

腐蚀环境下复合材料修补件力学特性研究¹⁾

王浩伟^{*,†} 刘元海^{*,2)} 刘成臣[†]

^{*}(北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100191)

[†](中航工业特种飞行器研究所腐蚀防护与控制研究中心, 湖北荆门 448035)

摘要 采用复合材料补片胶接修补含裂纹 LY12CZ 铝合金板, 开展了试验室大气环境和加速预腐蚀环境下复合材料修补件静强度拉伸和疲劳裂纹扩展对比试验研究. 结果表明, 复合材料补片均能显著提高损伤结构的拉伸强度和疲劳寿命, 且短周期的预腐蚀环境对修补件两种力学特性的影响可以忽略不计. 同时, 基于 Paris 公式和 Rose 分析模型, 建立了常规环境和预腐蚀环境下疲劳裂纹扩展寿命预测模型, 通过与试验结果的对比证明了该模型的工程有效性.

关键词 复合材料, 胶接修补, 静强度, 疲劳, 裂纹扩展

中图分类号: O346 文献标识码: A 文章编号: 1000-0879(2012)01-075-06

MECHANICAL BEHAVIOR OF COMPOSITE REPAIRED COMPONENTS UNDER CORROSION ENVIRONMENT¹⁾

WANG Haowei^{*,†} LIU Yuanhai^{*,2)} LIU Chengchen[†]

^{*}(School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

[†](Corrosion Prevention and Control Research Center, AVIC Special Vehicle Research Institute, Hubei Jingmen 448035, China)

Abstract The center cracked LY12CZ aluminum alloy plates were adhesively bonded with composite patches, and the tensile strength, the fatigue life and the crack growth during fatigue under air environment and accelerated pre-corrosion environment were investigated experimentally. The experimental results show that both the static strength and the fatigue life of the repaired aluminum substrates are significantly increased for the bonded composite patches, and the short-term pre-corrosion environment does not have a notable effect on the mechanical performance of composite repaired components. Also, a simple fatigue crack growth life prediction model, based on Paris formula and Rose's analytical solution, is proposed to predict the fatigue behavior of the repaired plates under air and pre-corrosion environments. The result shows a good quantitative agreement with experimental data.

Key words composite, bonded repair, static strength, fatigue, crack progress

复合材料胶接损伤金属结构件是一种可靠的低成本高效益结构补强延寿方法. 与传统的机械修补方法相比, 具有结构增重小, 无应力集中引入, 修补工艺简单, 成本低、增强抗疲劳和抗腐蚀性能等优点, 是一种优质、高效、低成本的结构修补方法, 引起了广泛关注^[1-5].

飞机服役过程中, 部分结构 (尤其是蒙皮结构)

长期暴露在外部环境中, 加之载荷的作用不可避免出现腐蚀、裂纹等损伤而需修复. 静强度和疲劳裂纹扩展行为是复合材料胶接修补增强延寿中最为重要的两大性能指标. 本文采用带中心裂纹的 LY12CZ 铝合金板模拟飞机的损伤结构, 并用复合材料补片进行单、双面胶接修补, 开展载荷和环境对金属-复合材料修补板的静强度和疲劳特性试验研究及分析

2011-07-01 收到第 1 稿, 2011-09-14 收到修改稿.

1) “十一五” 国防科技预研重点资助项目.

2) 刘元海, 男, 1981 年生, 硕士生, 工程师, 主要从事飞机结构腐蚀防护与控制技术、腐蚀损伤修理技术研究.

E-mail: liuyuanhai100@163.com

预测, 寻求腐蚀环境下胶接修补结构的静强度和裂纹扩展规律, 用于指导安全维修设计。

1 材料与试件

1.1 金属裂纹板

试验所用的裂纹板基材为 LY12CZ 铝合金板 (厚度 $\delta=2.8\pm 0.2\text{ mm}$)。将 $260\text{ mm}\times 70\text{ mm}$ 的长方形板加工成哑铃形试样, 其工作段尺寸为 $90\text{ mm}\times 60\text{ mm}$, 板中心钻直径为 $\Phi 1\text{ mm}$ 的孔; 在孔的两侧沿垂直试验件长纤维方向切割出长度 $2a=20\text{ mm}$, 宽度为 0.2 mm 的缺口作为预制裂纹。中心裂纹板试样形状及尺寸如图 1 所示。

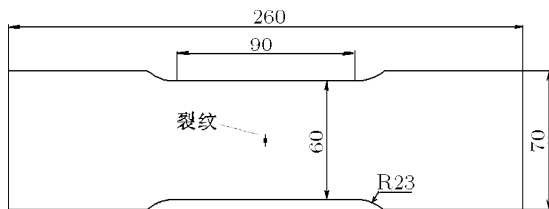


图 1 LY12CZ 金属裂纹板

1.2 复合材料修补件

采用 T300/E51 碳 / 环氧树脂复合材料补片对金属裂纹板进行修补, 补片铺层方向 / 角度固定为 $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]$ (0° 铺层角纤维方向平行于载荷方向或垂直于裂纹方向), 厚度为 1.2 mm 。胶粘剂采用 J-150 中低温固化高强度修补胶。为获得优异的界面粘接效果, 试验中, 首先对金属裂纹板进行丙酮清洗, 然后采用磷酸阳极化工艺实施表面预处理。裂纹板在阳极化处理后 24 h 内进行采用复合材料热补仪进行胶接修补。

2 预腐蚀与力学特性试验

2.1 实验室加速环境谱

综合考虑复合材料腐蚀 / 老化的主要影响因素, 本项试验采用由湿热暴露、紫外照射、酸性盐雾 3 大谱块构成 (见图 2) 的加速试验环境谱对试件进行预腐蚀。

2.2 试验设备

腐蚀环境试验设备依次选用 H1200C 温湿交变试验箱、UR2600 紫外老化试验箱和 DCTC 1200 P 盐雾腐蚀试验箱。

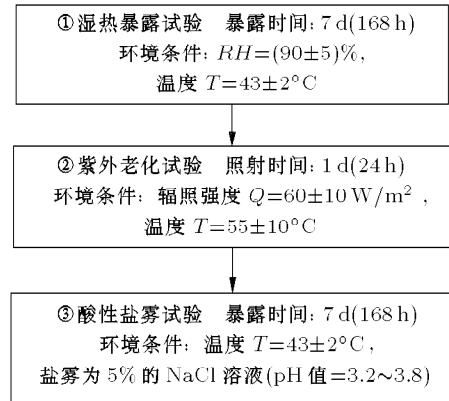


图 2 预腐蚀试验环境谱

静力拉伸和疲劳裂纹扩展试验均在 Landmark 250 kN 液压伺服疲劳试验机上进行。静载误差不超过示值的 $\pm 0.5\%$, 动载荷误差不超过示值的 $\pm 1\%$ 。

2.3 试验程序与要求

预腐蚀试验按谱块的先后顺序完成 1 周期的腐蚀环境试验。腐蚀完成后将试件清洗干净并放置在干燥器中保存。

静力拉伸试验参照 GB/T 1447-2005 和 GB/T 228-2002 进行, 轴向拉伸速率设定为 2 mm/min , 试件断裂为试验终止判据。

疲劳试验参照 GB/T 6398-2000 《金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法》进行, 轴向最大载荷为 $P_{\max}=25.5\text{ kN}$, 应力比为 0.1, 正弦波加载, 加载频率 $f=10\text{ Hz}$ 。试验过程中, 通过染色法观察疲劳裂纹的萌生与扩展, 并记录相关数据。

3 试验结果与分析

3.1 强度性能

表 1 给出了无裂纹基材板、未修补金属裂纹板及各种复合材料修补裂纹板的拉伸性能。

由表中结果可知, 1 周期的预腐蚀环境对金属-复合材料修补件破坏强度影响不显著, 同为单面修补件 ($60\times 60\times 1.2$), 未经预腐蚀和经预腐蚀处理后, 静强度分别为 61.8 kN 和 61.9 kN 。经 1 周期的预腐蚀处理后, 双面修补对提高裂纹板的静强度效果最显著, 修补后铝合金试件承载能力的恢复率为 94.5% ; 在单面修补的情况下, 随补片长度的增加 ($20\text{ mm}\rightarrow 30\text{ mm}\rightarrow 40\text{ mm}\rightarrow 60\text{ mm}$), 强度性能逐渐提高。可见, T300/E51 复合材料补片长度控制在 60 mm 以上或采用双面复合材料补片胶接修补能有效地提高中心裂纹损伤铝合金板的承载能力, 提高其拉伸强度。

表 1 拉伸性能对比试验数据

试件名称 (数量)	补片设计	试验环境	平均拉伸 强度 /kN	较未修补裂纹 板增幅/%	承载能力保留率/ %	破坏形式
无裂纹基材板 (5 件)	/	未预腐蚀	71.4	—	—	/
未修补裂纹板 (5 件)	/	未预腐蚀	42.7	—	59.8	金属板断裂
单面修补件 (5 件)	尺寸:(60×60×1.2) 铺层:[0/45/-45/90] ₂	未预腐蚀	61.8	44.7	86.6	金属板断裂
单面修补件 (4 件)	尺寸:(60×60×1.2) 铺层:[0/45/-45/90] ₂	预腐蚀	61.9	44.7	86.7	金属板断裂
单面修补件 (5 件)	尺寸:(40×60×1.2) 铺层:[0/45/-45/90] ₂	预腐蚀	53.4	25.1	74.8	金属板断裂
单面修补件 (5 件)	尺寸:(30×60×1.2) 铺层:[0/45/-45/90] ₂	预腐蚀	54.3	27.2	76.1	金属板断裂
单面修补件 (5 件)	尺寸:(20×60×1.2) 铺层:[0/45/-45/90] ₂	预腐蚀	52.8	23.7	73.9	金属板断裂
双面修补件 (5 件)	尺寸:(60×60×0.6) 铺层:[0/45/-45/90]	预腐蚀	67.5	57.9	94.5	金属板断裂

3.2 疲劳性能

3.2.1 试验结果

未经预腐蚀的未修补裂纹板、修补件和经预腐蚀 1 周期后修补件的疲劳裂纹扩展寿命列于表 2, 图 3 给出了修补裂纹板疲劳裂纹扩展试验断裂形貌, 图 4 和图 5 给出了各类复合材料修补件的 $a-N$ 曲线比较.

3.2.2 试验数据处理方法

对于复合材料修补件, 复合材料补片胶接修补含

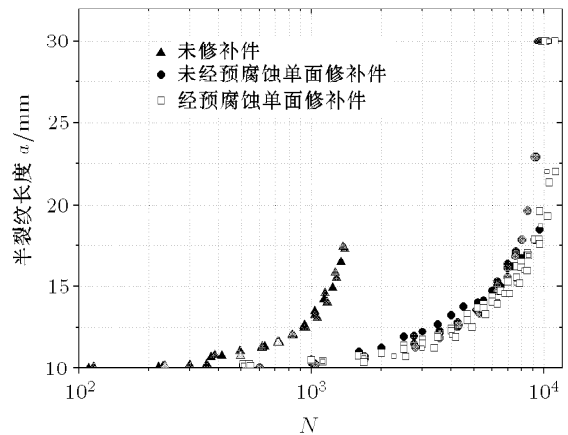


图 4 未修补裂纹板与单面修补件 $a-N$ 曲线比较

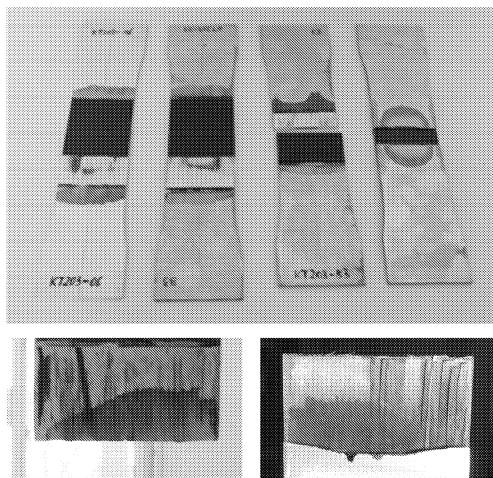


图 3 疲劳裂纹扩展试验件断口形貌

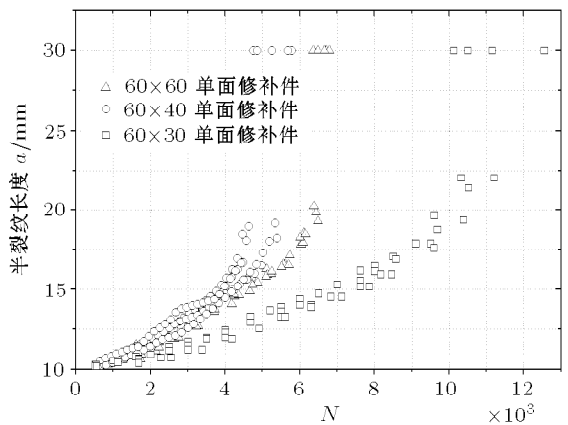


图 5 预腐蚀环境对不同修补试件 $a-N$ 曲线的影响

表 2 复合材料修补件 50% 和 95% 存活率时的对数安全寿命 ($R = 0.1$)

试件名称 (数量)	补片设计	试验 环境	50% 存活率时 对数安全寿命(N_{50})	95% 存活率时 对数安全寿命(N_{95})
未修补裂纹板 (3 件)	/	未预腐蚀	1 449	1 411
单面修补件 (5 件)	尺寸: (60 × 60 × 1.2) 铺层: [0/45/ - 45/90] ₂	未预腐蚀	9 754	8 825
单面修补件 (4 件)	尺寸: (60 × 60 × 1.2) 铺层: [0/45/ - 45/90] ₂	预腐蚀	11 048	9 466
单面修补件 (5 件)	尺寸: (60 × 40 × 1.2) 铺层: [0/45/ - 45/90] ₂	预腐蚀	6 597	6 312
单面修补件 (5 件)	尺寸: (60 × 30 × 1.2) 铺层: [0/45/ - 45/90] ₂	预腐蚀	5 244	4 532

裂纹金属结构以后, 裂纹尖端附近的应力场将发生变化, 裂纹扩展速率通常采用修正应力强度因子的方法, 即将胶接修补后的金属板视为一块裂纹尖端应力强度因子有所减少的未修补裂纹板. 具体试验数据处理方法和步骤如下:

(1) 计算疲劳裂纹扩展速率 da/dN

采用割线法将数据 (a, N) 转换为 da/dN (即 $\Delta a/\Delta N$), 其表达式如下

$$\frac{da}{dN} = \frac{\Delta a}{\Delta N} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \quad (1)$$

式中, I 为第 i 次观测与记录, $i = 0, 1, \dots$; a_i , N_i 为第 i 次观测与记录的半裂纹长度与载荷循环周次.

(2) 计算应力强度因子幅值 ΔK_r

对于未修补裂纹板, 应力强度因子幅值

$$\Delta K = \frac{P_{\max}(1 - R)}{2b\delta} \cdot F \cdot \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

$$F = 1 + 0.128\left(\frac{a}{b}\right) - 0.288\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 1.525\left(\frac{a}{b}\right)^3 \quad (3)$$

式中, F 为有限尺寸裂纹板应力强度因子修正系数; P 为施加的载荷, R 为应力比; a, b 和 δ 分别为裂纹、板宽的半长和板厚度.

对于修补裂纹板, 基于 Rose 分析模型计算应力强度因子幅值

$$\Delta K_r = \frac{\Delta K}{(1 + S)} \cdot \left(\frac{\Lambda}{a + \Lambda}\right)^{1/2} \quad (4)$$

$$\Lambda = \frac{1}{\pi} \left[\frac{t_{\text{adhesive}}}{G_{\text{adhesive}}} \cdot \frac{(E_{\text{plate}}t_{\text{plate}})(E_{\text{patch}}t_{\text{patch}} + E_{\text{plate}}t_{\text{plate}})}{E_{\text{patch}}t_{\text{patch}}} \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$S = \frac{E_{\text{patch}}t_{\text{patch}}}{E_{\text{plate}}t_{\text{plate}}} \quad (6)$$

式中, ΔK 为未修补裂纹板应力强度因子幅值; Λ 为特征裂纹长度; S 为补片与被修补基板的刚度比; a 为半裂纹长度; G, E 和 t 分别为对应材料的剪切模量、弹性模量和厚度 (见表 3).

表 3 材料性能参数

力学参数	复合材料补片	铝合金板 LY12CZ	J-150 胶粘剂
E_1/GPa	58.70	73.80	2.90
G_{12}/GPa	/	27.10	1.09
ν_{12}	0.32	0.33	0.33
t/mm	1.20	2.80	0.10

由表 3 中材料性能参数, 可以求得特征裂纹长度 Λ 为 2.75 mm, S 为 0.34.

3.2.3 试验数据处理结果

运用上述数据处理方法对初始试验结果进行处理, 获得未修补裂纹板、修补件和经预腐蚀 1 周期后修补件的应力强度因子幅值 ΔK 与裂纹扩展速率 da/dN 的变化曲线, 见图 6.

由表 2 和图 4 ~ 图 6 的结果可以看出, 未经预

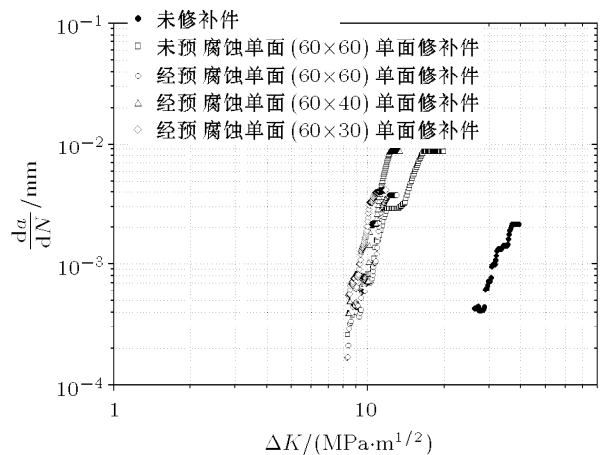


图 6 预腐蚀环境对修补件 $da/dN-\Delta K$ 曲线的影响

腐蚀的复合材料修补试件 $N_{50} = 9754$ 周次, $N_{95} = 8825$ 周次, 分别是未修补裂纹板疲劳寿命的 6.73 倍和 6.25 倍; 由于腐蚀环境试验中施加的较高温度环境 (尤其是紫外照射) 作用使补片和胶粘剂进一步固化的原因, 导致经预腐蚀后的复合材料修补试件相对预腐蚀前疲劳寿命反而略有增加, $N_{50} = 11048$ 周次, $N_{95} = 9466$ 周次, 分别是未修补裂纹板疲劳寿命的 7.62 和 6.70 倍; 对于不同尺寸设计的单面修补件, 对补片宽度的减小 (60 mm → 40 mm → 30 mm), 裂纹扩展速率加快, 疲劳寿命明显降低 (N_{50} : 11048 周次 → 6597 周次 → 5244 周次). 可见, 采用与裂纹板等宽度的复合材料补片能有效降低裂纹板裂纹尖端应力强度因子和延长临界裂纹长度, 从而提升其疲劳寿命, 且预腐蚀环境对复合材料修补试件疲劳寿命的影响较小.

3.2.4 疲劳裂纹扩展寿命预测

由试验结果可知, 本文中复合材料修补件的疲劳裂纹扩展试件的破坏形式均是金属裂纹板主导的破坏. 因此, 和大部分疲劳裂纹扩展寿命预测方法一样, 可采用简单实用的 Paris 公式

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (7)$$

式中, K 为应力强度因子幅值 (见式 (4)), C, m 是材料常数.

预测中基于 Rose 分析模型计算修补件的应力强度因子幅值, 考虑到裂纹板修补前后的 Paris 公式材料常数保持不变, 进而可采用 Paris 公式进行疲劳裂纹扩展寿命预测.

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta K)^m} \quad (8)$$

式中, a_0 为初始裂纹长度, a_f 为最终裂纹长度.

通过对未修补金属裂纹板裂纹扩展原始数据的处理获得材料常数 $C = 8.845 \times 10^{-10}$, $m = 4.035$.

图 7 给出了基于分析模型的疲劳裂纹扩展寿命预测结果和试验数据的比较. 图 7 显示, 未经预腐蚀和经预腐蚀单面修补件疲劳裂纹扩展预测寿命的偏差分别为 -8.9% 和 -14.5% . 可见, 简单的分析模型可以在工程可接受的范围内保守地预测常规环境和腐蚀环境下不同复合材料补片修补金属裂纹板的疲劳裂纹扩展性能. 另一方面, 预腐蚀环境对金属裂纹板材质性能 (C, m) 无明显影响, 直接采用常规环境下裂纹板 Paris 公式材料常数对腐蚀环境下复

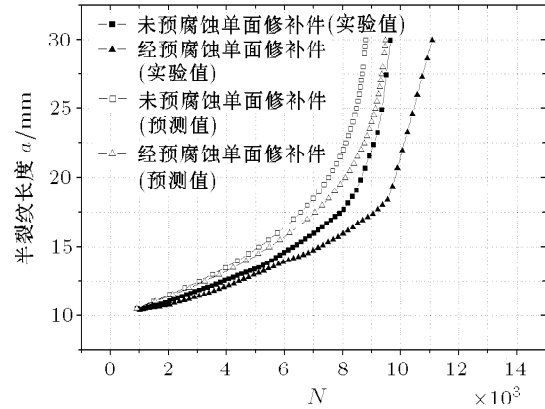


图 7 疲劳裂纹扩展寿命试验数据与分析预测值的比较

合材料修补件的疲劳裂纹扩展的预测精度无明显影响, 其预测精度在很大程度上取决于影响应力强度因子幅值 K_r 的相关参数, 如经预腐蚀后修补件的几何尺寸变化 ($\Delta\delta, \Delta b$).

4 结 论

实验研究了腐蚀环境下 T300/E51 碳 / 环氧复合材料修补含裂纹 LY12CZ 铝合金板的强度和疲劳性能. 通过实验结果的处理、分析, 得出以下结论:

(1) 短周期的预腐蚀环境对复合材料修补件的静强度和疲劳裂纹扩展寿命影响不显著.

(2) 对于矩形复合材料补片, 垂直于裂纹方向的长度 ≥ 60 mm, 平行于裂纹方向的长度等于板长时, 修补效果最为明显, 可最大限度地提高中心裂纹铝合金板在腐蚀环境下的承载能力, 减缓疲劳裂纹扩展速率, 延长疲劳寿命.

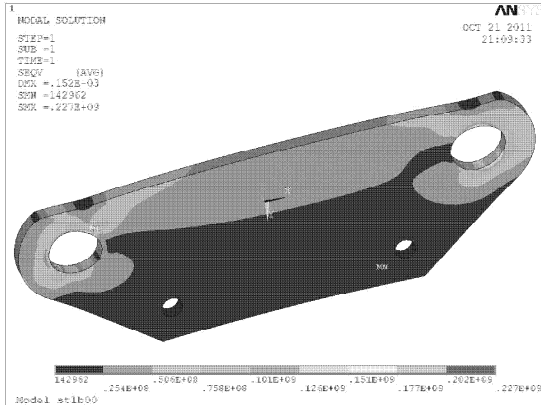
(3) 基于 Paris 公式和 Rose 分析模型建立了复合材料修补结构疲劳裂纹扩展寿命预测模型, 同时适用于常规环境和腐蚀环境下修补件的疲劳性能预测与分析.

(4) 预腐蚀环境对金属裂纹板裂纹扩展特性 (C, m) 无明显影响, 可直接采用常规环境下裂纹扩展 Paris 公式及材料常数对腐蚀环境下复合材料修补件的疲劳裂纹扩展寿命进行预测.

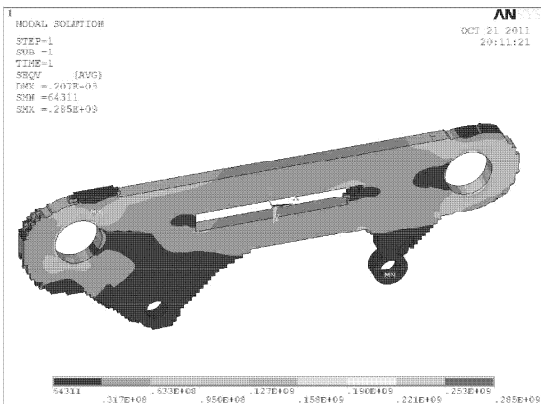
参 考 文 献

- 王清远, 陶华. 复合材料修补件的强度和疲劳寿命. 材料工程, 2003, (1): 21-23 (Wang Qinyuan, Tao Hua. Strength and fatigue behavior of composite repaired components. *Material Engineering*, 2003, (1): 21-23 (in Chinese))
- 杨孚标, 肖加余, 江大志等. 复合材料单面修补铝合金裂纹板的疲劳破坏特性. 中国表面工程, 2006, 19(5): 210-213 (Yang

(下转第 74 页)



(a) III 工况下优化前



(b) III 工况下优化后

图 7 III 工况下优化前后输送链板的应力分布

5 结论

本文应用 ICM 方法在 ANSYS 环境中通过 APDL 编程完实现了输送链板的拓扑优化. 优化过程

中, 应用单元生死法实现了单元的保留与删除以及基结构的重建; 并采用分层放大的策略解决了多工况应力约束下拓扑优化中的载荷病态问题. 最终, 得到了清晰的优化结果, 成功地实现了链板的轻量化设计, 为刮板取料机的后续设计提供了工程依据.

参 考 文 献

- 1 隋允康. 建模·变换·优化——结构综合方法新进展. 大连: 大连理工大学出版社, 1996
- 2 叶红玲, 隋允康. 应力约束下连续体结构的拓扑优化. 北京工业大学学报, 2006, (4): 301-305 (Ye Hongling, Sui Yunkang. Topological Optimization of Continuum Structure Under Stress Constraints. *Journal of Beijing University of Technology*, 2006, (4): 301-305 (in Chinese))
- 3 杨德庆, 隋允康, 刘正兴. 多工况应力约束下连续体结构拓扑优化映射变换解法. 上海交通大学学报, 2000, 34(8): 1061-1065 (Yang Deqing, Sui Yunkang, Liu Zhengxing. Mapping Transformation Method for Topology Optimization of Continuum Structures under Multiple Loading Cases and Stress Constraints. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2000(8): 1061-1065 (in Chinese))
- 4 Sui YK, Yang DQ. A new method for structural topological optimization based on the concept of independent continuous variables and smooth model. *Acta Mechanica Sinica*, 1998, 14(2): 179-185
- 5 王科社. 机械优化设计. 北京: 国防工业出版社, 2007 (Wang Keshe. *Optimal Design for Machinery*. Beijing: National Defense Industry Press, 2007 (in Chinese))
- 6 彭细荣. 连续体结构静动力拓扑优化. [博士学位论文]. 北京: 北京工业大学机电学院, 2004 (Peng Xirong. *Static and Dynamic Topology Optimization of Continuum Structures*. [PhD Thesis]. Beijing: Beijing University of Technology, College of Mechanical Engineering, 2004 (in Chinese))

(责任编辑: 张 静)

(上接第 79 页)

Fubiao, Xiao Jiayu, Jiang Dazhi, et al. Fatigue failure properties of pre-cracked aluminum alloy plates one-side-bonded with composite patches. *China Surface Engineering*, 2006, 19(5): 210-213 (in Chinese))

- 3 Seo DC, Lee JJ. Fatigue crack growth behavior of cracked aluminum plate repaired with composite patch. *Composite Structures*, 2002 (57): 323-330
- 4 徐建新, 刘艳红, 周焯等. 损伤金属结构的复合材料胶接修补试验研究. 南京航空航天大学学报, 2001, 33(1): 96-99 (Xu Jianxin,

Liu Yanhong, Zhou Xuan, et al. Experimental investigation of cracked metallic structures bonded with composite patches. 2001, 33(1): 96-99 (in Chinese))

- 5 孙洪涛, 刘元镛, 彭俊. 复合材料胶接修补问题的试验研究和分析. 实验力学, 1999, 14(4): 419-424 (Sun Hongtao, Liu Yuanyong, Peng Jun. Experimental study and analysis for repairing practice with composite bonding patches. *Journal of Experimental Mechanics*, 1999, 14 (4): 419-424 (in Chinese))

(责任编辑: 刘希国)