

固化条件对分层损伤的层合板修理后强度的影响

丁明惠^{1,2,3} 詹 帅³ 王 耕³ 武郢宇³ 金 国³ 马德权¹

(1.中航工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司,哈尔滨 150066;

2.哈尔滨工业大学,航天学院,哈尔滨 150001;

3.哈尔滨工程大学,材料科学与化学工程学院,哈尔滨 150001)

摘 要 对(45/0/0/45)、(45/0/45/0/45)和(45/0/45/0/45/0/45)3种典型铺层形式复合材料层合板内部分层损伤分别在中温和常温固化条件下进行挖补修理。并且利用 Patran/Nastran 有限元计算软件对修理后的层合板进行模拟计算。研究表明:中温修理好于常温修理,只有 4 层铺层常温挖补修理不满足要求,而 5 层和 7 层修理后压缩强度和剪切强度均达到 80% 以上。5 层铺层结构在常温挖补修理,压缩强度平均值达到 175.83MPa,是原压缩强度的 88.70%;剪切强度达到 163.90MPa,是原剪切强度的 82.90%。

关键词 层合板,挖补修理,有限元模型,剩余强度

Influence of curing condition on the residual strength of laminate repaired by delamination damage

Ding Minghui^{1,2,3} Zhan Shuai³ Wang Geng³ Wu Gaoyu³ Jin Guo³ Ma Dequan¹

(1.Avic Harbin Aircraft Industry Group Co.,Ltd.,Harbin 150066;2.School of Astronautics, Harbin Institute of Technology,Harbin 150001;3.College of Materials Science and Chemical Engineering,Harbin Engineering University,Harbin 150001)

Abstract Three typical types of laminate (45/0/0/45), (45/0/45/0/45) and (45/0/45/0/45/0/45) with delamination damages were repaired by the scarf repair under middle temperature and room temperature. The simulation of repaired laminates were done by Patran/Nastran software. The results showed that the repairing efficiency was better by using middle temperature than room temperature. It was found that compressive strength recovered less than 80% strength of undamaged strength of samples for 4 layers structures by using room temperature repair. However, the strength could recover more than 80% strength of undamaged strength of samples for 5 and 7 layers structures. The average compressive strength of samples for 5 layers structures recovered to 175.83MPa, 88.70% of the undamaged strength of the samples by using room temperature repair, the average shear strength of samples recovered to 163.90MPa, 82.90% of undamaged strength of samples.

Key words laminate, scarf repair, finite element model, residual strength

复合材料具有比刚度高、比强度大和可设计性强等优点,在飞机主承力结构上获得越来越广泛的应用^[1]。但是复合材料层板结构的抗冲击抵抗及抗冲击韧性低,在使用过程中不可避免的会受到外来物体的冲击,从而造成层板内部不可见的分层损伤,导致结构的压缩强度和剪切强度急剧降低,严重损害了复合材料结构的使用安全性^[2]。因而对受损复合材料结构的修补问题日益突出,成为当前飞机维护使用中亟待解决的重要问题。Jones 等^[3]对受损

复合材料层板的挖补修理结构做了大量的研究,特别对压缩载荷作用下的破坏载荷、破坏模式等进行了详细地探讨,指出挖补修理方法可以恢复未损伤层合板 80% 左右的强度。Found 等^[4]分析了复合材料结构修理使用的补片在承受不同载荷作用下的受载情况,对补片设计时考虑的一些参数进行了研究,得到了补片在不同载荷作用下最优的设计参数^[5-7]。

挖补结构的空问构形比较特殊,胶层厚度相对很薄且处于复杂的三维应力状态^[8],导致在有限元

计算中对胶层的处理非常关键。本研究对(45/0/0/45)、(45/0/45/0/45)和(45/0/45/0/45/0/45)3种典型铺层形式复合材料层合板的内部分层损伤制定修理方案,分别在中温和常温固化条件下对分层损伤层合板进行挖补修理,检测挖补修理效果最好的办法是让挖补位置承受压缩和剪切载荷,重点研究修理温度对压缩和剪切强度的影响规律^[9],建立新的复合材料贴补修理层合板的有限元分析模型,并验证模型的合理性。

1 实验部分

1.1 原料及方案

母板材料为环氧高温碳纤维预浸布(5224/CF3052型),北京航空材料研究院;补片材料为干碳布(G0939型,厚度0.285mm)、中温胶层(BI型),中航工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司;室温胶层(EA9396型),汉高公司;层合板[(45/0/0/45)、(45/0/45/0/45)、(45/0/45/0/45/0/45)],单层板厚度0.285mm,压缩试样尺寸为200mm×150mm,剪切试样尺寸为230mm×230mm,修理方法选用挖补法补片为3层,铺层角度为(45/45/0)],中航工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司。挖补修理示意图见图1。

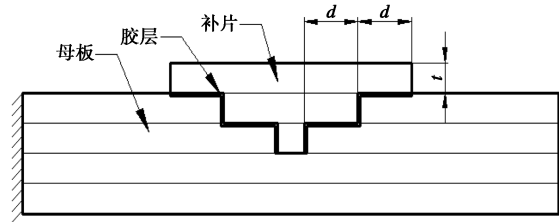


图1 挖补修理示意图

1.2 样品测试

采用液压伺服疲劳试验机(MTS Landmark 370型,美特斯工业系统有限公司)对样品进行测试,初始设置极限载荷均为100kN,按照2%加载,设定初始载荷为0kN,初始位移为0mm,记录破坏载荷值。

1.3 修理后强度计算

使用Patran/Nastran软件建立试验件的面单元有限元模型,有限元模型的几何尺寸、材料和铺层与试验件一致,每一层按照单层的实际材料属性和铺层方向赋予单元的材料属性。根据Tsai-Wu失效准则和最大应力准则^[10],对修理后强度进行计算。

2 结果与讨论

2.1 压缩强度分析

对预制分层试验件采用中温和常温挖补修理。在压缩载荷的作用下,修理后的试验件破坏形式见图2。从图2(a)、图2(b)和图2(c)可以看出,中温修理后的试验件在压缩载荷破坏的过程中补片与母板表现出一体性,断裂结果呈现二者共同破坏形式,并在破坏断口上可以观察到明显的分层现象;而在图2(d)、图2(e)和图2(f)中,常温修理后的试验件在压缩载荷的作用下断裂,呈现出修补补片与母板的不协调性,母板与补片脱离,母板断裂而补片未损坏,这是由于补片之间的胶粘剂在压缩载荷作用下失效所致。

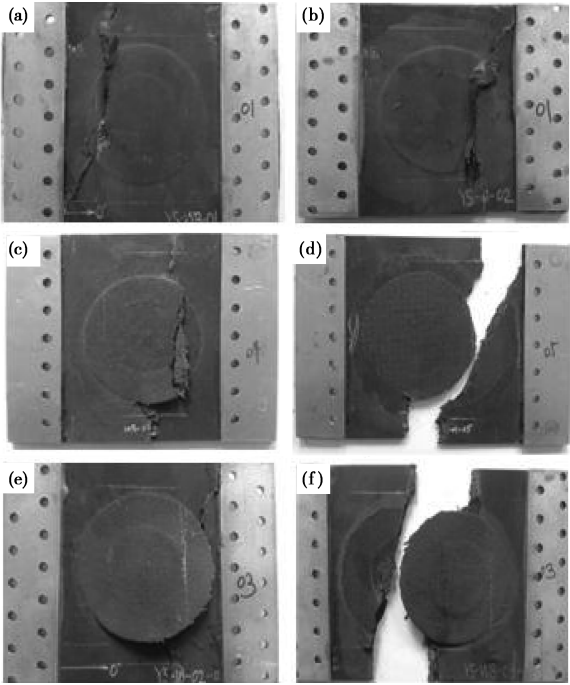


图2 挖补修理试验件破坏示意图

[中温挖补修理:(a)4层,(b)5层,(c)7层;
常温挖补修理:(d)4层,(e)5层,(f)7层]

中温、常温修理试验件压缩强度试验结果见表1。从表1可知,分层损伤中温修理后的压缩强度的可靠性可以得到保证;而常温修理,只有4层铺层结构不能满足原压缩强度的80%,仅为原压缩强度的78.95%,5层铺层结构和7层铺层结构均可以满足修理后的强度要求,5层铺层结构在常温挖补修理,压缩强度平均值达到175.83MPa,是原压缩强度的88.70%。中温修理好于常温修理,随着铺层厚度的增加,修理后压缩强度逐渐变好。

表 1 中温、常温修理试验件压缩强度试验结果

试验类别	层合板	压缩强度	达到原压缩
	层数/层	平均值/MPa	强度/%
完好结构	4	183.56	—
	5	198.23	—
	7	275.10	—
中温挖补修理结构	4	172.44	93.94
	5	192.39	97.05
	7	258.97	94.14
常温挖补修理结构	4	144.92	78.95
	5	175.83	88.70
	7	256.37	93.19

挖补修理压缩强度有限元失效云图见图 3。从图可以看出,中温挖补修理后在单向压缩载荷作用下,应力集中区主要集中在补片边缘位置和中心纵向位置,从 3 种铺层计算的结果可以看出,补片边缘位置和中心纵向位置是承受载荷最大的位置,即破坏时最薄弱位置,而补片与母板是通过胶连接的,补片边缘与母板连接的位置是传递载荷阶差最大的过渡区,故当补片边缘失效时,可以认定补片整体失效,修理结构整体被破坏。常温挖补修理与中温挖补修理结果类似,在单向压缩载荷作用下,修理后最薄弱的位置仍然是补片边缘与母板连接位置,当补片边缘失效后,整体修理结构失效,最终,靠近挖补中心位置会产生应力集中,补片整体失效。

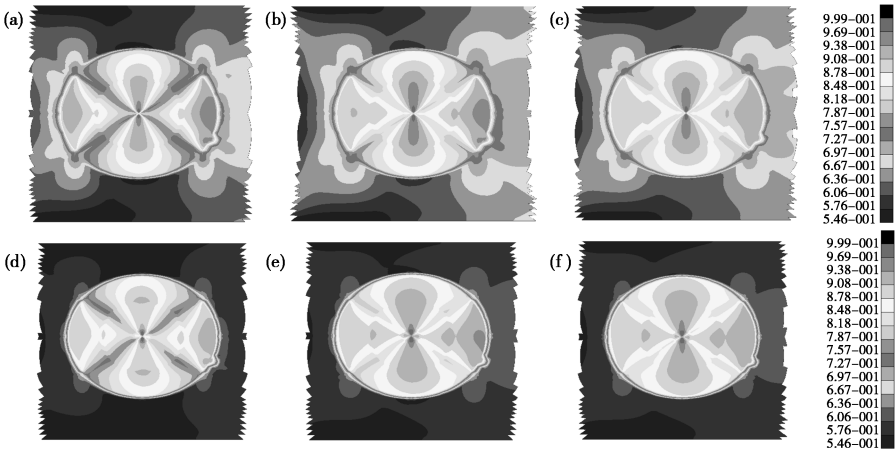


图 3 挖补修理压缩强度有限元失效云图

[中温挖补修理:(a)4 层,(b)5 层,(c)7 层;常温挖补修理:(d)4 层,(e)5 层,(f)7 层]

中温、常温修理试验件压缩强度有限元计算结果见表 2。从表 2 可以看出,4 层层合板的铺层结构只有采用中温修理的方法,材料的参数才能达到原强度的 80% 以上,满足强度使用要求,而 5 层铺层结构和 7 层铺层结构在采用中温修理和常温修理均能满足修理后的强度使用要求,这与试验结果吻合。

表 2 中温、常温修理试验件压缩强度有限元计算结果

试验类别	层合板	压缩强度	达到原压缩
	层数/层	平均值/MPa	强度/%
完好结构	4	292.11	—
	5	243.64	—
	7	264.90	—
中温挖补修理结构	4	233.66	80.02
	5	210.60	86.44
	7	236.80	89.39
常温挖补修理结构	4	178.70	61.18
	5	206.53	84.77
	7	233.19	88.03

2.2 剪切强度分析

分层损伤层合板经过挖补修理后进行剪切强度试验,在斜拉载荷的作用下,试验件发生屈曲行为,继续施加载荷,屈曲及后屈曲行为失稳,试验件结构被破坏,见图 4。从图可以看出,中温挖补修理后,在剪切破坏载荷的作用下发生补片脱胶的现象,而与母板同时发生断裂;而分层损伤试验件经过常温修理后,在剪切破坏载荷的作用下,补片与母板虽然同时损坏,但在断裂处,可以明显看到补片与母板之间发生了脱粘现象,并且补片有从母板脱落的倾向。

中温、常温修理试验件剪切强度试验结果见表 3。从表 3 可知,中温和常温挖补修理均可以满足修理要求,5 层铺层试验件修补后剪切强度高于 4 层和 7 层铺层,5 层铺层试验件修补后剪切强度达到 163.90MPa,是原剪切强度的 82.90%。5 层铺层剪切强度高于 4 层铺层,这是由于在 4 层铺层中补片铺层厚度与预置分层母板的残余厚度接近,在

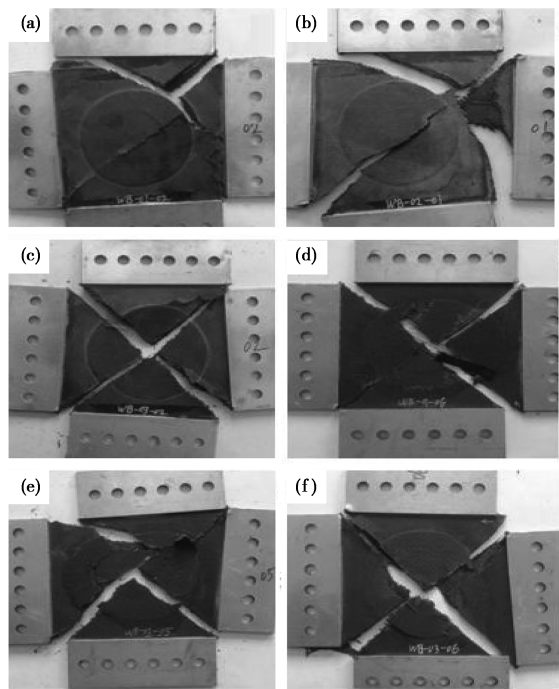


图 4 挖补修理试验件破坏示意图
[中温挖补修理:(a)4 层,(b)5 层,(c)7 层;
常温挖补修理:(d)4 层,(e)5 层,(f)7 层]

承受剪切斜拉载荷下,分层部位与补片同时受载,母板在相对于补片很小的破坏载荷作用下就会失效,同时胶层承受剪切载荷作用,当母板断裂后,胶层承受全部剪切载荷,胶层会在剪切载荷作用下开裂,对 4 层铺层来说剩余强度的高低主要取决于损伤后残留母板的强度。而 7 层铺层修补后剪切强度低于 5 层铺层,这是由于随着试验件厚度的增加,使得试验件母板的刚度增大,而在施加剪切载荷的过程中,试验

表 3 中温、常温修理试验件剪切强度试验结果

试验类别	层合板	剪切强度	
	层数/层	平均值/MPa	达到原剪切强度/%
完好结构	4	203.81	—
	5	197.70	—
	7	176.63	—
中温挖补修理结构	4	172.63	84.70
	5	168.47	85.21
	7	145.87	82.59
常温挖补修理结构	4	163.53	80.24
	5	163.90	82.90
	7	143.53	81.26

件发生屈曲行为,母板刚度较小的试验件屈曲效果较为明显,不易发生破坏,而母板刚度较大的试验件不易发生屈曲现象,但屈曲失稳可能性较大,故在试验件无法承受屈曲变形时发生破坏。

挖补修理剪切强度有限元失效云图见图 5。从图可以看出,中温挖补修理时[见图 5(a)、图 5(b)、图 5(c)],在斜拉载荷作用下,应力主要集中在补片边缘位置,从 3 种铺层的失效结果可以看出,补片边缘位置所承受的载荷较大,而补片中心位置随着铺层厚度的增加逐渐将所承受的应力分散开来,当补片边缘或者补片中心部位超过所能承载的最大载荷时,补片失效,修理结构被破坏;常温挖补修理后[见图 5(c)、图 5(d)、图 5(f)]的失效指数云图与中温挖补修理的结果类似,在斜拉载荷作用下,当补片边缘或补片中心位置失效后,整体修理结构失效,修理结构损坏。

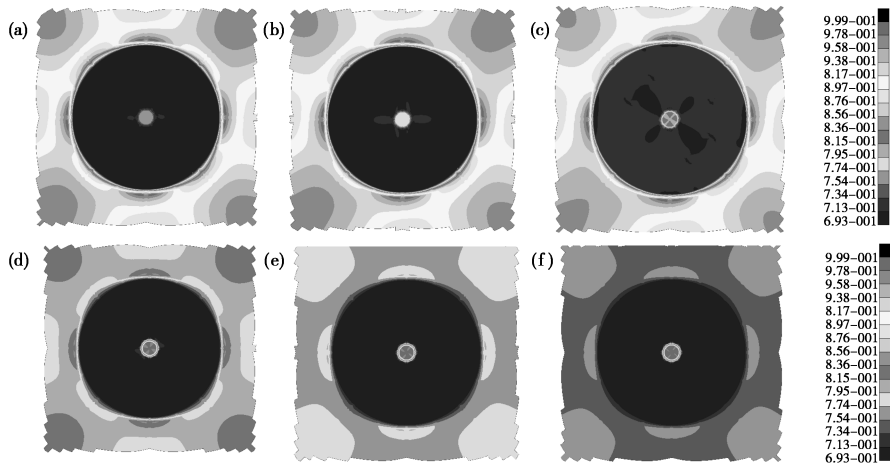


图 5 挖补修理剪切强度有限元失效云图
[中温挖补修理:(a)4 层,(b)5 层,(c)7 层;常温挖补修理:(d)4 层,(e)5 层,(f)7 层]

中温、常温修理试验件剪切强度有限元计算结果见表 4。从表 4 可知,中温和常温挖补修理的计

算结果均能达到母板强度的 80%以上,满足强度要求,4 层铺层结构和 5 层铺层结构的中温和常温修理后,剪切强度相差较大,而 7 层铺层结构经过两种挖补修理方法后的剪切强度差别较小,这是由于 4 层和 5 层铺层结构厚度与挖补胶接补片厚度相差不大,补片和母板在承受剪切载荷时都要承受很大的应力,而 7 层铺层结构修理后,补片厚度与母板厚度相差较大,在承受剪切载荷作用时,挖补区域下方的母板是主要的承力结构,剪切强度主要取决于此。

表 4 中温、常温修理试验件剪切强度有限元计算结果

试验类别	层合板	剪切强度	达到原剪切
	层数/层	平均值/MPa	强度/%
完好结构	4	183.23	—
	5	180.86	—
	7	187.82	—
中温挖补修理结构	4	169.84	92.69
	5	170.78	94.43
	7	159.72	85.04
常温挖补修理结构	4	149.46	81.57
	5	147.67	81.65
	7	153.58	81.77

3 结论

以分层损伤的层合板为研究对象,采用常温和中温挖补对层合板进行修理,建立了有限元模型预测修理后的压缩和剪切强度,研究结果表明:对预制内部分层损伤制定的中温和常温挖补修理方案基本满足原强度的 80%,只有 4 层铺层常温挖补修理不

满足要求;5 层铺层结构在常温挖补修理,压缩强度平均达到 175.83MPa,是原压缩强度的 88.70%。剪切强度平均达到 163.90MPa,是原剪切强度的 82.90%。

参考文献

[1] 陈绍杰.复合材料结构修理指南[M].北京:航空工业出版社,2001,10-15.

[2] 薛克兴.复合材料结构的损伤与修补[M].北京:航空工业出版社,1992,20-25.

[3] Jones J S,Graves S R.Repair techniques for Celion/LARC-160 graphite/polyimide composite structures[J].NASA CR,1984,3794:6-7.

[4] Found M S,Friend M J.Evaluation of CFRP panels with scarf repair patches[J].Composite Structures,1995,32(1):115-122.

[5] 孟凡颖,陈绍杰,童小燕.层压板修理设计中的参数选择问题[J].复合材料学报,2001,18(4):123-127.

[6] Barut A,Hanauka J,Madenci E.Analysis method for bonded patch repair of a skin with a cutout[J].Composite Structures,2002,55:277-294.

[7] Engels H,Becker W.Closed-form analysis for external patch repairs of laminates[J].Composite Structures,2002,56:259-268.

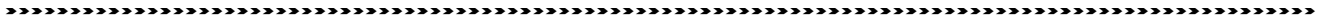
[8] 崔元庆.复合材料损伤结构胶接补强修补分析及设计技术[D].西安:西北工业大学力学与土木建筑学院,1999.

[9] Soutis C,Hu F Z.Failure analysis of scarf-patch-repaired carbon fiber/epoxy laminates under compression[J].AIAA Journal,1998,38(4):737-740.

[10] 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):18-22.

收稿日期:2016-10-08

修稿日期:2017-10-29



(上接第 152 页)

(2)环氧基硅烷改性煤样后,改性煤样中氧的含量显著增大,改性剂分子与煤样表面发生了相互作用,有效改善了煤的表面性能,使其亲油性增加,改善了改性无烟煤和丁苯橡胶的相容性。

(3)添加改性煤粉后,橡胶复合材料的各项力学性能较纯丁苯橡胶都有显著的提高,巯基硅烷改性煤填充橡胶的补强效果最为明显,其拉伸强度和断裂伸长率分别比纯丁苯橡胶提高了 348%和 94%。

参考文献

[1] 张玉德.煤基功能性填料的研究进展[J].化工新型材料,2013,41(7):3-5.

[2] 卢建军.煤基高分子复合材料研究现状及发展趋势[J].化工进展,2003,22(12):1265-1268.

[3] 陈清如.中国洁净煤战略思考[J].黑龙江科技学院学报,2004,14(5):261-264.

[4] 王健.晋城超纯无烟煤制备高比表面积活性炭的试验研究[D].西安:西安科技大学,2011.

[5] T H.XRD analysis of carbon stacking structure in coal during heat treatment[J].Fuel,2004,83(17):2427-2433.

[6] 周剑林.低阶煤含氧官能团的赋存状态及其脱除研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2014.

[7] 杨志远.超细煤粉体的光催化氧化反应性及动力学研究[D].西安:西安科技大学,2006.

[8] 向军.煤燃烧过程中碳、氧官能团演化行为[J].化工学报,2006,57(9):2180-2184.

收稿日期:2016-09-21