

真空辅助湿铺贴阶梯形挖补修理后层合板拉伸破坏模拟

刘伟先 周光明 王新峰 乔玉

(机械结构力学及控制国家重点实验室,南京航空航天大学,南京,210016)

摘要:对玻璃纤维增强复合材料真空辅助湿铺贴阶梯形挖补修理后层合板建立了三维有限元模型,进行了拉伸破坏模拟。发展了考虑剪切非线性的复合材料各向异性连续损伤力学模型,用于模拟母板与补片复合材料单向带失效。采用基于双线性 cohesive 本构的接触分析模拟了真空辅助湿铺贴阶梯形挖补修理后形成无厚度二次固化界面。数值模拟结果与试验结果吻合较好表明所采用的模型能很好地预测整个修理结构的拉伸性能。最后,分析了整个拉伸过程中层合板斜接挖补修理结构的损伤破坏过程。

关键词:阶梯形挖补修理;剪切非线性;连续损伤模型;cohesive 理论;接触分析

中图分类号:TB332 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2014)02-0304-06

Tensile Failure Simulation of Vacuum-Assisted Wet-Layup Stepped-Repaired Laminates

Liu Weixian, Zhou Guangming, Wang Xinfeng, Qiao Yu

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: A 3-D finite element model of the glass fiber composite laminates is established using vacuum-assisted wet-layup stepped-repair, and the tensile failure process is simulated. The anisotropic continuum damage mechanics model of lamina is developed considering the shear nonlinearity, and it is used to simulate the material failure of the parent and the patch laminates. The contact analysis is defined for the secondary curing interface between the motherboard and patch, using the cohesive model to achieve the interface contact properties. The test results are in good agreement with the numerical simulation results, and the model can be used to predict the tensile properties of the entire repaired structure. Finally, the damage and failure process of the step-repaired structure is analyzed during stretching.

Key words: stepped-repair; shear nonlinearity; continuum damage model; cohesive theory; contact analysis

随着中国航空航天、高速铁路、风电等行业的高速发展,具有高比刚度、高比强度、可设计性强等特点的复合材料,得到越来越广泛的应用。但复合材料结构在制造、运输以及使用过程中难免产生各种损伤,从而影响复合材料结构件的安全性能。因此对损伤后的复合材料结构件进行修理以达到结构使用的刚度以及强度要求,具有重大的实用价

值。

相比于复合材料其他的修理形式,挖补修理可在增加最少结构质量的同时获得最优强度恢复、得到平齐的结构表面以降低对气动外形的影响,因而受到广泛关注^[1]。挖补修理根据打磨方式主要分为斜接型与阶梯形两类修补方式。胶接面构型不同导致两种修理方式具有完全不同的传力途径以

基金项目:江苏高校优势学科建设工程资助项目。

收稿日期:2013-07-15;修订日期:2013-10-16

通信作者:周光明,男,教授,博士生导师,E-mail:zhougm@nuaa.edu.cn。

及应力分布。目前复合材料挖补修理的研究主要集中在斜接型挖补修理构型。文献[2]采用解析法和二维有限元法对斜面搭接试件进行优化设计。文献[3]对胶层采用弹塑性模型,研究了胶层塑性对斜接型挖补的影响。而对于现代修补技术的研究,文献[4]采用真空注胶修补工艺研究了两种不同铺层方案的斜接型挖补修理,并建立了二维有限元模型进行模拟分析。文献[5]通过电子放大镜观察斜接形湿铺贴补片、模具成型预制补片与机械加工预制补片构型,给出了3种修理工艺在胶接面处细观的区别。文献[6]建立了三维有限元模型,比较了不同形状的额外铺层的影响,仅给出修理连接区域的应力/应变分布,未进行失效分析。而文献[7]同样采用三维有限元模型,引入梯形 cohesive 本构界面元模拟韧性胶膜失效,预测了复合材料胶接挖补修理的失效过程,但未考虑复合材料损伤破坏。文献[8]则引入 Tsai-Hill 强度准则与最大剪应力破坏判据预报压缩强度,通过 PCL 语言实现了挖补结构的参数化建模并讨论主要修补参数的影响规律。相比于斜接形挖补修理,阶梯形挖补修理结构表面更平齐、打磨精度更容易控制,但研究较少。文献[9,10]只是从弹性分析与屈曲分析方面研究了阶梯形挖补修理,并未考虑整个阶梯形挖补修理的渐进损伤过程。文献[11]在其研究中采用连续损伤模型模拟复合材料母板、补片以及胶层的渐进损伤扩展,但此方法中胶层采用三维单元,无法模拟由湿铺贴形成的零厚度二次固化界面,且在复合材料连续损伤过程中未考虑剪切非线性。

本文以复合材料层合板真空辅助湿铺贴阶梯形挖补修理结构为研究对象,采用基于连续损伤力学的材料损伤模型模拟层合板破坏,通过非线性因子将剪切非线性引入损伤模型,对真空辅助湿铺贴挖补修理所形成的无厚度二次固化界面采用基于 cohesive 理论的接触分析^[12]进行模拟。通过建立三维有限元模型,模拟了整个拉伸过程中层合板阶梯形挖补修理结构的损伤破坏过程。

1 渐进损伤模型

1.1 材料损伤模型

单层纤维增强复合材料为正交各向异性,基于连续损伤力学的本构方程为

$$\bar{\sigma} = \mathbf{M}(\mathbf{D}) : \mathbf{C}_0 : \bar{\epsilon} \quad (1)$$

当采用材料坐标系时, $\mathbf{M}(\mathbf{D})$ 为

$$\mathbf{M}(\mathbf{D}) = \text{diag} \left[\frac{1}{1-d_1}, \frac{1}{1-d_2}, \frac{1}{1-d_3}, \frac{1}{\sqrt{(1-d_1)(1-d_2)}}, \frac{1}{\sqrt{(1-d_1)(1-d_3)}} \right],$$

$$\frac{1}{\sqrt{(1-d_2)(1-d_3)}}]$$

其中:损伤状态变量 d_i ($i=1,2,3$) 表示材料第 i 主方向上有效承载面积减小的比例,用于量化各方向微裂纹的分布密度。 d_i 必须在 $0 \sim 1$ 之间变化,等于 0 表示此方向材料完好无损,等于 1 表示此方向材料完全失去承载能力。

采用非线性损伤因子将剪切非线性引入损伤本构方程^[13]。有限元分析中采用逐步加载求解,剪切非线性本构线性化后表示为

$$\tau_{1n}^{(i+1)} = (1-d_{1n}) G_{1n}^0 \gamma_{1n}^{(i+1)} \quad (2)$$

式中: n 代表 2,3 方向; G_{1n}^0 为 $1n$ 平面内初始剪切刚度; d_{1n} 表示 $1n$ 平面内剪切损伤因子。当 d_i 为零时,主要由非线性损伤因子控制剪切方向的损伤,一旦全局损伤开始,则非线性损伤因子保持不变。 $\gamma_{1n}^{(i+1)}$ 表示 $1n$ 平面内第 $(i+1)$ 增量步的非线性影响因子。

$$d_{1n}^{(i+1)} = \begin{cases} \max(d_{1n}^i, d_{\text{new}}) & (1-d_1)(1-d_n) = 1 \\ \max(d_{1n}^i) & (1-d_1)(1-d_n) < 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $d_{\text{new}} = \frac{3\alpha G_{1n}^0 (\tau_{1n}^{(i)})^2 - 2\alpha (\tau_{1n}^{(i)})^3}{1 + 3\alpha G_{1n}^0 (\tau_{1n}^{(i)})^2}$, 其中上标表示第 i 个增量步, α 为非线性影响因子。

采用有限元对复合材料进行强度分析时,当材料点损伤前后,应变始终保持连续变化,因此采用应变作为复合材料损伤演化的依据^[14]。本文引入基于应变的综合变量 F_i , 用于考察损伤变量的演化

$$F_1^2 = \begin{cases} \left(\frac{\epsilon_{11}}{\epsilon_{11}^T} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{12}}{\gamma_{12}^f} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{13}}{\gamma_{13}^f} \right)^2 & \epsilon_{11} \geq 0 \\ \frac{\epsilon_{11}}{\epsilon_{11}^C} & \epsilon_{11} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$F_2^2 = \begin{cases} \left(\frac{\epsilon_{22}}{\epsilon_{22}^T} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{12}}{\gamma_{12}^f} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{23}}{\gamma_{23}^f} \right)^2 & \epsilon_{22} \geq 0 \\ \left(\frac{\epsilon_{22}}{\epsilon_{22}^C} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{12}}{\gamma_{12}^f} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{23}}{\gamma_{23}^f} \right)^2 & \epsilon_{22} < 0 \end{cases}$$

$$F_3^2 = \begin{cases} \left(\frac{\epsilon_{33}}{\epsilon_{33}^T} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{13}}{\gamma_{13}^f} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{23}}{\gamma_{23}^f} \right)^2 & \epsilon_{33} \geq 0 \\ \left(\frac{\epsilon_{33}}{\epsilon_{33}^C} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{13}}{\gamma_{13}^f} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{23}}{\gamma_{23}^f} \right)^2 & \epsilon_{33} < 0 \end{cases}$$

式中: $\epsilon_{ii}^T, \epsilon_{ii}^C$ 代表 i 方向的最大拉伸、压缩应变; γ_{ij}^f 代表 ij 方向的最大剪应变。

定义损伤状态变量为^[15]

$$d_i = \begin{cases} 0 & F_i \leq 1 \\ 1 - \exp[-(1-F_i)/m_i] & F_i > 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: m_i 为 i 方向损伤速率影响因子,控制指数下

降速率。

1.2 界面损伤模型

补片直接湿铺贴于母板上,真空辅助固化后形成无厚度界面,其理论模拟与有厚度胶层存在本质的区别。本文假设母板与阶梯形补片为粘性接触的两个物体,采用基于 cohesive 理论的接触理论^[12]模拟无厚度二次固化界面。接触力与相对位移本构关系如下

$$\begin{bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{bmatrix} = (1-d) \begin{bmatrix} K_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: t_n, t_s, t_t 分别表示法向和两个剪切方向的粘聚力; $\delta_n, \delta_s, \delta_t$ 分别表示法向和两个剪切方向的相对位移; K_{nn}, K_{ss}, K_{tt} 分别表示法向和两个剪切方向的界面刚度; d 为 cohesive 损伤状态变量。

采用平方应力准则预测胶接界面损伤起始

$$\left(\frac{\langle t_n \rangle}{t_{nc}}\right)^2 + \left(\frac{t_s}{t_{sc}}\right)^2 + \left(\frac{t_t}{t_{tc}}\right)^2 = 1 \quad (7)$$

式中: t_{nc}, t_{sc}, t_{tc} 分别为对应的临界界面强度。

运用 BK 准则来预测损伤的扩展

$$G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC}) \left\{ \frac{G_S}{G_T} \right\}^\eta = G_{TC} \quad (8)$$

式中: $G_S = G_n + G_t, G_T = G_n + G_s + G_t$, 对玻璃环氧树脂复合材料, 指数 $\eta = 2 \sim 3$, G_n, G_s, G_t 分别为界面法向和两个切向的应变能释放率; G_{IC}, G_{IIC} 分别为法向和切向的临界应变能释放率; G_{TC} 为 BK 准则下的临界应变能释放率, 当 $G_T \geq G_{TC}$ 时, 产生分层。

2 实例分析

真空辅助湿铺贴阶梯形挖补修理试验件几何参数如图 1 所示, 所有试验件长度为 500 mm, 两端贴 60 mm 加强片, 宽度为 160 mm, 损伤孔半径 5 mm。增强材料选择玻璃纤维单向带, 试验树脂采用环氧 618 型号树脂, 单层单向带厚度为 0.4 mm, 其基本性能见表 1。假设复合材料单层板厚度方向上的力学性能与横向力学性能相同, 其中非线性影响因子 α 取为 7.14×10^{-8} , 1 方向损伤速率影响因子 m_1 取 0.1, 而 2, 3 方向损伤速率影响因子 $m_2 = m_3$ 取 0.5。选取常见铺层结构 ($0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, -45^\circ$)_s 层合板进行研究。补片材料与母板材料相同, 铺层顺序与母板铺层一致。在阶梯形补片上下表面分别加贴一层 0° 层, 其半径等于阶梯形修理区域半径增加 6 mm。通过双悬臂梁 (Double cantilever beam, DCB) 试验、端部缺口弯

曲 (End-notched flexure, ENF) 试验测试获得二次固化界面力学性能, 其中 G_{IC} 为 0.245 N/mm, G_{IIC} 为 0.689 N/mm。

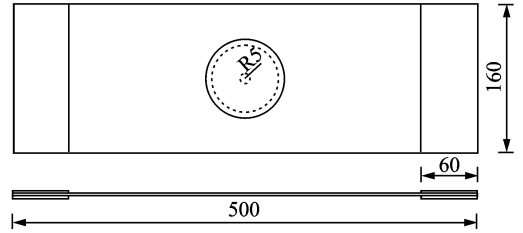


图 1 阶梯形挖补修理层合板几何参数

Fig. 1 Geometry of stepped-repaired laminates

表 1 玻璃纤维单向带增强复合材料基本性能

Tab. 1 Properties of unidirectional glass fiber reinforced composite materials

E_1 /GPa	$E_2 = E_3$ /GPa	$\mu_{12} = \mu_{13}$	μ_{23}
40.46	9.61	0.07	0.45
$G_{12} = G_{13}$ /GPa	G_{23} /GPa	X_T /MPa	X_C /MPa
4.88	4.50	1 023	673
$Y_T = Z_T$ /MPa	$Y_C = Z_C$ /MPa	$S_{12} = S_{13}$ /MPa	S_{23} /MPa
69.7	159.2	63	38.2

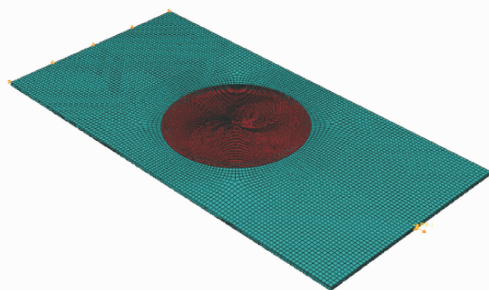
由于 $\pm 45^\circ$ 单层不具有坐标面对称性, 需对整个挖补修理结构进行建模分析。其中母板和补片选用 C3D8R 单元 (8 节点六面体缩减积分单元), 单层厚度方向一层实体单元, 补片与母板有限元部件通过接触定义粘结在一起。有限元模型如图 2 所示, 其中淡蓝色区域为阶梯形打磨母板, 红色区域为阶梯形补片及外加补片。模型一端固支, 另一端通过 MPC 绑定参考点施加位移载荷, 输出绑定参考点支反力及位移从而获得载荷-位移曲线。

挖补修理结构拉伸破坏过程中包括材料及胶层损伤模型问题, 为了保证有限元法 (Finite element method, FEM) 模拟顺利实施, 本文采用 ABAQUS 显式模块对挖补结构进行准静态分析。

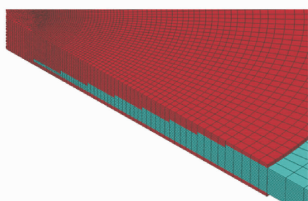
3 结果及讨论

3.1 模拟结果与试验结果比较

将复合材料阶梯形挖补修理后层合板试验研究和数值模拟所得强度整理于图 3 中, 由图可以看出, 计算模拟值与试验值较吻合, 最大相对误差不超过 10%, 由此可见, 本文所建立的三维有限元模型能有效地预测整个复合材料真空辅助湿铺贴阶梯形挖补修理层合板结构的拉伸性能。



(a) 整体图



(b) 局部图

图 2 三维有限元模型

Fig. 2 3-D finite element model

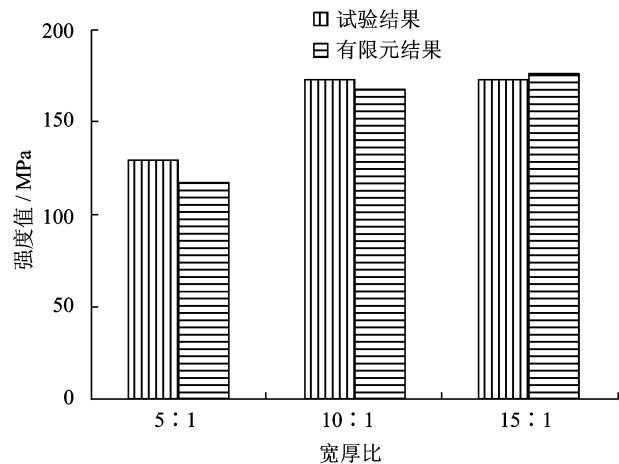


图 3 计算结果和试验结果的比较

Fig. 3 Comparison between experimental and FEM results

3.2 损伤扩展过程分析

由于 3 种不同阶梯宽厚比下修理结构破坏过程类似,本文以阶梯宽厚比为 10 : 1 的修理结构计算结果为例,来说明整个修理结构在拉伸载荷下的损伤过程。

未出现损伤之前,整个阶梯形修理结构处于弹性变形阶段,应力分布如图 4 所示。阶梯形二次固化界面主要由对接面与搭接面两部分构成,其中对接面承受剥离载荷,面积较小,且二次固化界面抗剥离能力较弱;而搭接面主要承受剪切载荷,面积较大,二次固化界面抗剪切能力较强。母板载荷主

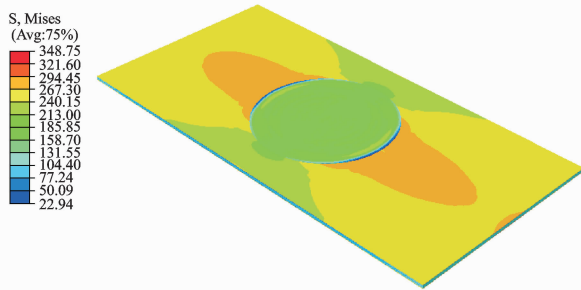


图 4 未出现损伤之前典型应力分布

Fig. 4 Typical stress distribution of repaired structure before damage

要通过阶梯面剪切应力传递到补片上。

拉伸载荷作用下,铺层结构(0°, 90°, 45°, -45°)中 0°承受主要载荷,从而造成母板与补片 0°层对接面较早破坏,如图 5(a)所示,试验中也明显观察到此现象,试验照片中泛白圆弧线与模拟结果位置相同,如图 5(b)所示。0°层对接面分离后,载荷通过 0°层周边搭接界面传递,从而造成母板与补片中与之相邻 90°层在对接处应力集中,出现损伤,如图 5(c, d)所示。图 5~9 中红色区域为损伤破坏区域。

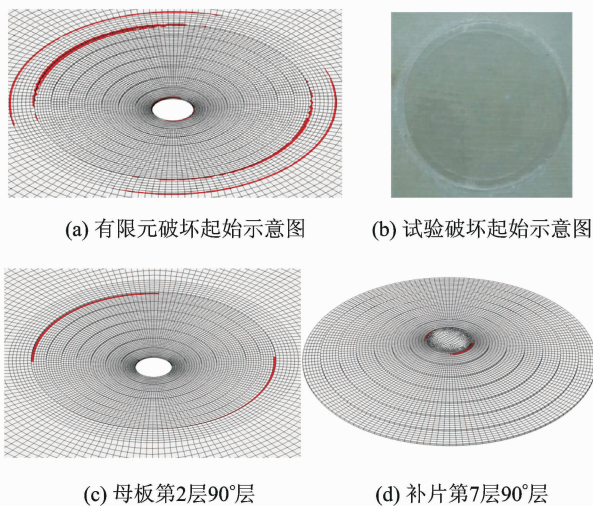


图 5 0°层对接二次固化界面破坏及其影响

Fig. 5 Failure of secondary curing interfaces at butt joints of 0° layers and its influence

由于母板在受力方向外接补片两端处存在应力集中,且 90°铺层承载能力弱,随着载荷继续增加,此区域发生 2 方向拉伸损伤,失去部分承载能力,损伤区域如图 6 所示。

随着载荷增大,±45°层对接面达到损伤极限,发生破坏,如图 7(a)所示。由于 45°层对接面分离,载荷重新分配,从而造成与之相邻的母板第 7

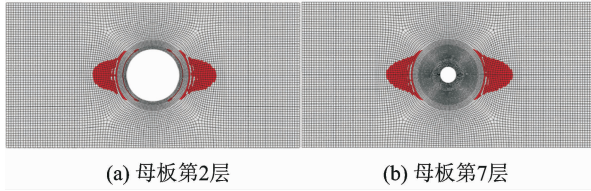
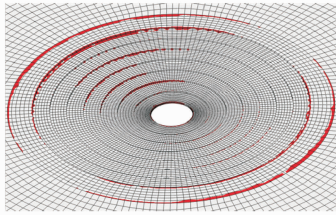
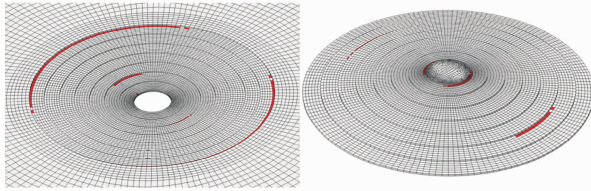


图6 母板90°层发生破坏(第2层,第7层)
Fig. 6 Damage of 90° layer of motherboard

层90°层以及补片第2层90°层应力集中,发生破坏,如图7(b)所示。



(a) 45°层对接面破坏示意图



(b) 母板第7层90°层 (c) 补片第2层90°层

图7 ±45°层对接二次固化界面破坏及其影响

Fig. 7 Failure of secondary curing interfaces at butt joints of ±45° layers and its influence

随着载荷的继续增大,阶梯形二次固化界面搭接面达到初始剪切强度,开始损伤,如图8所示,并迅速扩展。其中外加补片与母板表面0°层形成搭接面首先发生损伤扩展,随后向母板±45°层搭接面扩展。

界面开裂迅速扩展后,失去传递载荷到补片的作用,此时整个结构中载荷完全由阶梯形打磨后母板承受。由于孔边应力集中,孔边0°层应力迅速增加,达到承载极限,0°层发生破坏,如图9(a,b)

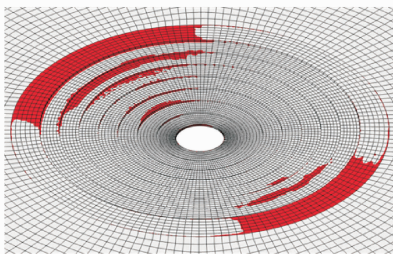


图8 二次固化界面开裂

Fig. 8 Debonding of secondary curing interfaces

所示。同时,母板±45°层在2方向拉伸应力与12方向剪切应力的共同作用下,同样发生2方向拉伸破坏,如图9(c~f)所示。此时整个结构失去承载能力,迅速破坏。此破坏模式与试验照片图9(g)表现出相同的破坏方式,表明本文建立的渐进损伤模型合理、可行,有效地揭示了拉伸载荷下阶梯形修理结构渐进损伤过程。

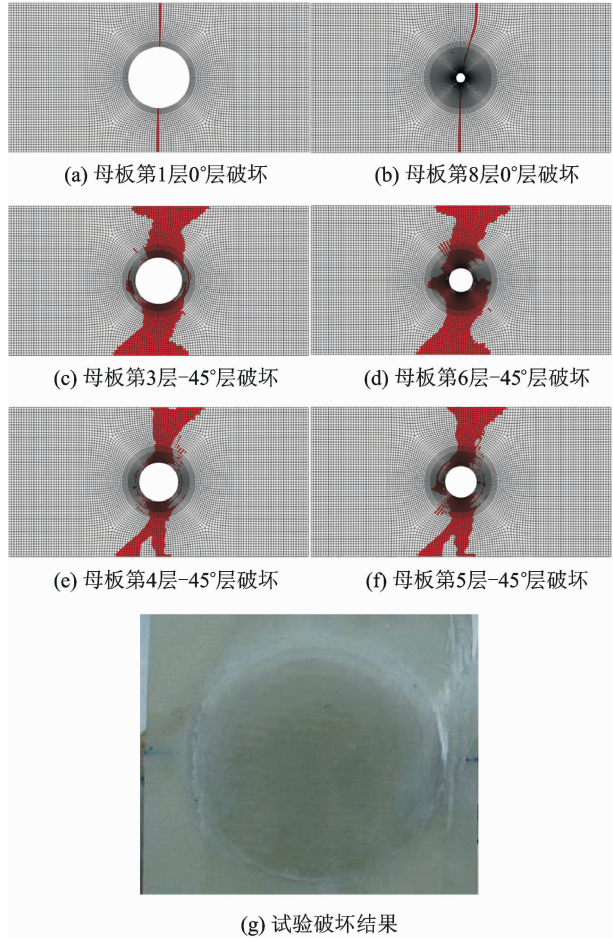


图9 阶梯形修理结构最终破坏模式

Fig. 9 Ultimate failure mode of stepped-repaired laminates

4 结 论

文中建立了真空辅助湿铺贴阶梯形修理复合材料层合三维有限元模型,对拉伸载荷作用下破坏行为进行了数值模拟,分析了整个修理结构渐进破坏机理,得到以下结论:

(1)采用材料损伤模型及二次固化界面损伤模型成功地分析了复合材料层合板真空辅助湿铺贴阶梯形挖补修理的损伤扩展过程并获得其最终拉伸强度;

(2)0°层对接界面首先发生损伤,随后±45°层对接界面破坏,母板载荷主要通过搭接界面传递到

补片,在对接界面破坏处,由于应力集中现象,造成相邻 90°层薄弱层发生破坏;

(3)由于外加补片造成整个修理结构刚度不均,在母板受力方向上,外加补片前端局部应力集中,使得此区域母板 90°层提前破坏。

参考文献:

- [1] 陈绍杰. 复合材料结构修补指南[M]. 北京:航空工业出版社,2001.
- [2] Harman A B, Wang C H. Improved design methods for scarf repairs to highly strained composite aircraft structure[J]. *Composite Structures*, 2006, 75(1): 132-144.
- [3] Wang C H, Gunnion A J. On the design methodology of scarf repairs to composite laminates[J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68(1): 35-46.
- [4] Tzetzis D, Hogg P J. Experimental and finite element analysis on the performance of vacuum-assisted resin infused single scarf repairs[J]. *Materials & Design*, 2008, 29(2): 436-449.
- [5] Whittingham B, Baker A A, Harman A, et al. Micrographic studies on adhesively bonded scarf repairs to thick composite aircraft structure[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2009, 40(9): 1419-1432.
- [6] Sutter D A. Three-dimensional analysis of a composite repair and the effect of overply shape variation on structural efficiency [D]. Graduate School of Engineering and Management, Air Force Institute of Technology (AU), 2007.
- [7] Pinto A M G, Campilho R, de Moura M, et al. Numerical evaluation of three-dimensional scarf repairs in carbon-epoxy structures[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2010, 30(5): 329-337.
- [8] 喻梅, 许希武. 复合材料挖补修理结构的压缩强度[J]. *中国矿业大学学报*, 2008, 37(5):709-714.
- Yu Mei, Xu Xiwu. Study of the compression strength of scarf patch repaired composite structures [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2008, 37(5): 709-714.
- [9] 徐建新, 曹小梅, 李顶河. 复合材料加筋板的阶梯式挖补修理稳定性分析[J]. *中国民航大学学报*, 2011, 29(4): 1-3.
- Xu Jianxin, Cao Xiaomei, Li Dinghe. Research on stability of stiffened composite laminates with stepped-lap repair[J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2011, 29(4): 1-3.
- [10] 徐建新, 张志德, 李顶河. 复合材料层合板阶梯式挖补修理参数分析[J]. *机械科学与技术*, 2011, 30(8): 1304-1307.
- Xu Jianxin, Zhang Zhide, Li Dinghe. Parametric study of bonded step-lap repairs for composite laminates[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2011, 30(8): 1304-1307.
- [11] 朱书华, 王跃全, 童明波. 复合材料层合板阶梯形挖补胶接修理渐进损伤分析[J]. *复合材料学报*, 2012, 29(6):164-169.
- Zhu Shuhua, Wang Yuequan, Tong Mingbo. Progressive damage analysis on composite laminates stepped-patch adhesively bonding repair [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2012,29(6): 164-169.
- [12] Hibbit, Karlsson and Sorensen Inc. Abaqus 6.10 Documentation [EB/OL]. <http://abaqus.civil.uwa.edu.au:2080/v6.10/index.html>,2013-05.
- [13] Hahn H T, Tsai S W. Nonlinear elastic behavior of unidirectional composite laminae[J]. *Journal of Composite Materials*, 1973, 7(1): 102-118.
- [14] Huang C H, Lee Y J. Experiments and simulation of the static contact crush of composite laminated plates [J]. *Composite structures*, 2003, 61(3): 265-270.
- [15] Batra R C, Gopinath G, Zheng J Q. Damage and failure in low energy impact of fiber-reinforced polymeric composite laminates [J]. *Composite Structures*, 2012, 94(2): 540-547.