driven photocatalytic hydrogen production of CdS-cluster-decorated graphene nanosheets[J]. J Am Chem Soc, 2011, 133: 10878-10884.
- [5] 李秀艳,刘东旭,李鑫. ZnS和ZnSe纳米片的制备及其光催化性能研究[J].吉林师范大学学报,2017,38(1):28-32.
- [6] Zeng Bin, Zeng Wujun. Ion-exchange synthesis of graphene loaded-ZnS/Bi₂S₃ nanoplates with high photocatalytic activity [J]. Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, 2016, 4: 1105-1111.
- [7] Wang Q Z, Lian J H, Li J J, et al. Highly efficient photocatalytic hydrogen production of flower-like cadmium sulfide decorated by histidine[J]. Sci Rep, 2015, 5: 13593-13602.
- [8] Khan M E, Khan M M, Cho M H. CdS-graphene nanocomposite for efficient visible-light-driven photocatalytic and photoelectrochemical applications[J]. J Colloid Interf Sci, 2016, 482(15): 221-232.
- [9] Ma Yongjin, Liu Yi, Bian Yuan, et al. Controlling shape anisotropy of hexagonal CdS for highly stable and efficient photocatalytic H₂ evolution and photoelectrochemical water splitting[J]. J Colloid Interf Sci, 2018, 518(15): 140-148.
- [10] Zeng Bin, Zeng Wujun, Liu Wangfeng, et al. Fabrication of ZnS with necklace-like hierarchical structure-decorated graphene and its photocatalytic performance[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2018, 115: 97-102.

收稿日期:2019-02-18