

搭接长度对复合材料单搭接胶接接头的影响

郭霞¹, 关志东¹, 刘遂¹, 孔娇月², 晏冬秀², 乔柳平²

1. 北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100191
2. 中国商用飞机有限责任公司上海飞机制造有限公司, 上海 200436

摘要 针对复合材料单搭接接头的拉伸性能进行有限元建模, 分析搭接长度对单搭接接头的应力分布和破坏模式的影响。结果表明: 当搭接长度在 5~45mm 变化时, 最小剪切应力逐渐减小, 当搭接长度大于 20mm 时, 搭接长度对应力分布的影响减少; 破坏载荷逐渐增大, 当搭接长度大于 20mm 时, 搭接长度对破坏载荷的影响减少; 单搭接接头的破坏模式为胶层-复合材料界面的边缘发生部分损伤, 导致胶层损伤, 搭接长度的变化影响单搭接接头的损伤严重程度。

关键词 复合材料单搭接胶接接头; 搭接长度; 破坏模式

中图分类号 TB330.1

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.07.005

Effect of Lap Length on the Adhesive-bonded Single-lap Composite Joints

GUO Xia¹, GUAN Zhidong¹, LIU Sui¹, KONG Jiaoyue², YAN Dongxiu², QIAO Liuping²

1. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China
2. Shanghai Aircraft Manufacturing CO., Ltd., Commercial Aircraft Corporation of China, Ltd., Shanghai 200436, China

Abstract The tensile performance of the adhesive-bonded single-lap composite joints is studied by the finite element modeling. Effect of the lap length on the tensile properties is analyzed with respect to the stress distribution and the failure mode. It is shown that, when the lap length changes from 5mm to 45mm, the minimum shear stress gradually decreases; when the lap length is greater than 20mm, effect of the lap length on the stress distribution is decreased; the failure load increases gradually with the lap length; the increase rate is reduced when the lap length is greater than 20mm; the failure mode of a single lap joint is to start from the edge of the adhesive-composite interface, and then the adhesive damage. The lap length affects the damage level.

Keywords adhesive-bonded single-lap composite joints; lap length; damage mode

0 引言

随着复合材料在飞机结构使用量的日益增加, 复合材料结构修理成为结构设计人员必须面对的严峻环节^[1], 由于修理效果涉及飞机的使用寿命、经济性、安全性等重要因素, 所以针对不同类型的维修方法, 都需要进行大量的试验计算分析, 由于试验实施需要进行试件制作、试验设备配备, 周期较长, 费用较多, 若全部结论都由试验验证得出, 飞机设计周期及费用将大大提高, 因此, 修理设计过程中需利用有限元模拟软件, 配合试验结果, 推算其他相关结论, 以节约成本和时间。由于三维模型结构较复杂, 故首先基于二维模型即复合

材料胶接接头进行有限元分析。

目前已有对复合材料胶接接头的相关试验和计算分析。Gunnion 等^[2]对复合材料斜搭接接头建立了参数化有限元模型以研究不同参量对胶层中应力分布的影响; Campilho 等^[3]从真实的修理结构中提取出单面与双面搭接接头模型, 并使用有限元方法对这两种接头形式进行建模; Kim 等^[4]对复合材料单搭接胶接接头建立有限元模型并对接头的极限强度进行预测; Wang 等^[5]对含缺陷复合材料斜搭接胶接接头建立有限元模型, 模拟含有不同位置缺陷的斜搭接接头的损伤扩展, 通过黏聚区模型分析胶层区域的损伤扩展, 分析接头的

收稿日期: 2012-12-19; 修回日期: 2013-01-08

基金项目: 中国商飞关键技术攻关项目 (SAMC11-JS-07-32)

作者简介: 郭霞, 博士研究生, 研究方向为复合材料修理设计与分析, 电子信箱: guoxia@buaa.edu.cn; 关志东 (通信作者), 教授, 研究方向为复合材料设计, 电子信箱: zdguan@buaa.edu.cn

断裂机理。

本文针对搭接长度对复合材料单搭接接头拉伸性能的影响进行分析,使用 ABAQUS 建立平面应变模型分析应力分布与破坏模式,采用 cohesive 单元判断胶层和复合材料界面的失效以及复合材料分层损伤,采用塑性材料的连续损伤模型判断胶层内部的损伤,以实现对接头强度的预报,同时分析搭接长度对单搭接接头失效强度的影响。

1 应力分布分析

本文采用 ABAQUS 有限元建模分析单搭接模型在拉伸载荷作用下的应力分布,特将单搭接模型建为如图 1 所示,搭接长度分别取 5~45mm 进行对比。

1.1 单搭接接头模型

本文建立二维模型是为了模拟胶层损坏和胶层的应力分布,复合材料的单元类型是平面应变 CPE4 单元。模型的边界条件约束和加载方式见图 1(a),图中 U 为位移,网格划分方式见图 1(b)。

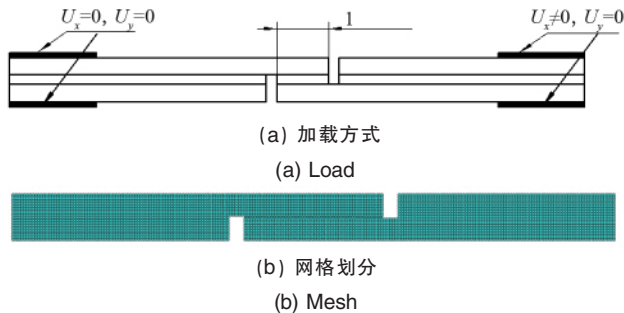


图 1 二维模型示意图及网格划分方式
Fig. 1 Load and the mesh of a 2-D model

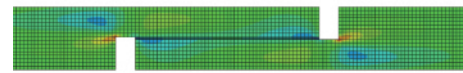
1.2 结果分析

输出模型的胶接面单元节点的剪切应力和剥离应力,单元节点位置参见图 2。由图 3(a)和图 3(b)可以看出,在胶接区域边缘出现剪切和剥离的应力集中现象,由于胶层强度较低,极容易发生破坏,所以损伤会发生在胶层的边缘区域。



图 2 胶层单元的节点
Fig. 2 Nodes of adhesive elements

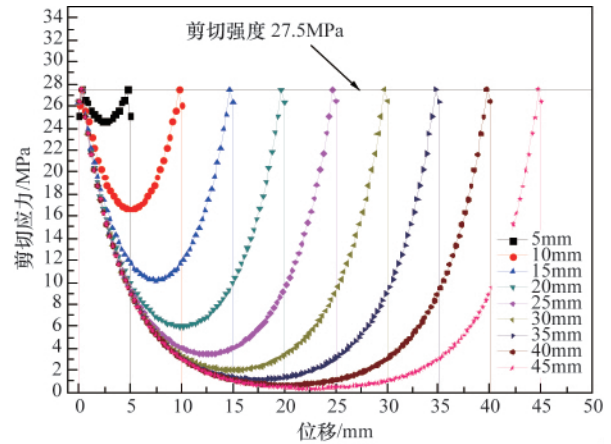
图 3(c)和图 3(d)是当单搭接接头的胶层最大应力达到失效强度时的应力分布状态,胶层的剪切失效强度取 27.5MPa,剥离失效强度取 16MPa。可以看出,搭接长度变大过程中,对应的最小剪切应力逐渐减小,当搭接长度增大到 20mm 时,应力值变化有所减小,搭接长度在 20~45mm 时整体应力水平相差不大。在此过程中,对应的剥离应力分布基本相似,由于最大剥离应力出现在胶层边缘,虽然搭接长度影响大部分区域的应力值,但整个胶层的应力水平随搭接长度的变化很小,所以搭接长度对剥离应力的影响较小。



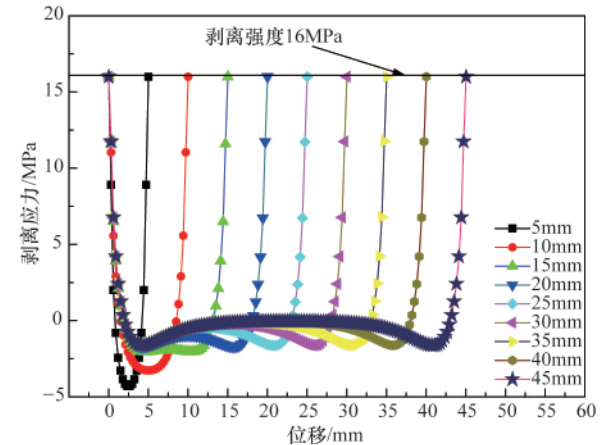
(a) 剪切应力云纹图
(a) Shear stress



(b) 剥离应力云纹图
(b) Peel stress



(c) 不同搭接长度的剪切应力
(c) Shear stress with different lap lengths



(d) 不同搭接长度的剥离应力
(d) Peel stress with different lap lengths

图 3 单搭接接头的应力分布预测及分析
Fig. 3 Prediction of stress distribution of the single lap joint

2 渐进失效分析

2.1 界面损伤分析模型

拉伸载荷状态下单搭接接头主要可能出现 3 类破坏模式:胶层内部损伤,胶层和复合材料界面破坏,复合材料内部破坏。出现何种破坏模式由胶层和复合材料性能决定,这 3

类破坏模式可能单独出现也可能混合出现。下面通过有限元建模方法,分析搭接长度对破坏模式的影响。为模拟单搭接的破坏模式,在上述应力分析模型中插入4层界面单元,其中2层是胶层和复合材料的界面,另外2层是复合材料易破坏首层与其余铺层之间的界面,搭接长度为10、20和30mm的单搭接接头(图4)。

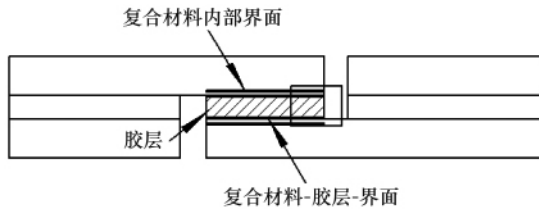


图4 界面分布示意图
Fig.4 Interface position

2.2 失效准则

为模拟单搭接接头的渐进损伤过程,需要对胶层破坏和界面破坏进行校核。本模型中使用胶层单元模拟复合材料首层-其余层的界面以及胶层-复合材料的界面破坏,使用连续损伤准则模拟胶层的破坏。

胶层单元使用基于牵引力-位移关系建立的连续损伤机制^[6],其主要作用是连接上下的界面层。胶层单元中的作用力有3个:法向正应力 t_n 、切向剪应力 t_s 和 t_t 。

在线弹性-线性软化本构模型中,胶层作用力定义为

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & & \\ & K_{ss} & \\ & & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中 $K_i(i=n,s,t)$ 为胶层模型中3个应力所对应的刚度系数; $\varepsilon_i(i=n,s,t)$ 为胶层模型的3个应变,当胶层厚度为 T_0 时, $\varepsilon_n = \delta_n/T_0, \varepsilon_s = \delta_s/T_0, \varepsilon_t = \delta_t/T_0$;其中 $\delta_i(i=n,s,t)$ 分别表示胶层模型3个方向上的位移。

图5显示了胶层模型损伤后的双线性本构关系,由图可见,胶层单元使用强度判别式作为分层起始判据,能量释放率判别式作为分层扩展的依据,因此定义胶层强度和胶层断裂韧性两个参数就可以同时分析胶层中的损伤起始及损伤扩展问题。

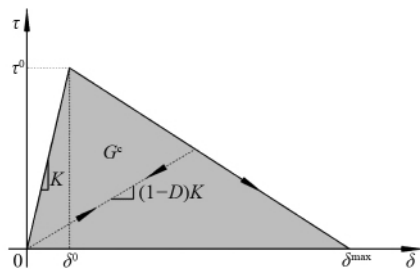


图5 胶层单元双线性本构模型
Fig.5 Bilinear constitutive model of cohesive element

使用式(2)中的二次应力准则作为胶层初始损伤判据:

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1 \quad \langle t_n \rangle = \begin{cases} t_n & t_n > 0 \\ 0 & t_n < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中 $t_i^0(i=n,s,t)$ 为胶层强度参数,对应图5中的 τ^0 。

使用式(3)中基于能量的Power准则作为胶层损伤扩展判据:

$$\left\{ \frac{G_n}{G_n^c} \right\}^2 + \left\{ \frac{G_s}{G_s^c} \right\}^2 + \left\{ \frac{G_t}{G_t^c} \right\}^2 = 1 \quad (3)$$

式中断裂能 $G_i^c(i=n,s,t)$ 为胶层断裂韧性参数。

当胶层中出现损伤扩展后,使用式(4)对胶层中各方向上的刚度进行折减:

$$D = \begin{cases} 0 & \delta < \delta^0 \\ \frac{\delta^{\max}(\delta - \delta^0)}{\delta(\delta^{\max} - \delta^0)} & \delta^0 \leq \delta \leq \delta^{\max} \\ 1 & \delta^{\max} < \delta \end{cases} \quad (4)$$

式中 $K_i^0(i=n,s,t)$ 为胶层初始刚度。 δ^0, δ^{\max} 为胶层位移参数。 δ^0 通过胶层强度及初始刚度确定, δ^{\max} 通过胶层强度及断裂韧性确定。

采用弹塑性材料的连续损伤准则判定胶层内部的损伤^[7],如图6所示进行刚度降解。胶层模型的损伤演化过程是由弹塑性曲线 σ' 、等效塑性应变 ε_p^i 和失效塑性应变 ε_p^f 决定的。连续损伤模型损伤演化过程中的刚度降解过程是应力随着位移的变化而变化。

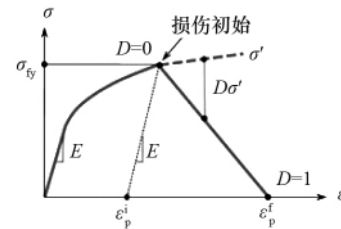


图6 连续损伤准则损伤演化
Fig.6 Damage evolution criteria of continuum damage model

连续损伤模型引入了损伤参数D,

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma' & \varepsilon_p < \varepsilon_p^i, D &= 0 \\ \sigma &= (1-D)\sigma' & \varepsilon_p < \varepsilon_p^f, 0 < D &\leq 1 \end{aligned} \quad (5)$$

连续损伤模型的判断依赖单元大小,所以需要计算出特征长度:

$$G_l = l_c g_l \quad (6)$$

G_l 是单元的应变能量; g_l 是单位体积的应变能量, g_l 对应图中曲线所围成的面积。设 σ_{ly} 是失效强度,因此失效时的总应变为

$$\varepsilon_l = \frac{2g_l}{\sigma_{ly}} = \frac{2G_l}{l_c \sigma_{ly}} \quad (7)$$

平均应变是

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_d \quad (8)$$

其中, E 为材料的弹性模量, ε_d 是损伤后产生的,

$$\varepsilon_d = \frac{1}{C_f} (\sigma_{yf} - \sigma) \quad (9)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{1}{C_f} (\sigma_{yf} - \sigma) = \frac{\sigma}{E} - \frac{\sigma}{C_f} + \frac{\sigma_{yf}}{C_f} \quad (10)$$

可以求出软化模量

$$\frac{1}{E_s} = \frac{1}{E} - \frac{1}{C_f} < 0 \quad (11)$$

当材料完全失效时, $\sigma = 0$ 和 $\varepsilon = \varepsilon_{f0}$

$$C_f = \frac{\sigma_{fy}}{\varepsilon_f} \quad (12)$$

因此, 软化弹性模量为

$$E_s = \left(\frac{1}{E} - \frac{2G_f}{l_c \sigma_{fy}^2} \right)^{-1} \quad (13)$$

此时, 对应的失效位移为

$$\delta_f = l_c \varepsilon_f^f \quad (14)$$

此时, 可得出损伤变量 D 的计算公式

$$D = \frac{\delta - \delta_i}{\delta_f - \delta_i} \quad (15)$$

2.3 不同搭接长度的破坏载荷预测

采用上述准则分析单搭接接头有限元模型, 针对搭接长度由 10~40mm 的破坏载荷, 绘制载荷-搭接长度曲线, 参见图 7。

可以看出, 破坏载荷随搭接长度的增大而增大, 当搭接长度增大到 20mm 时, 破坏载荷不再随之陡增, 说明, 当搭接长度取 20mm 以上, 破坏载荷相差不多, 单搭接接头的拉伸性

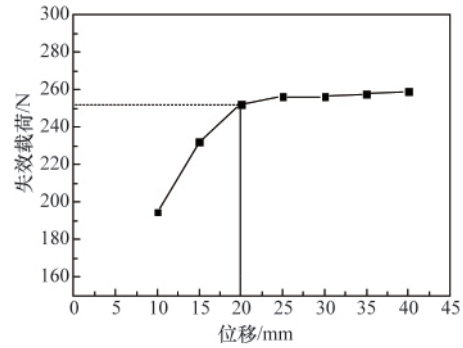


图 7 失效载荷随搭接长度的变化曲线

Fig. 7 Failure load against lap-length

能相似。因此, 搭接长度大于 20mm 的单搭接接头就能够达到一定的承载能力, 考虑材料增重等其他制约条件时, 搭接长度取 20mm 即可满足承载要求。

2.4 损伤扩展和损伤模式预测

分别针对搭接长度为 10、20 和 30mm 的单搭接接头的渐进破坏过程进行分析, 得出相应的载荷-位移曲线, 参见图 8 (a)~(c) 所示。图中 A、B、C 和 D 分别表述损伤起始点、载荷峰值 80% 点、载荷峰值点和最终破坏点。

图 9(a) 为模型的局部 (参考图 4 中的矩形框所示) 损伤云图。从图 9(a) 可以看出单搭接接头的渐进损伤过程, 损伤点 A 对应的结构没有发生损伤, 变形较小; 峰值载荷 80% (B 点) 状态搭接长度为 10、20 和 30mm 时, 对应损伤状态均有胶层-复合材料的界面发生部分损伤; 载荷峰值点 (C 点) 时, 对应胶层-复合材料界面损伤逐渐扩展, 胶层内部也发生损伤, 单元删除; 直至最终破坏点 (D 点), 损伤扩展, 胶层彻底失去

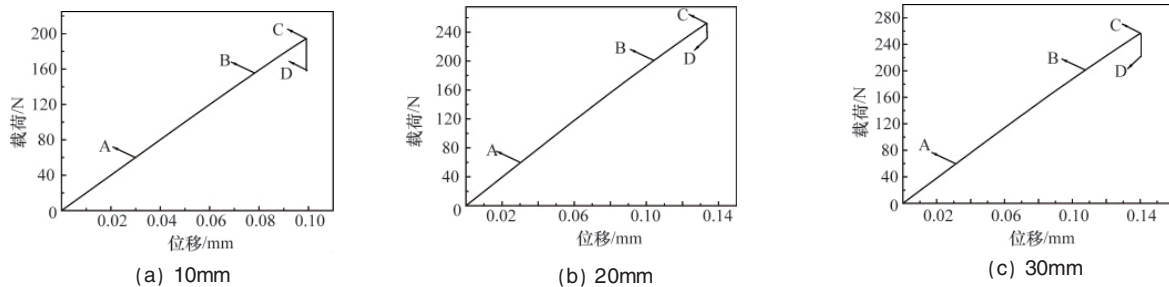
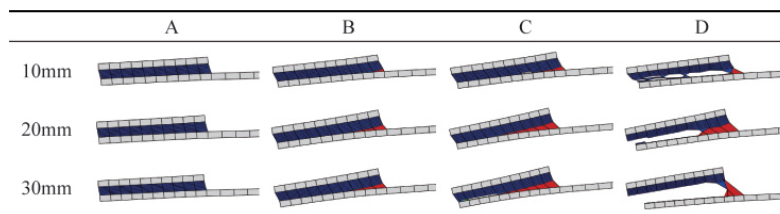


图 8 载荷点示意图

Fig. 8 Load point



(a) 损伤演化

(a) Damage distribution

图 9 渐进损伤过程中的应力和损伤分布

Fig. 9 Stress and damage distribution during the progressive damage

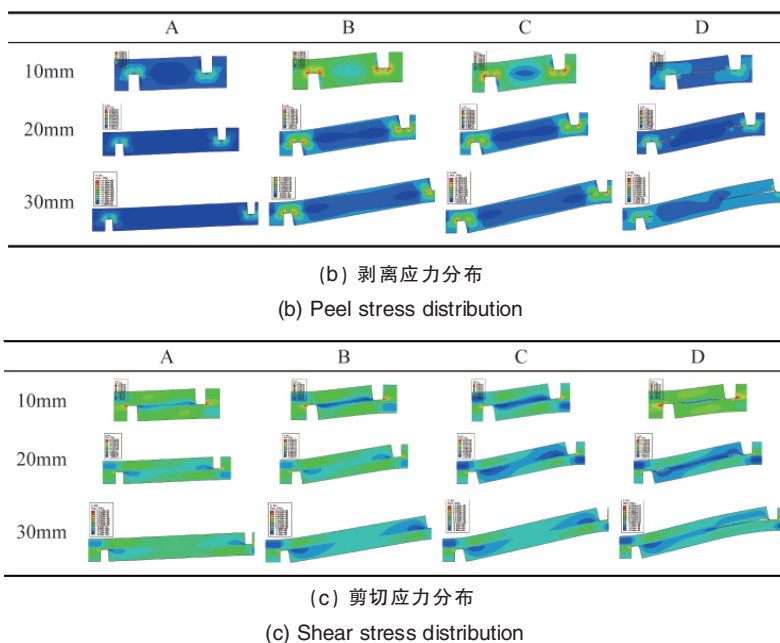
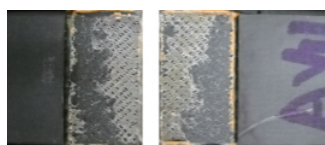


图 9 渐进损伤过程中的应力和损伤分布 (续)

Fig. 9 Stress and damage distribution during the progressive damage (continued)

承载能力。由图 9(b)、(c)可以看出,20 和 30mm 的应力分布相差不多,胶层中间区域应力较小,损伤从两边向中间逐渐扩展。10mm 的剪切应力水平相对较高,损伤发生时,相对搭接长度为 20 和 30mm 较快地扩展到整个胶层结构。

由图 9(a)和图 10 的破坏模式对比可知,有限元模拟结果与试验结果破坏模式基本相近,由示意图可以看出具体破坏路径,损伤位于胶接面的非自由端的胶层-复合材料界面和中部的胶层。



(a) 试验结果

(a) Experimental result



(b) 破坏模式侧视图

(b) Failure mode side-view

图 10 试件破坏模式及破坏模式示意图

Fig. 10 Failure mode of the test piece

3 结论

1) 由单搭接接头的应力分布可以看出,胶接区域边缘出现剪切和剥离的应力集中现象,损伤极易发生在胶层的边缘区域;搭接长度变大过程中,对应的最小剪切应力逐渐减小,当搭接长度增大到 20mm 时应力值变化有所减小,20~45mm

整体应力水平相差不多,搭接长度对剥离应力的影响较小。

2) 破坏载荷随着搭接长度的增大而增大,搭接长度大于 20mm 的单搭接接头的破坏载荷不再加速上升,能够达到一定的承载能力;由破坏模式的分析可知,20 和 30mm 的破坏模式相近,损伤位于胶接面的非自由端的胶层-复合材料界面以及中部的胶层,与试验结果相符。

参考文献 (References)

- [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: 146-176.
Chen Shaojie. Composite structures repair guide [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001: 146-176.
- [2] Gunnion A J, Herszberg I. Parametric study of scarf joints in composite structures[J]. Composite Structures, 2006, 75: 364-376.
- [3] Campilho R D S G, de Moura M S S F, Domingues J J M S. Modeling single and double-lap repairs on composite materials [J]. Composites Science and Technology, 2005, 65: 1948-1958.
- [4] Kim K S, Yi Y M, Cho G R, et al. Failure prediction and strength improvement of unidirectional composite single lap bonded joints [J]. Composite Structures, 2008, 82(4): 513-520.
- [5] Wang C H, Goh J Y, Ahamed J, et al. Damage tolerance analysis of adhesively bonded repairs to composites structures [C]. The 18th International Conference on Composite Materials, Jeju Island, South Korea, August 21-26, 2011.
- [6] Camanho P P, Davila C G. Mixed-mode decohesion finite elements for the simulation of delamination in composite materials [R]. NASA TM-2002-211737, Washington DC: NASA, 2002.
- [7] O'Mahoney D C, Katnam K B, O'Dowd N P, et al. Taguchi analysis of bonded composite single-lap joints using a combined interface-adhesive damage model[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013 (40): 168-178.

(责任编辑 齐志红)