

复合材料补片胶接补强铝合金板残余热应力研究*

王 遵, 曾竟成, 肖加余, 江大志, 杨孚标, 文思维

(国防科学技术大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 复合材料补片胶接技术是一种有效修复飞机受损铝合金构件的低成本方法。补片与铝合金材料热膨胀系数的显著差异, 会在构件中引入残余热应力, 对构件性能造成不利影响。文中采用单向碳/环氧复合材料补片对航空铝合金 LY12CZ 薄板进行单面补强, 并通过确定应力释放温度测量了铝板及补片上的残余热应变。结果表明, 对完好铝板而言, 铝板和补片的残余热应变可分别达到 $-488\ \mu\epsilon$ 和 $285\ \mu\epsilon$; 对于含中心裂纹铝板而言, 裂纹长度对于残余热应变的影响较小。采用经典层合板理论和双金属片模型分别预测了复合材料补片及铝合金板在胶接面上的残余热应力。经典层合板理论对补片和完好铝板残余热应力的预测值分别为 $-79.8\ \text{MPa}$ 和 $50.8\ \text{MPa}$; 双金属片模型的计算值偏大, 分别为 $-98.4\ \text{MPa}$ 和 $64.6\ \text{MPa}$ 。

关键词: 残余热应力/应变; 复合材料补片; 铝合金; 胶接修复; 层合板理论; 双金属片模型

中图分类号: V267

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2006)05⁺-0215-04

Thermal Residual Stresses in Bonded Composite Repair of Aluminum Substrates

WANG Zun, ZENG Jing-cheng, XIAO Jia-yu, JIANG Da-zhi, YANG Fu-biao, WEN Si-wei

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

Abstract: Bonded repair technology has been proven an efficient and cost-effective means of repairing cracks, especially in aircraft aluminum structures. The significant difference in coefficients of thermal expansion between the composite patch and the aluminum will introduce thermal residual stresses in the structures, which may cause adverse effects on the mechanical properties. Unidirectional carbon/epoxy patches were used to repair the aerospace aluminum thin plates, LY12CZ, using single-sided patching technology. The stress free temperature was determined to measure the thermal residual strains in the patch and the substrate. The results show that the thermal residual strains in the aluminum and the patch are $-488\ \mu\epsilon$ and $285\ \mu\epsilon$, respectively, for the perfect aluminum substrate, and that crack length has slight effects on the thermal residual strains for the cracked aluminum substrate. Classical lamination theory and bimetallic strip model were used to predict the thermal residual stresses in the bonded surfaces. The thermal residual stresses in the patch and the aluminum, calculated by classical lamination theory, are $-79.8\ \text{MPa}$ and $50.8\ \text{MPa}$, respectively. Larger stresses are predicted by bimetallic strip model to be $-98.4\ \text{MPa}$ and $64.6\ \text{MPa}$, respectively.

Key words: thermal residual stress/strain; composite patch; aluminum; adhesively bonded repair; lamination theory; bimetallic strip model

0 引 言

20世纪70年代初, 澳大利亚航空与海运研究室 (Aeronautical and Maritime Research Laboratory)^[1]首次使用复合材料补片胶接修复金属飞机构件, 并获

得巨大成功。与传统的机械螺接、铆接修复相比, 复合材料补片具有轻质高强、不对构件再破坏、不产生新的应力集中源等优点。至今超过万例的实践证明^[2,3], 复合材料胶接修复技术是一种可靠、高效、低成本的飞机结构修复技术。

一般来说, 为保证足够的力学性能和热稳定性, 修复用胶粘剂的固化温度要高于常温。当被修复金属构件在常温下工作时, 复合材料补片与金属

收稿日期: 2006-08-01

修回日期: 2006-09-10

基金项目: * 武器装备预研基金项目(编号略)。

作者简介: 王遵(1980-), 男(汉), 山东济宁人, 博士研究生。

严重的热失配会引入残余热应力。作用在构件中的残余热应力会对构件的力学性能(包括静态和疲劳性能)产生不利影响。文中采用复合材料单面修复技术分别对完好和含中心裂纹铝合金板进行补强,并测量了补片及铝板表面的残余热应变,最后分别采用经典层合板理论和双金属片模型预测了复合材料补片及铝合金板在胶接面上的残余热应力。

1 实验部分

1.1 原材料

航空铝合金 LY12CZ 在军机上应用广泛,故本文选择该铝合金为待补强的金属基板,其尺寸为 280 mm×60 mm×1.76 mm。在铝合金板中心沿宽度方向线切割出长度 $2a=10$ mm 的裂纹,然后将其置

于平均载荷为 40 MPa、应力比为 0.1 的疲劳载荷下,制得长度为 16 mm 的预裂纹。补片采用预固化的 T300/CYD-128 复合材料单向板(铺层方式为 $[0]_4$),其尺寸为 80 mm×60 mm×1.35 mm。胶粘剂为力学性能优良的聚酰胺改性的环氧类胶粘剂,黑龙江石油化学研究院生产。

1.2 试样的制备

复合材料补片单面补强铝合金板试件通过真空袋压技术制备,该技术是一种方便、快捷、有效的修复手段,为保证良好的修复效果,修复时的真空度要保证在 0.095 MPa 左右。修复板中残余热应变采用应变片(型号 BHF350-2AA-23,黄岩测试仪器厂生产)进行测量,其具体位置见图 1。

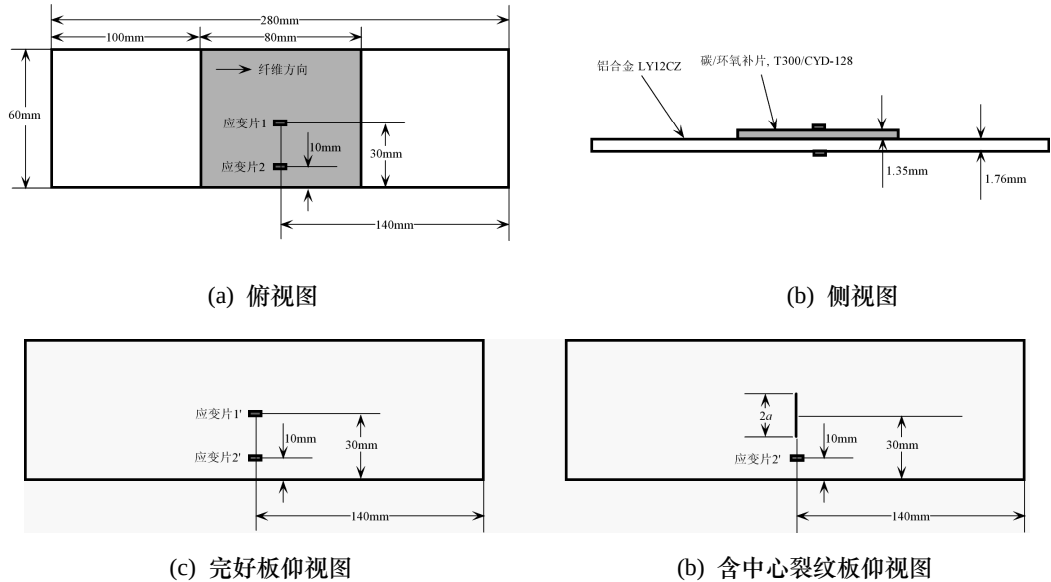


图 1 试件应变片位置示意图

Fig.1 Strain gauge locations on the specimen

文中制备了如表 1 所示的 4 个单面修复试件。其中,试件 1 用于测量应力释放温度及完好板的曲率半径,试件 2~4 用于测量残余热应变。

1.3 修复板挠度的测量

将试件 1 置于平的厚钢板上,用数码相机拍照,然后通过图像处理软件确定修复板中心位置的挠度。

1.4 应力释放温度的确定及残余热应变的测量

应力释放温度是修复板中残余热应力消除的

温度^[4]。将试样 1 置于厚钢板上,并从常温匀速升温(5 °C/6 min),记录不同温度下修复板的中心位移。最大位移所对应的温度即应力释放温度,此时试样的挠度为零。

为消除应变片与补片或铝板之间残余应力的影响,本文采用全桥接线法测量试件 2~4 的残余热应变。应变片与应变仪之间用高温导线连接,然后将试件与补偿片同置于烘箱中,从 25 °C 匀速升温(5 °C/6 min),同时采用 LC1009 静态应变仪(朗斯测试技术有限公司生产)进行连续采样。试件达到应力释放温

度时，应变仪的采样即为应变片所对应位置的残余热应变。

表 1 残余热应变测量试件

Table 1 Specimens to measure thermal residual strains

试件	补片	铝板	应变片数
1	T300/CYD-128,[0] ₄	完好板,无裂纹	0
2	T300/CYD-128,[0] ₄	完好板,无裂纹	4
3	T300/CYD-128,[0] ₄	含中心预裂纹, 2a=10mm	3
4	T300/CYD-128,[0] ₄	含中心预裂纹, 2a=16mm	3

2 结果与讨论

2.1 修复板的曲率半径

通过试验测量，得到试件 1 中心位置的挠度为 2.87 mm。假设修复板的修复区域为一圆弧，则其曲率半径可以通过图 2 所示的模型进行计算。

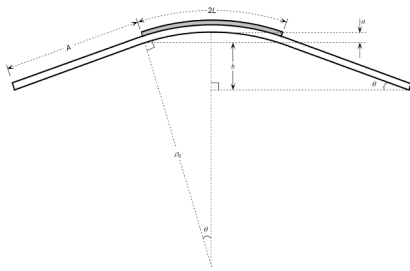


图 2 修复板曲率半径计算模型

Fig.2 Model to calculate the radius of curvature

试件 1 中心位置的挠度 h 为：

$$h = a + b \tag{1}$$

式中， a 和 b 分别为修复区域和铝板未修复部分所产生的挠度，可表示为：

$$a = \rho_c (1 - \cos \theta) \tag{2}$$

$$b = A \sin \theta \tag{3}$$

$$\theta = L / \rho_c \tag{4}$$

式中， ρ_c 为曲率半径， $2L$ 、 $2A$ 和 2θ 分别为补片长度、未修复区域总长及圆弧的弧度。容易得到，试件 1 的曲率半径为 1 672 mm。

2.2 应力释放温度及残余热应变

试验测得经 100 °C 固化 3 h 后试件的应力释放温度为 95.9 °C。在此基础上，进一步测得试件 2~4 的残余热应变(表 2)。

表 2 试件的残余热应变

Table 2 Thermal residual strains in the specimens

试件	残余热应变/ $\mu\epsilon$			
编号	应变片 1	应变片 2	应变片 1'	应变片 2'
2	285	223	-488	-530
3	240	212	/	-559
4	256	267	/	-574

可以看出，预制裂纹对补片及铝板中的残余热应变影响均较小。补片上应变片 1 和 2 处的残余应变相近，这与经典层合板理论吻合，其差异可能是由于复合材料性能的高离散性、制备工艺及胶粘剂的粘弹行为造成的。铝板沿裂纹方向上应变片 2' 处的残余热应变随着裂纹长度的增加而略有增大。

2.3 修复区域的残余热应力

下面分别采用经典层合板理论和双金属片模型对完好板补强区域的残余热应力进行的预测。

铝板及复合材料补片的基本性能如下：

金属板：铝合金板 LY12CZ，杨氏模量 $E_5=72.2$ GPa，泊松比 $\nu_5=0.33$ ，厚度 $T_5=1.76$ mm，热膨胀系数 $\alpha_5=21.2 \times 10^{-6}$ °C⁻¹。

补片：T300/CYD-128，纵向杨氏模量 $E_1=151$ GPa，横向杨氏模量 $E_2=9.5$ GPa，纵向泊松比 $\nu_1=0.32$ ，厚度 $T_p=1.35$ mm，热膨胀系数 $\alpha_p=-0.6 \times 10^{-6}$ °C⁻¹。

首先，通过经典层合板理论^[5]进行分析。单层层合板中，应力-应变关系可表示为：

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1-\nu_1\nu_2} & \frac{\nu_2 E_1}{1-\nu_1\nu_2} & 0 \\ \frac{\nu_1 E_2}{1-\nu_1\nu_2} & \frac{E_2}{1-\nu_1\nu_2} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \tag{5}$$

式中， ν_2 为横向泊松比，可表示为：

$$\nu_2 = \frac{\nu_1 E_2}{E_1} \tag{6}$$

某一层的残余热应变 ε^R 为：

$$\varepsilon^R = \varepsilon^0 - z\kappa \quad (7)$$

式中, ε^0 为补片上表面的残余热应变, z 为该层到补片上表面的距离, κ 为曲率半径:

$$\kappa = \frac{1}{\rho_c} \quad (8)$$

对于铝板而言, $E_1 = E_2 = E_s$, $\nu_1 = \nu_2 = \nu_s$ 。计算得到补片及铝板胶接面上的残余热应力分别为 -79.8 MPa 和 50.8 MPa。

下面通过双金属片模型^[6]计算残余热应力。假设胶粘剂为刚性, 补片与铝板变形协调, 胶层厚度可以忽略。在修复区域取一小区域, 补片和铝板均受到如图 3 所示力和弯矩的作用。

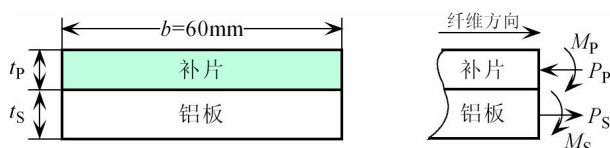


图 3 双金属片模型

Fig.3 Bimetallic strip model

由于纤维方向的外力为零, 故有:

$$P_p = P_s = P \quad (9)$$

由力矩平衡, 可得:

$$\frac{P}{2}(t_p + t_s) = M_p + M_s = E_1 I_p + E_s I_s \quad (10)$$

式中, I_p 及 I_s 为惯性矩, 可分别表示为:

$$I_p = \frac{1}{12} b t_p^3 \quad (11)$$

$$I_s = \frac{1}{12} b t_s^3 \quad (12)$$

在纤维方向, 补片和铝板应具有相同的应变。该应变由热膨胀、弯矩 M 和力 P 三部分共同贡献, 可以得到:

$$\alpha_p \Delta T - \frac{P}{b t_p E_p} - \frac{t_p \kappa}{2} = \alpha_s \Delta T + \frac{P}{b t_s E_s} + \frac{t_s \kappa}{2} \quad (13)$$

式中, ΔT 为应力释放温度与常温之差, 即 70.9 °C。

铝板与补片表面的残余热应力分别为:

$$\sigma_s = \frac{P}{b t_s} + \frac{t_s E_s \kappa}{2} \quad (14)$$

$$\sigma_p = \frac{P}{b t_p} + \frac{t_p E_p \kappa}{2} \quad (15)$$

联立式 9~15, 可以求出补片与铝板胶接面的残余热应力, 分别为 -98.4 MPa 和 64.6 MPa。与经典层合板理论相比, 双金属片模型推导结果偏大, 主要因为该模型未考虑胶层的粘弹态行为。

3 结 论

复合材料补片胶接修复可在金属构件中引入残余热应力。文中制备了碳/环氧补片单面补强铝合金板(包括完好板和含中心裂纹板)的修复试件, 建立了胶接修复残余热应变测量装置, 并对试件中的残余热应变进行了测量。试验结果发现, 预制裂纹对补片及铝板中的残余热应变影响均较小, 铝板上残余应变随着裂纹长度的增加而略增。还通过经典层合板理论和双金属片模型对完好铝板及补片胶接面上的残余热应变进行预测, 结果表明, 双金属片模型由于未考虑胶层的粘弹行为, 其计算值偏大。

参考文献:

- [1] Baker A A, Jones R. Bonded repair of aircraft structures [M]. Netherlands: Martinus Nijhoff, 1988.1-18.
- [2] Baker A A, Rose L R F, Walker K F. Repair substantiation for a bonded composite repair to F-111 lower wing skin [J]. Applied Composite Materials, 1999,6:251-267.
- [3] Jones R, Molent L. Application of constitutive modeling and advanced repair technology to F-111C aircraft [J]. Composite Structures, 2004,66:145~157.
- [4] Findik F, Unal H. Development of thermal residual strains in a single sided composite patch [J]. Composites:Part B, 2001,32:379-383.
- [5] 王兴业, 唐羽章. 复合材料力学性能 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1988.222-229.
- [6] Timoshenko S. Strength of materials [M]. Berkshire: D. Van Nostrand Company, 1958.217~221.

作者地址: 湖南省长沙市 410073
国防科技大学航天与材料工程学院 502 教研室
Tel: (0731)4576315 Fax: (0731)4573181
E-mail: zwang@nudt.edu.cn

