

## 复合材料阶梯形胶接接头渐进损伤分析

乔 玉 周光明 刘伟先 陶伊凡

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京, 210016)

**摘要:**建立了复合材料层合板双阶梯形胶接接头的三维(3D)有限元模型,并进行了拉伸载荷下的渐进损伤分析(Progressive damage analysis, PDA)。采用含正交各向异性损伤的连续介质损伤力学(Continuum damage mechanics, CDM)本构方程对层合板进行描述。采用粘聚区模型(Cohesive zone model, CZM)对共胶接界面进行模拟。引入合适的损伤起始和损伤扩展准则,预测了双阶梯形胶接接头的损伤扩展方式和连接效率。进一步讨论了台阶长度、外加铺层搭接长度及厚度对失效模式及连接效率的影响。

**关键词:**复合材料;阶梯形接头;渐进损伤分析;粘聚区模型;连接效率

**中图分类号:** TB332      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2014)04-0632-06

## Progressive Damage Analysis for Stepped-Lap Joints of Adhesive-Bonded Composite

Qiao Yu, Zhou Guangming, Liu Weixian, Tao Yifan

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

**Abstract:** A three-dimensional (3D) finite element model is established for the progressive damage analysis (PDA) of the double-stepped-lap joints of adhesive-bonded composite under tensile loading. The laminate is modeled with the constitutive equations of continuum damage mechanics (CDM) in an orthotropic damage. The co-bonding layer is simulated by the cohesive zone model (CZM). Appropriate criteria are chosen to predict the initiation and progression of the damage. The failure modes and bonding efficiency of the double stepped-lap joints are predicted. Also, the effects of various parameters, such as step length, overlap length and thickness of the additional plies on the failure modes and bonding efficiency are investigated.

**Key words:** composite; stepped-lap joints; progressive damage analysis; cohesive zone model; bonding efficiency

目前复合材料结构连接传递载荷主要使用机械连接和胶接两种方式<sup>[1]</sup>。相对于机械连接,胶接具有零件数目少、结构轻、连接效率高、抗疲劳等突出的优点。平面形胶接连接主要承受面内载荷,连接方式包括:搭接连接、搭接板对接连接、阶梯形连接以及斜面连接等。其中,斜面连接和阶梯形连接方式能够有效地降低剥离应力。与斜面连接相比,

阶梯形连接结合面好,具有较好的工艺性,同时通过调整结构参数,可以获得较高的连接效率。

国外众多学者已经对阶梯形胶接接头的强度和结构参数进行了理论分析和试验研究。Hart-Smith<sup>[2]</sup>基于连续介质力学分析方法建立了二维(2D)模型,对拉伸载荷作用下斜面和阶梯形连接接头的应力、应变进行了数值分析。Kim<sup>[3]</sup>制作了

基金项目:江苏高校优势学科建设工程资助项目。

收稿日期:2013-10-06;修订日期:2013-11-14

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

具有不同台阶长度的共固化阶梯形连接试件进行试验,并建立了2D有限元模型,应用蔡-吴张量理论对胶层强度进行了分析,得到了只有在引入非线性性和材料正交各向异性属性的情况下,有限元分析才会较为准确的结论。Kim<sup>[4]</sup>制作了阶梯形连接试件并进行了拉伸和疲劳试验,考察了台阶个数、台阶长度及斜角对其拉伸强度和疲劳性能的影响。Beylergil<sup>[5]</sup>制作了玻璃纤维增强复合材料层合板阶梯形接头,进行压缩试验。并建立了三维(3D)有限元模型,分别以蔡-吴准则和抛物型准则为粘附破坏和内聚破坏准则,数值分析与试验结果较为一致,得到了屈曲载荷随台阶长度缓慢增长的结论。国内对阶梯形胶接接头的研究较少。复合材料阶梯形胶接接头连接效率较高,破坏形式可能包括胶层的脱胶和层合板的破坏,表现为多损伤的耦合失效模式。目前采用2D平面应力和平面应变的分析方法往往无法完全考虑到层间正应力、剪应力以及自由边界效应这些对破坏影响较大的因素。采用3D单元的模拟也只是对应力、应变变化的分析,加上失效准则后,虽能得到阶梯形连接的失效载荷和破坏位置,但未能描述损伤扩展过程及失效路径。而渐进损伤分析(Progressive damage analysis, PDA)作为近年来复合材料强度分析的主流方法,在复合材料斜面胶接<sup>[6]</sup>、含孔层合板强度预测<sup>[7]</sup>以及低速冲击损伤模拟<sup>[8]</sup>等方面得到了广泛的应用。

本文建立了复合材料层合板双阶梯形胶接接头的3D有限元模型,对其进行了拉伸载荷下的渐进损伤分析。分别采用含正交各向异性损伤的连续介质损伤力学(Continuum damage mechanics, CDM)模型和粘聚区模型(Cohesive zone model, CZM)对复合材料层合板和共胶接界面进行模拟,分析了双阶梯形胶接接头的损伤扩展方式和拉伸强度,并讨论了台阶长度、外加铺层搭接长度及厚度变化对拉伸性能和失效模式的影响。

## 1 渐进损伤模型

### 1.1 复合材料损伤模型

单层复合材料的应力-应变关系如式(1)所示

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon} \quad (1)$$

式中  $\mathbf{C}$  为正交各向异性材料的刚度矩阵。

定义材料坐标系:1为纤维方向,2为面内垂直于纤维的方向,3为面外法向。定义损伤状态变量  $d_i (i=1,2,3)$  表示垂直于第  $i (i=1,2,3)$  材料方向上有效承载面积的减小比例,其值在  $0 \sim 1$  之间,0

表示  $i$  方向无损伤,1表示  $i$  方向完全失效。

当材料发生损伤后,引入由损伤向量  $\mathbf{D} = [d_1, d_2, d_3]^T$  表示的损伤矩阵  $\mathbf{M}(\mathbf{D})$

$$\mathbf{M}(\mathbf{D}) = \text{diag}[d_{11}, d_{22}, d_{33}, d_{12}, d_{13}, d_{23}] \quad (2)$$

则有效应力为

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{M}(\mathbf{D}) : \boldsymbol{\sigma} \quad (3)$$

式中  $d_{ij} = 1/\sqrt{(1-d_i)(1-d_j)}$  ( $i, j=1,2,3$ )。

根据能量等效性假设,损伤后的刚度矩阵为

$$\mathbf{C}_D = \mathbf{M}(\mathbf{D})^{-1} : \mathbf{C}_0 : \mathbf{M}(\mathbf{D})^{-T} \quad (4)$$

则基于CDM的复合材料本构方程为

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{C}_D : \boldsymbol{\varepsilon} \quad (5)$$

基于损伤前后应变的连续性,本文选用应变描述的三维Hashin准则<sup>[9]</sup>作为损伤起始判据,引入基于应变描述连续变化的综合变量  $F_i (i=1,2,3)$ ,考察损伤状态变量的演化,其定义为

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

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

$$F_3^2 = \begin{cases} \left(\frac{\varepsilon_{33}}{\varepsilon_{33}^T}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{13}}{\gamma_{13}^f}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{23}}{\gamma_{23}^f}\right)^2 & \varepsilon_{33} \geq 0 \\ \left(\frac{\varepsilon_{33}}{\varepsilon_{33}^C}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{13}}{\gamma_{13}^f}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{23}}{\gamma_{23}^f}\right)^2 & \varepsilon_{33} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\varepsilon_{ii}^T, \varepsilon_{ii}^C (i=1,2,3)$  分别表示  $i$  方向的最大拉伸,压缩应变;  $\gamma_{ij}^f (i, j=1,2,3, i \neq j)$  表示  $ij$  面内的最大剪切应变。

定义损伤状态变量如式(7)所示

$$d_i = \begin{cases} 0 & F_i \leq 1 \\ 1 - \exp[(1 - F_i)/m_i] & F_i > 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中  $m_i$  为  $i$  方向损伤速率影响因子,控制指数下降速率。

在ABAQUS软件中编写VUMAT子程序<sup>[10]</sup>,嵌入材料本构方程和失效判据,进行计算。

### 1.2 界面损伤模型

复合材料阶梯形胶接接头存在共胶接界面,可使用CZM进行模拟。ABAQUS软件中提供了基于CZM的cohesive单元<sup>[10]</sup>,该单元上作用有3个力:法向的正应力  $\sigma_n$  和切向的作用力  $\sigma_s, \sigma_t$ ; 用  $\delta_n, \delta_s$  和  $\delta_t$  表示变形;  $\varepsilon_n, \varepsilon_s$  和  $\varepsilon_t$  表示应变。本文选用线弹性-线性软化本构模型,其本构关系为

$$\begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \sigma_s \\ \sigma_t \end{Bmatrix} = (1-D) \begin{bmatrix} K_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_n \\ \epsilon_s \\ \epsilon_t \end{Bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $K_{nn}, K_{ss}, K_{tt}$  分别为法向和切向的两个刚度;  $D$  为损伤系数, 其表达式为

$$D = \begin{cases} 0 & \delta < \delta^0 \\ \frac{\delta^{\max}(\delta - \delta^0)}{\delta(\delta^{\max} - \delta^0)} & \delta^0 \leq \delta \leq \delta^{\max} \\ 1 & \delta > \delta^{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\delta$  为加载过程中的有效位移;  $\delta^0, \delta^{\max}$  分别为单元刚度退化和失效的临界位移值。

以二次准则作为损伤起始判据, 表达式为

$$\left\langle \frac{\sigma_n}{\sigma_n^0} \right\rangle^2 + \left\langle \frac{\sigma_s}{\sigma_s^0} \right\rangle^2 + \left\langle \frac{\sigma_t}{\sigma_t^0} \right\rangle^2 = 1 \quad (10)$$

式中:  $\langle \sigma_i \rangle = \begin{cases} \sigma_n & \sigma_n > 0 \\ 0 & \sigma_n \leq 0 \end{cases}$ ;  $\sigma_i^0$  ( $i = n, s, t$ ) 分别为界面

法向和切向上的强度值。

以基于能量的 BK 准则为损伤扩展判据, 其表达式如下

$$G^C = G_n^C + (G_s^C - G_n^C) \left( \frac{G_M}{G_N} \right)^\eta \quad (11)$$

式中:  $G_i^C$  ( $i = n, s, t$ ) 为法向和两个切向的临界能量释放率;  $G_M = G_s + G_t$ ;  $G_N = G_s + G_t + G_n$ ;  $G_i$  ( $i = n, s, t$ ) 为法向和两个切向的能量释放率。对于玻璃环氧树脂复合材料, 指数  $\eta = 2 \sim 3$ 。

## 2 有限元模型

复合材料阶梯形胶接接头分单阶梯形和双阶梯形两种, 包括复合材料层合板、胶接界面及外加铺层 3 部分。本文以双阶梯形胶接接头为例, 其总长 100 mm, 宽 10 mm, 复合材料单层厚度  $h$  为 0.4 mm, 按顺序  $[0/+45/90/-45]_s$  进行铺设。其几何外形如图 1 所示。因其结构沿厚度方向具

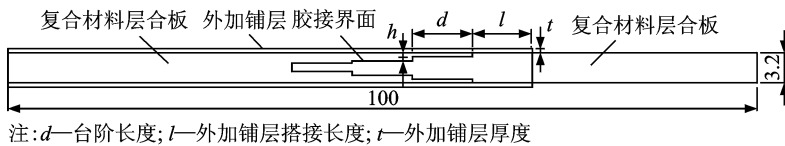


图 1 双阶梯形胶接接头几何外形截面图

Fig. 1 Sectional view of the double-stepped-lap joint of adhesive-bonded composite



图 2 双阶梯型胶接接头有限元模型

Fig. 2 Finite element model of the double-stepped-lap joint of adhesive-bonded composite

有对称性, 建模时只取其一半进行网格离散。层合板及外加铺层使用 C3D8R 单元 (8 节点六面体减缩积分单元), 胶接界面使用 COH3D8 单元 (8 节点三维内聚力单元) 进行模拟。建立的有限元模型如图 2 所示。

试验测得复合材料力学性能参数见表 1。表 1 中,  $E_{ii}$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 分别为  $i$  方向上的弹性模量;  $G_{ij}$ ,  $\mu_{ij}$ ,  $S_{ij}$  ( $i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3; i \neq j$ ) 分别为  $ij$  平面内的剪切模量、泊松比和剪切强度;  $X_T, Y_T, Z_T$  分别为 1, 2, 3 方向上的拉伸强度;  $X_C, Y_C, Z_C$  分别为 1, 2, 3 方向上的压缩强度。

表 1 复合材料力学性能参数

Tab. 1 Mechanical properties of the composite

参数	$E_{11}/$ MPa	$E_{22}=E_{33}/$ MPa	$G_{12}=G_{13}/$ MPa	$G_{23}/$ MPa
参数值	40 460	9 610	4 880	3 300
参数	$\mu_{21}=\mu_{31}$	$\mu_{23}$	$X_T/\text{MPa}$	$X_C/\text{MPa}$
参数值	0.07	0.45	1 096.0	673.4
参数	$Y_T=Z_T/MPa$	$Y_C=Z_C/MPa$	$S_{12}=S_{13}/$ MPa	$S_{23}/$ MPa
参数值	69.7	156.3	63.0	38.2

胶接界面力学性能参数主要包括刚度、强度及临界能量释放率。用双悬臂梁 (Double cantilever beam, DCB) 试验测得 I 型层间断裂临界能量释放率  $G_{IC} = 0.368 \text{ N/mm}$ , 用端部缺口弯曲 (End notched flexure, ENF) 试验测得 II 型层间断裂临界能量释放率  $G_{IIC} = 0.702 \text{ N/mm}$ 。CZM 对刚度参数不敏感, 取为  $K_N = K_S = K_T = 10^6 \text{ MPa}^{[11]}$ , 强度参数由反演方法<sup>[12]</sup>求得  $\sigma_{NC} = 20.0 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{sc} = \sigma_{TC} = 28.7 \text{ MPa}$ 。

在模型左端施加位移约束  $U_1 = U_2 = U_3 = 0$ , 对称面施加位移约束  $U_3 = UR_1 = UR_2 = 0$ , 右端施

加位移载荷。使用 ABAQUS/Explicit 显示分析进行求解。输出层合板及界面损伤变量,加载点位移及支反力。

### 3 结果及分析

为分析台阶长度  $d$ 、外加铺层搭接长度  $l$  及厚度  $t$  对接头拉伸强度的影响,建立了多个模型,分析接头的损伤扩展模式及极限强度。为便于比较,引入连接效率的概念,它指接头强度占层合板强度的百分比。

#### 3.1 台阶长度对连接效率的影响

为比较台阶长度对连接效率的影响,建立了无外加铺层,  $d=1.6, 2.4, 3.2, 4.0, 4.8, 5.6, 6.4, 7.2, 8.0$  mm 的有限元模型。图 3 为拉伸载荷下连接效率随台阶长度变化的关系图。可以看出,随着  $d$  的增加,连接效率起初增长较快,后变缓慢,当  $d>6.4$  mm 后,连接效率基本不再变化。

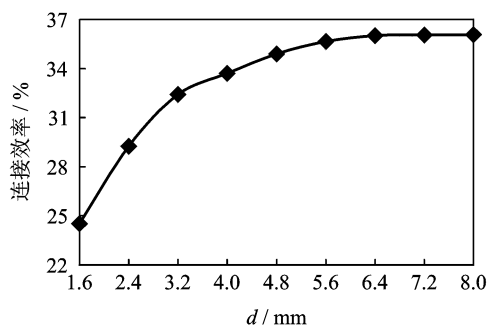


图 3 连接效率随台阶长度的变化图

Fig. 3 Change curve of bonding efficiency verse step length

查看胶接接头的损伤扩展过程,可以发现:对接界面先于搭接界面发生损伤和破坏,尤其是  $0^\circ$  层对接界面。接着,损伤向  $0^\circ$  与  $45^\circ$  搭接界面扩展。对于  $d$  为  $1.6\sim 2.4$  mm 的接头,由于台阶长度较短,  $0^\circ$  与  $45^\circ$  搭接界面完全破坏后,接头仍未发生破坏,损伤继续向  $45^\circ$  与  $90^\circ$  搭接界面扩展,随着拉伸载荷的增长,第二级台阶处由于应力集中发生基体破坏,胶接接头达到极限强度,而第一级台阶始终未发生损伤。 $d=1.6$  mm 接头的最终破坏模式如图 4,5 所示,深色表示破坏。

随着  $d$  的增加,界面承载能力增强。当  $d$  处于  $3.2\sim 5.6$  mm 段时,在  $0^\circ$  与  $45^\circ$  搭接界面损伤破坏时,第一级台阶处出现损伤,但尚未达到极限强度。当损伤在  $45^\circ$  与  $90^\circ$  搭接界面扩展时,第二级台阶发生基体破坏。 $d=3.2$  mm 接头的最终破坏模式如图 6,7 所示。



图 4  $d=1.6$  mm 时胶接界面破坏模式

Fig. 4 Failure of the bonding interface when  $d=1.6$  mm

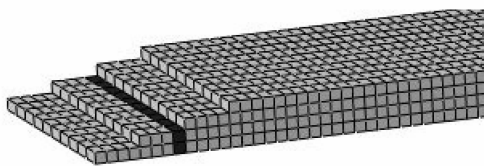


图 5  $d=1.6$  mm 时层合板破坏模式

Fig. 5 Failure of the laminates when  $d=1.6$  mm

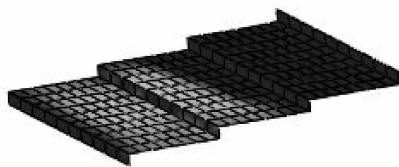


图 6  $d=3.2$  mm 时胶接界面破坏模式

Fig. 6 Failure of the bonding interface when  $d=3.2$  mm

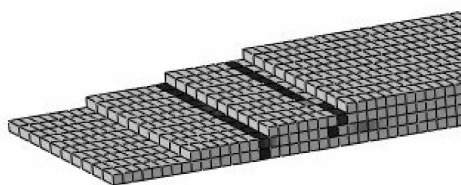


图 7  $d=3.2$  mm 时层合板破坏模式

Fig. 7 Failure of the laminates when  $d=3.2$  mm

$d$  继续增加,界面承载能力进一步增强。当  $d$  达到  $6.4$  mm 后,  $0^\circ$  与  $45^\circ$  搭接界面完全破坏前,第一级台阶处便发生基体破坏,接头达到极限强度。最终破坏模式如图 8,9 所示。至此,进一步增加台阶长度对接头拉伸强度将无贡献。

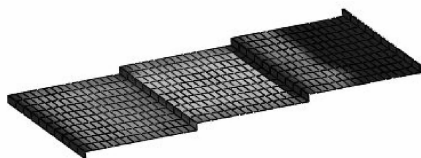
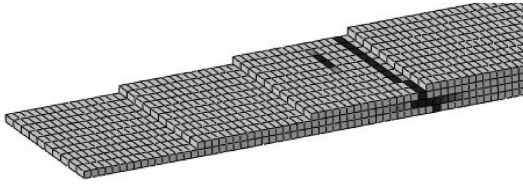


图 8  $d=6.4$  mm 时胶接界面破坏模式

Fig. 8 Failure of the bonding interface when  $d=6.4$  mm

#### 3.2 外加铺层搭接长度对连接效率的影响

为考察外加铺层长度  $l$ 、厚度  $t$  对连接效率的

图9  $d=6.4$  mm 时层合板破坏模式Fig. 9 Failure of the laminates when  $d=6.4$  mm

影响,使用厚度为  $0.1$  mm 的单向带按  $0^\circ$  方向铺设,假设其材料参数及胶接界面性能与上文相同。取台阶长度  $d=6.4$  mm,建立了外加铺层厚度  $t=0.2, 0.4, 0.8$  mm,搭接长度  $l=3.2, 4.8, 6.4, 8.0, 9.6, 11.2, 12.8, 14.4$  mm 的有限元模型。图 10 为拉伸载荷下连接效率随外加铺层搭接长度变化的关系图。可以看出,外加铺层较大地增长了接头的连接效率,随着  $l$  的增加,连接效率初始增长较快,之后变慢,最终趋于最大值。

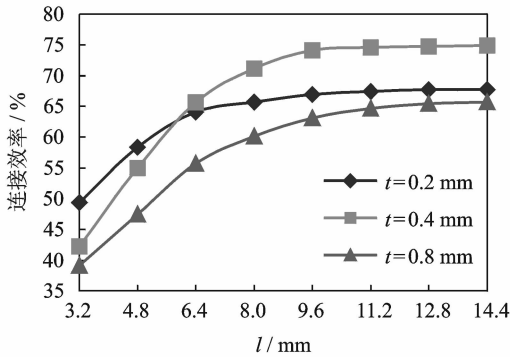


图10 连接效率随外加铺层搭接长度的变化图

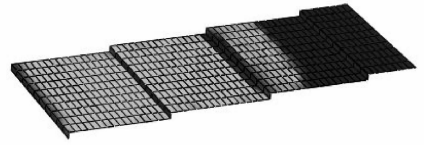
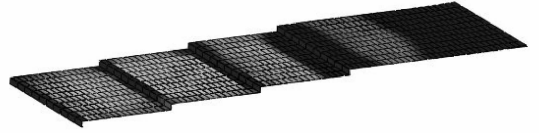
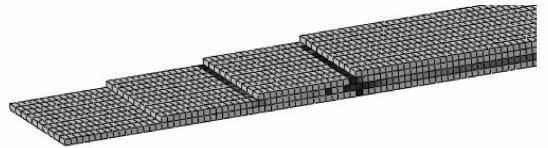
Fig. 10 Change curves of bonding efficiency verse overlap length of the additional plies

查看胶接接头的损伤扩展过程, $0^\circ$ 层对接界面最先出现损伤破坏,接着其他对接界面以及外加铺层搭接界面根部也出现破坏。随着拉伸载荷的增加,外加铺层搭接界面上损伤由两端向中间扩展。

以  $t=0.4$  mm 的接头为例进行分析。当  $l$  处于  $3.2\sim 11.2$  mm 段时,载荷增加过程中,外加铺层界面完全破坏,并迅速带动  $0^\circ$  与  $45^\circ$  层搭接界面破坏,层合板第一级台阶处发生基体破坏,接头达到极限强度。图 11 为  $l=3.2$  mm 接头胶接界面的最终破坏模式。层合板的破坏类似于图 9。

随着  $l$  的增加,界面承载能力增强,胶接连接效率也随之增加。当  $l$  达到  $12.8$  mm 后,外加铺层界面未完全破坏时,层合板本身在第一、二级台阶以及  $90^\circ$  层均发生破坏,接头达到极限强度。最

终破坏模式见图 12,13。

图11  $l=3.2$  mm 时胶接界面破坏模式Fig. 11 Failure of the bonding interface when  $l=3.2$  mm图12  $l=12.8$  mm 时胶接界面破坏模式Fig. 12 Failure of the bonding interface when  $l=12.8$  mm图13  $l=12.8$  mm 时层合板破坏模式Fig. 13 Failure of the laminates when  $l=12.8$  mm

### 3.3 外加铺层厚度对连接效率的影响

为考察外加铺层厚度  $t$  对连接效率的影响,取台阶长度  $d=6.4$  mm,建立了搭接长度  $l=6.4, 9.6, 12.8$  mm,厚度  $t=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$  mm 的有限元模型。图 14 为拉伸载荷下连接效率随外加铺层厚度变化的关系图。可以看出,随着  $t$  的增加,连接效率先增长后降低。

以  $l=9.6$  mm 的接头为例进行分析。最优铺层厚度出现在  $0.3\sim 0.4$  mm 处。由于内力按照刚度大小分配,当  $t$  小于此值时, $t$  越小,外加铺层受力越小,层合板受力越大。在外加铺层搭接界面完

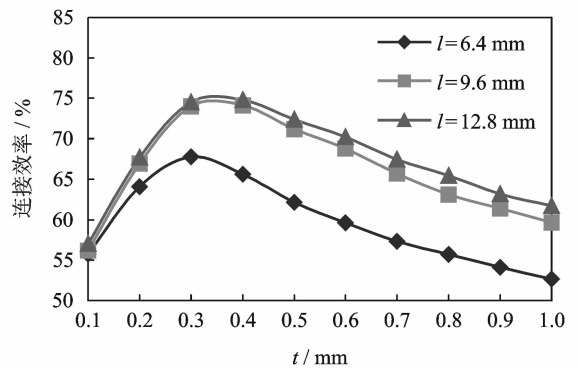


图14 连接效率随外加铺层厚度的变化图

Fig. 14 Change curves of bonding efficiency verse thickness of the additional plies

全破坏前,层合板自身便发生破坏。破坏模式类似于图 12,13。当  $t$  大于最优值时,随着  $t$  的增加,外加铺层承受的内力也相应增加,这将导致搭接界面传递的载荷增加,发生提前破坏,降低了胶接接头的连接效率。最终破坏模式类似于图 9,11。

## 4 结 论

本文建立了复合材料层合板双阶梯形胶接接头的 3D 有限元模型,按  $[0/+45/90/-45]_s$  进行铺层,对其进行了拉伸载荷作用下的渐进损伤分析,并考察了相关参数对其连接效率的影响,得到以下几点结论:

(1) 复合材料阶梯形胶接接头的破坏包括了胶接界面的破坏和层合板本身的破坏,表现为多损伤的耦合失效模式。

(2) 台阶长度的增加能够有限地增长接头的连接效率,当其超过一定值后,连接效率不再增长。

(3) 外加铺层能够较大地增长接头的连接效率,随着外加铺层搭接长度的增加,连接效率起初增长迅速,后变缓慢。

(4) 外加铺层厚度存在最优值,小于或大于此值,连接效率都将有所降低。

### 参考文献:

[1] 谢九鸣. 复合材料连接[M]. 上海:上海交通大学出版社,2011.  
Xie Jiuming. Joints for composites materials[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2011.

[2] Hart-Smith L J. Adhesive-bonded scarf and stepped-lap joints[R]. NASA-CR-112237, 1973.

[3] Kim S H, Lee S J, Lee D J. Development of a strength model for the cocured stepped lap joints under tensile loading[J]. Composite Structures, 1995, 32(1/2/3/4):593-600.

[4] Kim J H, Park B J, Han Y W. Evaluation of fatigue characteristics for adhesively-bonded composite stepped lap joint[J]. Composite Structures, 2004, 66(1/2/3/4):69-75.

[5] Beylergil B, Aktas A, Cunedioglu Y. Buckling and compressive failure of stepped-lap joints repaired with

composite patches[J]. Journal of Composite Materials, 2012, 46(26):3213-3230.

- [6] 刘伟先,周光明,王新峰. 基于渐进损伤模型的复合材料斜接接头的拉伸强度[J]. 材料科学与工程学报, 2012, 30(5):666-671.  
Liu Weixian, Zhou Guangming, Wang Xinfeng. Parametric study on the tensile strength of the composite's scarf joint using progressive damage model[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2012, 30(5):666-671.
- [7] 王跃全,童明波,朱书华. 基于 CDM 的复合材料层合板三维非线性渐进损伤分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(6):709-714.  
Wang Yuequan, Tong Mingbo, Zhu Shuhua. Three-dimensional nonlinear progressive damage analysis on composite laminates based on continuum damage mechanics[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 41(6):709-714.
- [8] 朱炜焱,许希武. 复合材料层合板低速冲击损伤的有限元模拟[J]. 复合材料学报, 2010, 27(6):200-207.  
Zhu Weiyao, Xu Xiwu. Finite element simulation of low velocity impact damage on composite laminates [J]. Acta Materiae Composite Sinica, 2010, 27(6):200-207.
- [9] Hashin Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites[J]. Journal of Applied Mechanics, 1980, 47(2):329-334.
- [10] Hibbit, Karlsson and Sorensen Inc. Abaqus 6. 10 documentation[EB/OL]. <http://abaqus.civil.uwa.edu.au;2080/v6.10/index.html>, 2010.
- [11] Davila C G, Camanho P P, de Moura M F. Mixed-Mode decohesion elements for analyses of progressive delamination[C]//Proceedings of the 42nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Seattle, WA: AIAA, 2001:179.
- [12] De Moura M, Goncalves J P M, Chousal J A G, et al. Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008, 28(8):419-426.