

含中心裂纹铝合金板复合材料 单面胶接修复后的疲劳特性

杨孚标¹ 肖加余¹ 黄学兵² 保健² 曾竟成¹

(1 国防科技大学航天与材料工程学院,长沙 410073)

(2 中国人民解放军 95214部队,长沙 410115)

文 摘 采用碳纤维复合材料对中心裂纹铝合金板进行了单面胶接修复,测试了修复结构的疲劳性能,包括铝合金板的裂纹扩展速率、补片与铝合金板之间的界面脱粘和修复结构的疲劳剩余强度。结果表明:复合材料胶接修复能有效地降低铝合金板的裂纹扩展速率,提高其疲劳寿命;胶接的补片使铝合金板的疲劳裂纹扩展纹线线型发生变化,且线型变化集中在裂纹扩展初始阶段;疲劳导致修复结构出现界面脱粘,脱粘区域近似椭圆形,且界面脱粘面积随疲劳周次的增加而增加。

关键词 复合材料,界面脱粘,疲劳寿命

Fatigue Characteristics of Center-Cracked Aluminum Plate One-Side-Bonded Repaired With Composite

Yang Fubiao¹ Xiao Jiayu¹ Huang Xuebing² Bao Jian² Zeng Jingcheng¹

(1 College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

(2 The Army 95214 of PLA, Changsha 410115)

Abstract The center-cracked aluminum alloys plates were one-sided bonded by carbon fiber/epoxy composite materials by vacuum-bagging procedure. The tension-tension fatigue characteristics of the bonded plate, including the crack propagation rate, the debond between the plate and the composite materials interface and the fatigue residual strength were measured. It is shown that when the center-cracked plates are bonded with composite patches, The crack propagation rate of the aluminum plate is slow down while the fatigue life of the bonded plate is prolonged. An elliptical debond area between the composite patches and cracked plate is found during the tension-tension fatigue testing. The debond area increases with the fatigue cyclic number and the magnitude of the increase is related with the fatigue cyclic number.

Key words Composite material, Interface debond, Fatigue life

1 前言

复合材料胶接修复是指将已固化的、半固化的或者未固化的复合材料预浸料补片,用胶接的方法贴补到构件的损伤区,进行局部补强,以达到延长结构使用寿命的一种有效方法。与传统的机械修理方法相比,复合材料胶接修复具有结构增重小,抗疲劳性能和耐腐蚀性能好,修理时间、成本低等优点,是一种优质、高效、低成本的结构修理方法^[1-2]。

国外对复合材料胶接修复技术高度重视,其研究成果广泛应用于航空和国民经济领域,如机翼蒙皮、机翼壁板、腹鳍蒙皮、起落架轮毂和舱门框等飞机损伤构件的胶接修复^[3-4]。我国也对该技术进行了较

深入研究,并已应用于飞机复合材料雷达罩、铝合金水平尾翼和机翼前梁的修复^[5-9],同时利用该方法对混凝土结构进行了加固与维修^[10]。

胶接修复结构的疲劳特性研究是补片胶接修复技术研究的重点和难点^[11]。本文采用碳纤维复合材料对中心裂纹铝合金板进行了胶接修复,测试和分析了复合材料胶接修复板的疲劳特性,包括疲劳过程中的裂纹扩展、界面脱粘以及结构的疲劳剩余强度。

2 实验

2.1 原材料

所用 LY12CZ铝合金厚度为 2 mm,其基本力学性能为: $E = 65.4 \text{ GPa}$, $\sigma_2 = 322 \text{ MPa}$, $\sigma_b = 443 \text{ MPa}$, $\delta =$

收稿日期:2007-04-16;修回日期:2007-07-18

基金项目:武器装备预研基金资助(51489040105KG0101)

作者简介:杨孚标,1967出生,博士,主要从事聚合物基复合材料成型与修复方面的研究工作

21.7%。胶黏剂为黑龙江石油化学研究院提供的双组份聚氨酯改性的环氧胶黏剂,其主要性能为: $E = 72.79 \text{ MPa}$, $\sigma_b = 65.54 \text{ MPa}$, $\sigma_s = 10.96 \text{ MPa}$ 。修复用补片为碳纤维/环氧复合材料,其主要性能为: $E = 108 \text{ MPa}$, $\sigma_b = 1224 \text{ MPa}$ 。真空袋膜、吸胶材料等市购。

2.2 试样制备

主要包括铝合金板中心裂纹的预制、补片的制备和复合材料胶接修复等过程。

在尺寸为 $280 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm}$ 的 LY12CZ 铝合金板的几何中心钻一 2 mm 的孔,然后用钨丝对称切割出一条长为 10 mm 、宽为 0.20 mm 的缺口,最后用 PLG-100C 高频疲劳试验机在上述铝合金板上预制疲劳裂纹。含预制切口的铝合金板在 $\sigma_{\max} = 100 \text{ MPa}$, $R = 0.1$ 的试验条件下经过 10^4 周次的疲劳试验后便可得到长度为 12.5 mm 的疲劳裂纹。对胶接修补区域进行必要的表面处理即得到待修复的含中心裂纹的铝合金板。

胶接修复所用的补片采用模压成型工艺制备。首先采用湿法缠绕工艺、利用滚筒排布机制备碳纤维/环氧无纬布预浸料,晾干待用;然后根据补片的铺层和厚度要求模压制备复合材料,最后根据补片的尺寸要求裁剪复合材料。对补片粘接表面进行打磨处理,即可得到胶接修复用补片。

采用真空袋压工艺对含中心裂纹的铝合金板(以下统称铝板)进行胶接修复。首先在补片和铝板的粘接表面均匀涂覆胶黏剂,静置片刻后将补片胶接到铝板上;然后用胶带将补片与铝板固定,防止固化过程中补片与铝板之间发生相互滑动;最后将粘接板放入真空袋中,经过加热、加压、固化、脱模和修整等过程,便可得到含中心裂纹的铝合金复合材料修复板,然后进行性能测试。补片袋压修复铝板的固化制度如图 1 所示。

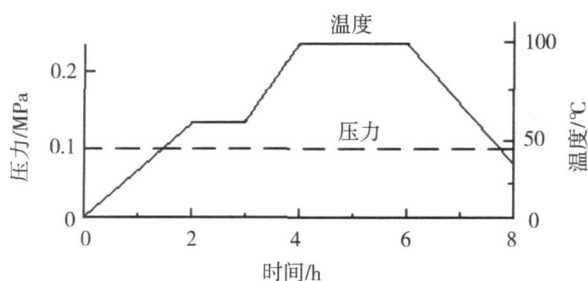


图 1 铝板的复合材料修复固化制度

Fig 1 Curing process of center-cracked aluminum plate bonded with composite materials

2.3 性能测试

试样的静态破坏强度按照 GB 1447—83 在微机控制的 WDW-100 万能试验机上进行,逐步加载直至试件断裂,加载速率为 2 mm/min 。

按照 GB 3075—82 测试试样的疲劳性能。测试宇航材料工艺 2008 年 第 1 期

在 PLG-100C 高频疲劳试验机上进行,试验时的最大应力水平根据实验要求确定,载荷比 $R = 0.1$,正弦波加载,记录试样的裂纹长度和疲劳寿命。

采用染色技术观察和测试补片和铝板之间的界面脱粘。首先配制一定浓度的 $\text{AuCl}_3 / \text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ 溶液,然后用注射器将该溶液注射到经过一定疲劳周次的铝合金修复板的裂纹里,使其透过裂纹向脱粘处扩展,待溶液完全挥发后重复注射几次;最后利用万能试验机将试样拉断,记录试样的破坏强度;收集铝板的破坏断口并测试铝板的疲劳裂纹长度;将补片从铝合金修补板上完整剥离,然后将剥离的补片在温度为 280°C 马沸炉中烘烤 10 min ,由于 AuCl_3 受热分解,通过补片的表面颜色变化表征补片与铝板之间的疲劳脱粘情况。

3 结果与讨论

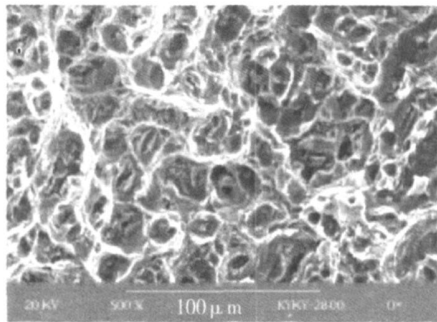
3.1 复合材料修复铝板的疲劳裂纹扩展

铝板在静态载荷和疲劳载荷作用下的裂纹扩展模式不同,其破坏断口的微观形貌存在较大的差别,如图 2 所示。疲劳断裂面由于发生挤压作用,其破坏断口表面光滑,而静态破坏断口表面粗糙,因而宏观上可以将两种破坏断口区分开来。

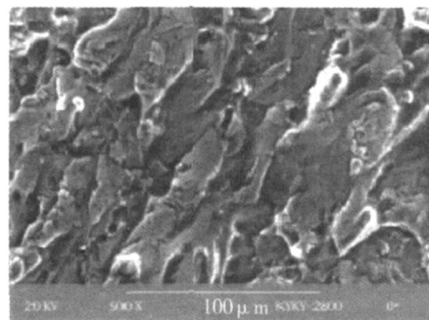
将铝合金修复板经过一定疲劳周次的疲劳试验后停止试验,然后将试样从疲劳试验机上取下并在万能试验机拉断,分析试样的断口形貌便可跟踪修复结构的疲劳裂纹扩展过程。

铝板在拉—拉疲劳载荷作用下的疲劳裂纹扩展是自相似扩展,裂纹扩展纹线基本上为一直线;而铝板经过补片胶接修补后,补片的存在可以有效地降低铝板的裂纹尖端应力集中因子及其变化幅值,因而可以有效降低胶接修补结构的裂纹扩展速率,提高结构的疲劳寿命;补片的存在同时也改变了胶接修复结构的疲劳裂纹扩展纹线。单面胶接修复结构中,由于补片对铝板在厚度方向上的应力强度因子及其变化幅值的影响不一样,因而铝板厚度方向上的裂纹扩展速率降低程度也不同,其疲劳裂纹扩展纹线发生变化,由直线变成了斜线,如图 3 为复合材料单面胶接修复铝板在不同周次疲劳载荷作用下的疲劳裂纹纹线扩展情况。在疲劳载荷作用下,由于补片的架桥作用,导致与补片接触的一面的裂纹扩展速率较小,因此裂纹长度较短;而未胶接一面的裂纹扩展速率较大,因而裂纹长度较长。

将含中心裂纹铝合金沿厚度方向上分成 6 等分,分别测试不同疲劳周次作用下修复结构中铝板厚度方向上各等分点 [如图 4(a) 的 A、B……G 等] 的疲劳裂纹长度,测试结果如图 4(b) 所示;然后经过求导即可得到修复结构中铝板厚度方向上各等分点的疲劳裂纹扩展速率,如图 5 所示。



(a) 疲劳断口



(b) 拉伸断口

图 2 铝板破坏断口 SEM 照片

Fig 2 SEM photos of fracture surface of cracked aluminum plate

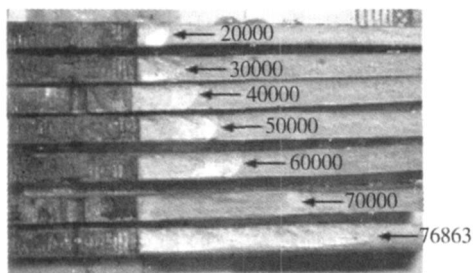
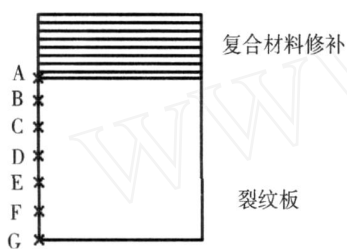
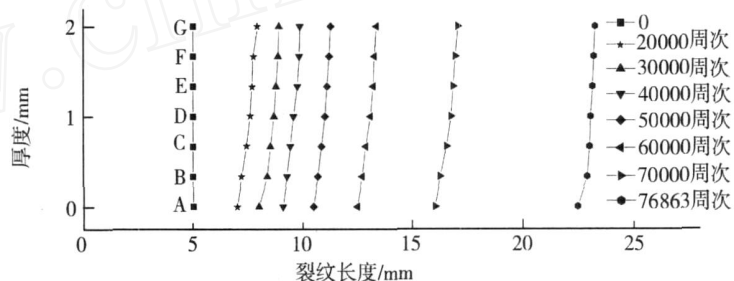


图 3 含中心裂纹铝合金复合材料
修复后的疲劳裂纹扩展情况

Fig 3 Photos of fracture surface of cracked plates bonded with composite materials



(a) 修补板各等分点示意图



(b) 各等分点裂纹长度疲劳周次

图 4 修复结构中铝板厚度方向上的疲劳裂纹长度

Fig 4 Fatigue crack length of cracked aluminum plates bonded with composite materials after fatigue

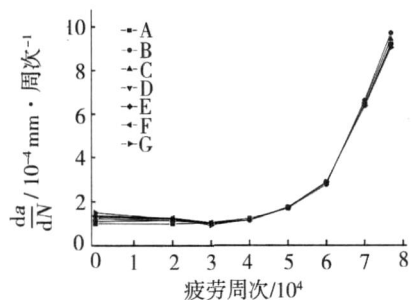


图 5 修复结构中铝板厚度方向上的
疲劳裂纹扩展速率

Fig 5 Crack propagation rate of cracked aluminum plates bonded with composite materials after fatigue

修复结构中铝板的疲劳裂纹扩展速率不同导致其疲劳裂纹扩展纹线的改变,且线型变化主要在疲劳

从图 5 可知,胶接的补片可以有效降低修复结构中铝板的疲劳裂纹扩展速率,且疲劳裂纹扩展速率的降低程度在不同的疲劳试验期不同。疲劳实验初期,修复结构中铝板未修复面裂纹率先扩展,裂纹扩展速率较大;修复面裂纹扩展速率较小,裂纹缓慢扩展;如疲劳初期,与补片贴近的 A 点裂纹扩展速率为 1.02×10^{-4} mm/周, G 点的裂纹扩展速率为 1.50×10^{-4} mm/周, G 点的裂纹扩展速率高于 A 点的裂纹扩展速率;疲劳试验中后期,铝板上各等分点的疲劳裂纹扩展速率基本相同,裂纹相似扩展,如疲劳周次为 6×10^4 时, A 点和 G 点的疲劳裂纹扩展速率分别为 2.86×10^{-4} mm/周和 2.90×10^{-4} mm/周。

实验初期,在中后期,由于各点的裂纹扩展速率基本相同,裂纹扩展纹线型基本保持不变。

3.2 补片与基板之间的界面脱粘

由于 $AuCl_3/CH_3CH_2OH$ 溶液具有较好的渗透性,能够透过铝板的裂纹而充分进入修复结构的界面脱粘部分; $AuCl_3$ 受热分解,从而使浸润到该溶液的补片的表面颜色发生变化,这样就可以对补片上颜色发生变化的部位和面积测试和分析两种之间的界面脱粘部位和面积。

从热处理后的补片的颜色变化可知,单面胶接修复的铝板在疲劳载荷作用下,补片与铝板之间会出现界面脱粘,且脱粘以裂纹为中心,沿裂纹方向对称,形状近似椭圆形,其长轴沿裂纹方向^[12-15];界面脱粘面积随疲劳周次的增加而增加,增加幅度与疲劳周次密

切相关。疲劳周次较小时,脱粘面积随疲劳周次的增加而缓慢增加,疲劳周次较高时,其脱粘面积随疲劳周次的增加而快速增长,如图 6 所示。

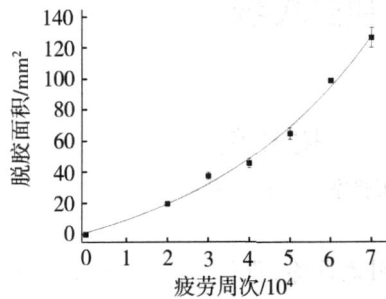


图 6 修复结构中补片与铝板之间的界面脱粘面积

Fig 6 Debond area between cracked aluminum plate and composite materials after fatigue

3.3 疲劳剩余强度

修复结构中的补片主要通过胶层剪切传递作用承担结构的部分载荷,从而降低了修复结构中裂纹尖端的应力强度因子,结构的抗疲劳性能提高^[1~2,10]。修复结构在疲劳载荷作用下的主要失效模式为裂纹扩展、补片与铝板之间界面脱粘、补片性能的降低等,所有这些因素都会导致修复结构的疲劳剩余强度降低。修复结构的剩余强度是修复结构中各组成部分的抗疲劳性能综合作用的结果。

疲劳载荷作用下,修复结构中铝板的裂纹长度随疲劳周次的增加而变长,本体的承载能力降低;同时补片与铝板之间的粘接界面脱粘面积也随疲劳周次的增加而变大,从而导致铝板承担的载荷不能有效地传递到补片上,补片承载效率降低;疲劳还会导致补片性能降低。疲劳周次较低时,铝板上裂纹长度、铝板和补片之间界面脱粘面积随疲劳周次的增加而缓慢增加,修复结构的剩余强度缓慢降低;当疲劳周次达到一定程度后,板的裂纹快速扩展,脱粘面积急剧增加,修复结构的剩余强度急剧降低。

复合材料胶接修复铝板在不同周次疲劳作用下的破坏强度,即结构的疲劳剩余强度,结果如图 7 所示。

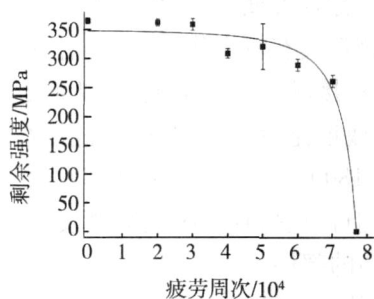


图 7 铝合金胶接修复结构的疲劳剩余强度

Fig 7 Residual tensile strength of cracked aluminum plates bonded with composite materials

结果表明,试样尺寸为 280 mm × 60 mm × 2.0 mm 的铝板,其中心裂纹长度为 12.5 mm,其原始破坏

强度和疲劳寿命分别为 311.48 MPa 和 32 217 周次,采用补片单面胶接修复,其破坏强度和疲劳寿命分别提高到 364.74 MPa 和 76 863 次。

4 结论

(1) 补片单面胶接修复能有效提高铝板的破坏强度和疲劳寿命。尺寸为 280 mm × 60 mm × 2.0 mm、裂纹长度为 12.5 mm 的铝板经过 80 mm × 60 mm × 1.32 mm 的碳/环氧补片单面胶接修复后,其破坏强度和疲劳寿命分别从 311.48 MPa 和 32 217 周次提高到 364.74 MPa 和 76 863 次。

(2) 胶接的补片使铝板的疲劳裂纹速率降低,导致其疲劳裂纹扩展纹线线型发生变化,且纹线线型变化主要发生在疲劳实验的初始阶段。

(3) 疲劳引起修复结构出现粘接界面脱粘,且脱粘以裂纹为中心,形状近似椭圆形,其脱粘面积随疲劳周次的增加而增加,增加幅度与疲劳周次密切相关。

参考文献

- 1 陈绍杰. 复合材料结构修理指南. 北京: 航空工业出版社, 2001
- 2 Baker A A. Bonded repair of aircraft structure. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1988
- 3 Michael L O. Carbon composite repairs of helicopter metallic primary structure. Composite Structures, 1993; 25: 557 ~ 565
- 4 Baker A. Bonded composite repair of fatigue-cracked primary aircraft structure. Composite Structures, 1999; 47: 431 ~ 443
- 5 徐建新. 复合材料补片胶接修理技术的研究进展. 航空学报, 1999; (4): 381 ~ 383
- 6 梁重云, 曾竟成, 肖加余等. 复合材料补片胶接修复研究进展. 宇航材料工艺, 2002; 32 (4): 7 ~ 11
- 7 王清远, 袁祥明, 李戌中. 损伤金属结构件复合材料粘贴修复. 玻璃钢/复合材料, 2003; (6): 41 ~ 44
- 8 董谷生, 孙良新, 刘英卫. 飞机结构损伤的复合材料胶接修复技术研究进展. 宇航材料工艺, 2002; 32 (5): 20 ~ 22
- 9 张延民, 常青, 张付友. 先进复合材料在飞机主承力件修理中的应用. 航空制造技术, 2004; (7): 89 ~ 90
- 10 叶见曙, 安琳, 钱培舒. 碳纤维增强复合材料加固桥梁新技术. 中国公路, 2002; 22: 45 ~ 46
- 11 杨孚标. 复合材料修复含中心裂纹铝合金板的静态与疲劳特性研究. 长沙: 国防科技大学博士论文, 2006
- 12 孙洪涛, 刘元镛. 改进的金属裂纹板复合材料胶接修复的有限元模型. 西北工业大学学报, 2000; (3): 446 ~ 451
- 13 Schubbe J J, Mall S. Characterization of disbond effects on fatigue crack growth behavior in aluminum plate with bonded composite patch. Engineering Fracture Mechanics, 1997; (5): 507 ~ 525
- 14 Seo D C, Lee J J. Fatigue crack growth behavior of cracked aluminum plate repaired with composite patch. Composite Structure, 2002; 57: 323 ~ 330
- 15 Wang Q Y, Pidaparti R M. Static characteristics and fatigue behavior of composite repaired aluminum plates. Composite Structures, 2002; 56: 151 ~ 155

(编辑 李洪泉)