

粘接层厚度对斜接粘接接头承载能力的影响分析¹⁾

廖丽涓^{*2)}, 黄晨光^{*}

^{*} (中国科学院力学研究所 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190)

摘要: 本文利用有限元计算方法, 采用包含拉剪混合破坏模式的双线性内聚力模型, 讨论了内聚力模型中初始刚度、断裂能、内聚强度等内聚参数的粘接层厚度依赖性及其相应的选取方法, 重点关注了粘接层厚度对斜接粘接接头在单轴拉伸载荷作用下承载能力的影响。分析结果表明, 同一斜接角情况下, 斜接粘接接头可承受的极限载荷随着粘接层厚度的增加而减小。然而, 单纯以极限载荷为指标不足以评价粘接接头的承载能力, 需考虑极限载荷和加载位移两者的共同影响。在本文考虑的粘接层厚度范围内, 采用环氧类的韧性粘接剂, 提高粘接层厚度会提高斜接粘接接头的承载能力。同时, 由斜接角影响分析可知, 在给定的粘接剂厚度条件下, 斜接粘接接头的极限载荷及承载能力随着斜接角的增大而减小。

关键词: 粘接层厚度, 承载能力, 内聚力模型, 斜接粘接接头, 斜接角

引言

粘接不仅能将同种或异种的材料联接在一起, 相比较焊接、铆接、螺栓联接等传统的机械连接方式, 更具有避免热变形、不改变金相组织、避免应力集中、受力均匀、较高比强度、轻质等诸多优势, 进而在航空、航天、交通运输、桥梁及建筑等工业领域中凸显巨大的应用前景^[1-2]。针对于不同的结构需求, 粘接接头构型的种类多样, 常见的主要包括单搭接^[3-4]、双搭接^[5-6]、对接^[7-8]、斜接^[9-10]、阶梯接^[10-11]等形式, 以往的研究对不同类型的粘接接头强度、粘接界面应力分布情况等做了大量的研究, 并考虑了几何尺寸、结构形式、加载条件及环境等对粘接强度的影响; 而在目前的研究过程中, 越来越多地采用数值模拟与实验相结合的方法, 在粘接接头的宏观强度、局部变形、断裂部位、断口形貌、粘接界面微观组织等方面做了分析, 提出了一系列结构优化设计的新思路。

在众多的影响因素中, 粘接层厚度对粘接接头性能的影响一直以来都是分析研究的关注点。基于工程中对粘接层厚度控制的优化过程, 一般希望能在节约用胶量的前提下保证粘接接头的总体强韧性^[12]。对于粘接层厚度对粘接接头的影响, 基于以往的研究结果, 其影响规律根据研究对象的不同而得出了差异性的结论。Chai^[13]的研究表明粘接层厚度的增大会降低最终失效应变及断裂强度, 但该影响随着厚度的增加变得越来越不明显; 而 Kahrama 等人^[14]通过铝板单搭接实验得出粘接层厚度与总体的结合强度影响并不明显; Marzi^[15]的研究则表明断裂韧性会随着粘接层厚度的增大而增大。由此看来, 粘接层厚度的影响规律并没有得到统一的认识, 需要进一步深入详细地分析。

在分析的手段和方法方面, 内聚力模型在模拟粘接层的开裂和破坏过程有一定的优势, 而粘接层的厚度会影响内聚力模型中的相关参数。许巍等^[12, 16]通过对粘接剂总断裂能、界面刚度及分离强度等内聚参数厚度依赖的分析, 给出了相关参数与粘接层厚度的数学表达式, 为根据粘接层确定内聚参数提供了参考。

基于已有的研究成果, 在本文的研究中, 以斜接接头为研究对象, 选用典型的环氧类粘接剂, 拟利用有限元模拟这一直观表征的方法, 分析粘接层厚度对单轴拉伸载荷作用下典型粘接接头承载能力的影响。在采用的内聚力模型中, 重点讨论粘接层厚度对初始刚度、断裂能、内聚强度等关键参数选取的影响。同时, 由于斜接接头粘接界面上拉剪混合的复杂应力状态, 则其拉剪混合模式的破坏形式在内聚力模型中也有所考虑。在所建立的计算方法中, 考察影响斜接接头承载能力的因素及表征方法。此外, 斜接角对粘接接头性能的影响应作相应的分析。

1) 国家自然科学基金项目(11202222)资助。

2) 通讯作者. E-mail: ljl@imech.ac.cn

1 数值模拟

1.1 分析模型

为得到粘接层厚度对粘接接头承载能力的影响规律, 本文选取斜接粘接接头为研究对象, 其结构形式、几何尺寸、边界条件等如图 1 所示。具有相同尺寸的上下两块被粘接体由粘接剂胶结在一起, 形成斜接角为 θ 的粘接接头结构, 其几何尺寸为: 宽度 $w=27.7 \text{ mm}$, 长边 $l=92.0 \text{ mm}$ ^[17], 斜接角 θ 取 30° 、 45° 、 60° 。由于粘接接头的厚度远小于其宽度, 则可将该问题简化为平面应变问题 (采用二维平面 xoy 坐标系)。分析模型的下端采用全约束, 在上端采用位移加载 (u_y) 的方式实现 y 向拉伸载荷的模拟。

将被粘接体定义为各向同性的弹性体, 采用了四节点平面应变单元, 其弹性模量 E 及泊松比 ν 分别取 209 GPa 、 0.29 。此外, 粘接层采用单层四节点内聚力单元模拟。

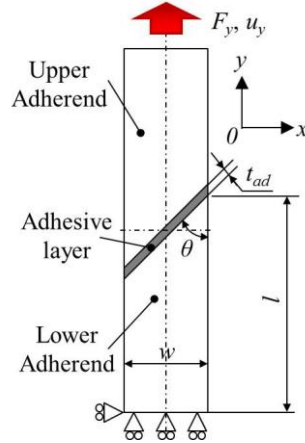


图 1 斜接粘接接头有限元分析模型

Fig.1 A model of scarf adhesive joint for FEM calculations with dimensions and boundary conditions

1.2 内聚力模型

内聚力模型是由内聚应力 (traction) 和开裂相对位移 (separation) 的关系曲线 (T-S 曲线) 来定义界面的本构关系, 其中的重要内聚参数主要包括内聚强度和断裂能。本文采用双线性内聚力模型用以模拟粘接界面的开裂和破坏过程, 其 T-S 关系如图 2 所示^[12, 16]。由于斜接接头在单轴拉伸载荷作用下, 其粘接界面呈现拉-剪混合的复杂应力状态, 故而其界面破坏形式为 I 型和 II 型混合的破坏形式。则粘接界面的断裂能表示为:

$$G_i = 1/2 \sigma_{u,i} \delta_{u,i} \quad (1)$$

其中: $i=I, II$, 分别表示 I 型和 II 型破坏形式; $\sigma_{u,i}$ 表示相对应的内聚强度; $\delta_{o,i}$ 和 $\delta_{u,i}$ 分别表示临界分离量和最大分离量。在界面复杂应力状态下, 损伤起始及其相应的刚度退化会先于界面应力达到临界分离强度时产生, 本文采用二次应力判据定义界面层损伤的萌生:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\sigma_I}{\sigma_{u,I}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{II}}{\sigma_{u,II}}\right)^2 &= 1 & \text{if } \sigma_I \geq 0 \\ \sigma_{II} &= \sigma_{u,II} & \text{if } \sigma_I \leq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

其中: σ_i ($i=I, II$) 表示相应对的内聚应力值; 该判据包含的物理意义为纯压缩应力条件下不会导致损伤。同时, 判断界面断裂采用幂指数准则, 本文中的指数幂取 1, 可表示为:

$$\frac{G^I}{G_I} + \frac{G^{II}}{G_{II}} = 1 \quad (3)$$

其中： G^I 和 G^{II} 分别表示 I 型和 II 型破坏过程中的张力和其功共轭位移共同做的功。

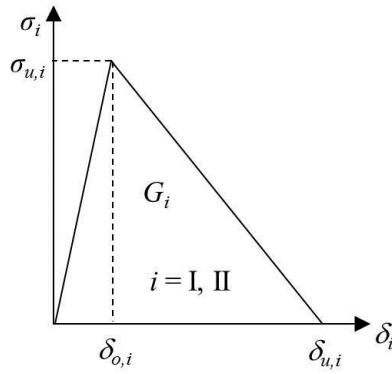


图 2 双线性内聚力模型的 T-S 曲线

Fig.2 Schematic bilinear traction-separation law of cohesive zone model [12, 16]

1.3 粘接层厚度依赖的内聚参数

基于所采用的双线性内聚力模型（如图 2 所示），确定其控制特性的参数有初始刚度（ k_0^i ，T-S 曲线上升段的斜率）、断裂能（ G_i ，T-S 曲线所包络的面积）及内聚强度（ $\sigma_{u,i}$ ，T-S 曲线的峰值）。本文中定义的粘接界面为起胶结作用的界面相，作为一种广义的界面，其厚度特征体现在表征其本构特性的内聚力模型中，与所建模型的几何尺寸无关[12, 16]。

初始刚度与粘接层的厚度 t_{ad} 有密切联系，其计算公式如下[12, 16, 18-19]：

$$\begin{aligned} k_0^I &= \frac{E}{t_{ad}} \\ k_0^{II} &= \frac{G}{t_{ad}} \end{aligned} \quad (4)$$

其中： E 和 G 分别为粘接剂的弹性模量和剪切模量。

而对于断裂能，研究表明：其包含本征断裂能（ G_0 ）和粘接层塑性耗散能（ G_p ）两部分，同时具有较强的厚度依赖性，可由下式表示：

$$G = G_0 + G_p = \begin{cases} G_0 + A_c t_{ad} & (t_{ad} < 2r_p^{\max}(90^\circ)) \\ G_0 + 2A_c r_p^{\max}(90^\circ) & (t_{ad} \geq 2r_p^{\max}(90^\circ)) \end{cases} \quad (5)$$

在本文考虑的平面应变条件下小范围屈服裂纹尖端塑性区的大小为 $r_p^{\max}(90^\circ)$ 。式（5）中：本征断裂能 G_0 取决于所采用的粘接剂；当粘接层的厚度小于 $2r_p^{\max}(90^\circ)$ 时，塑性耗散能可由 $G_p \approx A_c t_{ad}$ 估算获取， A_c 为粘接剂应力应变曲线所包络的面积；当粘接层的厚度较大时，超过了临界厚度 t_c （ $t_c = 2r_p^{\max}(90^\circ)$ ）时，裂纹尖端塑性区的尺寸不再继续增大，保持在 $2r_p^{\max}(90^\circ)$ 水平[16, 20]。

内聚强度会随着粘接层的厚度发生相应的变化[21-23]。许巍等人[12, 16]的研究工作给出了内聚强度与粘接层厚度之间的关系，他们认为：当粘接层厚度超过临界厚度 t_c 时，内聚强度 σ_u 可取为粘接剂的宏观断裂强度 σ_f ，进而表示为：

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_f} = \begin{cases} \sqrt{\frac{1 + \eta \left(\frac{t_{ad}}{t_c}\right)}{t_c}} & (t_{ad} < t_c) \\ (1 + \eta) \left(\frac{t_{ad}}{t_c}\right) & (t_{ad} < t_c) \\ 1 & (t_{ad} \geq t_c) \end{cases} \quad (6)$$

其中： η 为考虑塑性耗散断裂韧性和不考虑塑性耗散断裂韧性之比，表示为 $\eta=A_c t_{ad}/G_0$ 。

本文选取一种韧性粘接剂 Hysol EA9361，其材料属性如表 1 所示。

表 1 Hysol EA9361（韧性）粘接剂的材料属性^[24]
Table 1 Adhesive constitutive parameters of Hysol EA9361 (ductile)^[24]

E (GPa)	ν	σ_f (MPa)	$G_{0,I}$ (N/mm) (mode I)	$G_{0,II}$ (N/mm) (mode II)
0.67	0.40	7.99	2.61	5.22

许巍在其博士研究中给出了该种粘接剂的裂纹尖端塑性区估计值 $r_p^{\max}(90^\circ)$ ，I 型和 II 型分别为 24.70 mm 和 49.40 mm^[12]。

2 计算结果及讨论

2.1 最大拉伸载荷的粘接层厚度依赖性

斜接接头在单轴拉伸过程中，随着加载位移 u_y 的不断增大，拉伸载荷 F_y 也随着不断增大。加载到一定程度，拉伸载荷会随着粘接层发生损伤破坏而不断下降直至为零。图 3 所示为斜接接头的载荷位移曲线，其中，拉伸载荷 F_y 为斜接接头单位厚度上的合力。由图可知，在加载的初始阶段，载荷随着加载位移的增大呈线性增长趋势，直至达到峰值（定义为极限载荷，标记为 F_u ）；随后进入下降阶段，且下降地极为缓慢，经历了相当长的加载位移后载荷下降为零，表现出明显的韧性特征。

图 4 所示为极限载荷随斜接角的变化曲线。由图可知，在特定斜接角条件下，极限载荷随着粘接层厚度的增大而减小。斜接接头可承受的极限载荷 F_u 取决于所采用粘接剂的内聚强度 σ_u 。对公式（6）相对于 t_{ad} 求导，如式（7）所示：

$$\frac{\partial \sigma_u}{\partial t_{ad}} = \begin{cases} \frac{\sigma_f G_0 (A_c t_{ad}^2 - 2A_c t_c t_{ad} - G_0 t_c)}{t_{ad}^2 (A_c t_{ad} + G_0)^2} \sqrt{\frac{A_c t_{ad}^2 + G_0 t_c}{t_{ad} (A_c t_{ad} + G_0)}} & (t_{ad} < t_c) \\ 0 & (t_{ad} \geq t_c) \end{cases} \quad (7)$$

则内聚强度关于粘接层厚度的一阶偏导数在临界厚度 t_c 的范围内恒为负值，故而其关于粘接层厚度 t_{ad} 单调递减，由此可见，内聚强度随着粘接层厚度的增加而单调减小，从而导致斜接接头可承受的极限载荷随粘接层厚度的增大而减小。同时，随着斜接角的增大，其可承受的极限载荷成下降趋势。

2.2 粘接接头承载能力的粘接层厚度依赖性

对于给定的斜接角，如图 3 所示，其最大加载位移会随着粘接层厚度的增大而增大。由此，单纯以极限载荷为指标不足以评价粘接接头的承载能力。粘接接头的破坏与极限载荷及加载位移相关。故而，考虑极限载荷与加载位移共同的影响，以拉伸载荷所做的功来评价粘接接头的承载能力，记为破坏能 E_f ，由下式定义：

$$E_f = \int_0^{u_{y\max}} F_y du_y \quad (7)$$

其中： $u_{y\max}$ 是直至斜接接头完全断裂时施加的最大位移。该表达式代表载荷位移曲线所包络的面积。图 5 所示为斜接接头的破坏能与斜接角的关系曲线。由图可知，斜接接头的破坏能随着粘接层厚度的增大而增大。粘接接头可承受的极限载荷与加载位移共同影响粘接接头的承载能力，粘接层厚度对粘接接头承载能力的影响与所采用粘接剂的性能密切相关。采用韧性粘接剂的情况下，在载荷极限之后，其对于载荷的变化并不十分敏感，但其加载位移可以不断增大到相当大的值而不发生破坏。

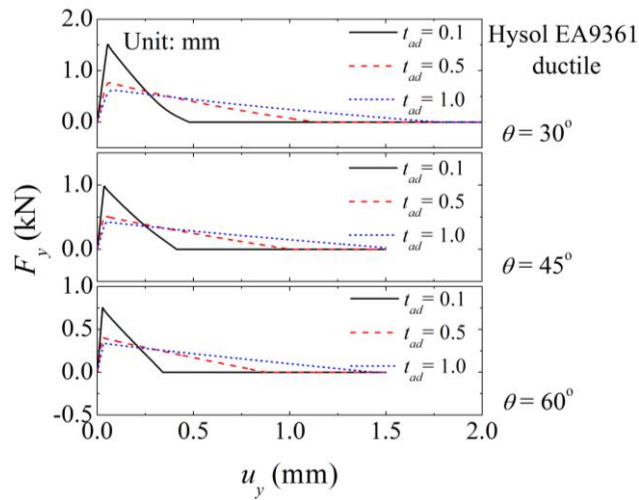


图3 斜接接头的载荷位移曲线（三种粘接层厚度、三种斜接角）

Fig.3 Loading (F_y) vs. displacement (u_y) curves of scarf adhesive joints (in cases of three types of t_{ad} & θ)

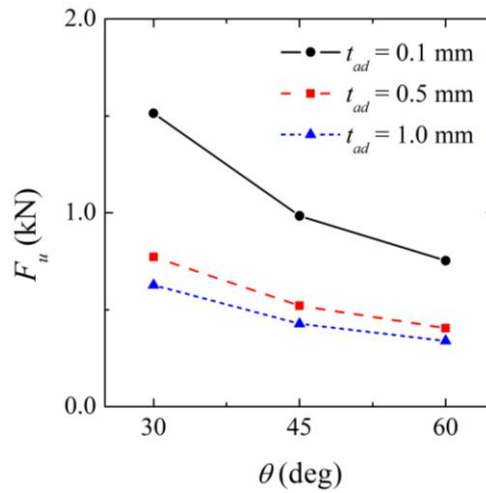


图4 极限载荷与斜接角的关系曲线（三种不同粘接层厚度）

Fig.4 Ultimate loading (F_u) vs. scarf angle (θ) curves of scarf adhesive joints (in cases of three types of t_{ad})

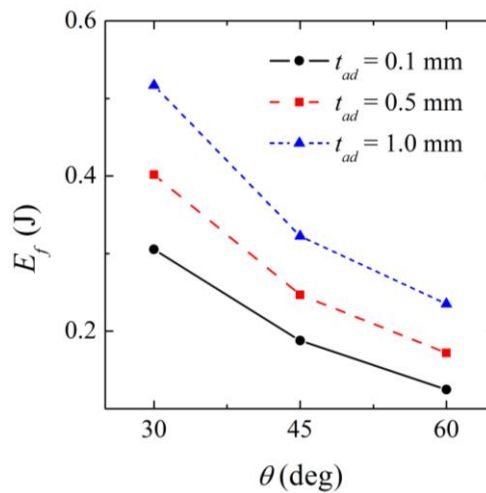


图5 破坏能与斜接角的关系曲线（三种不同粘接层厚度）

Fig.5 Fracture energy (E_f) vs. scarf angle (θ) curves of scarf adhesive joints (in cases of three types of t_{ad})

3 结论

本文采用包含拉剪混合破坏形式的双线性内聚力模型，重点关注了粘接层厚度对斜接接头在单轴拉伸载荷作用下承载能力的影响。采用韧性粘接剂，讨论了内聚力模型中初始刚度、断裂能、内聚强度等关键参数的粘接层依赖性及相应的选取方法，并分析计算了粘接层厚度 t_{ad} 分别为 0.1mm、0.5mm、1.0mm 及斜接角 θ 分别为 30°、45°、60° 多种模型的承载能力。结果表明，在给定的斜接角条件下，斜接接头的极限载荷随着粘接层厚度的增加而减小；但是单纯以极限载荷为指标不足以评价粘接接头的承载能力，需考虑极限载荷和加载位移两者的共同影响。采用韧性粘接剂的情况下，在本文考虑的粘接层厚度范围内，提高厚度能够增强粘接接头的承载能力；在给定的粘接层厚度情况下，斜接接头的极限载荷和承载能力随着斜接角的增大而减小。

参考文献

- 1 胡高平, 袁红英, 肖卫东. 金属用胶黏剂及粘接技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 材料科学与工程出版中心, 2003. (Hu Gaoping, Yuan Hongying, Xiao Weidong. Beijing: Chemical Industry Press, 2003 (In Chinese))
- 2 游敏, 郑小玲. 胶接强度分析与应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009. (You Min, Zheng Xiaoling. Structural Adhesive Bonding Strength, Analysis and Applications. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology press, 2009 (In Chinese))
- 3 da Silva Lucas FM, Carbas RJC, Critchlow GW, et al. Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints [J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2009, 29: 621-632.
- 4 Grant LDR, Adams RD, da Silva Lucas FM. Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry [J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2009, 29: 405-413.
- 5 Naghdali Choupani. Characterization of fracture in adhesively bonded double-lap joints [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009, 29(8): 761-773.
- 6 Tsai MY, Morton J. An investigation into the stresses in double-lap adhesive joints with laminated composite adherends [J]. International Journal of Solids and Structures, 2010, 47(24): 3317-3325.
- 7 Seo DW, Kim JK. Tensile, bending and shear strength distributions of adhesive-bonded butt joint specimens [J]. Composite Science and Technology, 2005, 65(9): 1421-1427.
- 8 Costa-Mattos HS, Monteiro AH, Sampaio EM. Modeling the strength of bonded butt-joints [J]. Composites Part B: Engineering, 2010, 41(8): 654-662.
- 9 Kumar SB, Sridhar I, Sivashanker S, et al. Tensile failure of adhesively bonded CFRP composite scarf joints [J]. Materials Science and Engineering, 2006, B 132: 113-120.
- 10 Mortensen Flemming, Thomsen Ole Thybo. Simplified linear and non-linear analysis of stepped and scarfed adhesive-bonded lap joints between composite laminates [J]. Composite Structures, 1997, 38(1-4): 281-294.
- 11 Sawa T, Ichikawa K, Shin Y, et al. A three-dimensional finite element stress analysis and strength prediction of stepped-lap adhesive joints of dissimilar adherends subjected to bending moments [J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2010, 30: 298-305.
- 12 许巍. 金属粘接界面的强韧及破坏机制研究. [博士论文]. 北京: 中国科学院大学, 2012, 21-25;54-63 (Xu Wei. Strength and failure mechanism of adhesive interfaces for metallic bonding. [PhD Thesis]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012, 21-25;54-63(in Chinese))
- 13 Chai H. The effects of bond thickness, rate and temperature on the deformation and fracture of structural adhesives under shear loading [J]. International Journal of Fracture, 2004, 130 (1): 497-515.
- 14 Kahraman R, Sunar M, Yilbas B. Influence of adhesive thickness and filler content on the mechanical performance of aluminum single-lap joints bonded with aluminum powder filled epoxy adhesive [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205 (1-3): 183-189.
- 15 Marzi S, Biel A, Stigh U. On experimental methods to investigate the effect of layer thickness on the fracture behavior of adhesively bonded joints [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011, 31 (8): 840-850.
- 16 Xu Wei, Wei Yueguang. Influence of adhesive thickness on local interface fracture and overall strength of metallic adhesive bonding structures [J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2013, 40: 158-167.
- 17 He Dan, Sawa T, Iwamoto T, et al. Stress analysis and strength evaluation of scarf adhesive joints subjected to static tensile loadings [J]. International

- Journal of Adhesion & Adhesives, 2010, 30: 387-392.
- 18 Gustafson PA, Waas AM. The influence of adhesive constitutive parameters in cohesive zone finite element models of adhesively bonded joints [J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46 (10): 2201-2215.
 - 19 Hogberg JL. Mixed mode cohesive law [J]. International Journal of Fracture, 2006, 141(3-4): 549-559.
 - 20 Pardoen T, Ferracin T, Landis CM, et al. Constraint effects in adhesive joint fracture [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2005, 53 (9): 1951-1983.
 - 21 Ji GF, Ouyang ZY, Li GQ, et al. Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints [J]. International Journal of Solids and Structures, 2010, 47(18-19): 2445-2458.
 - 22 Ji GF, Ouyang ZY, Li GQ. Effects of bondline thickness on Mode-II interfacial laws of bonded laminated composite plate [J]. International Journal of Fracture, 2011, 168 (2):197-207.
 - 23 Ji GF, Ouyang ZY, Li GQ. On the interfacial constitutive laws of mixed mode fracture with various adhesive thicknesses [J]. Mechanics of Materials, 2012, 47: 24-32.
 - 24 Lucas FM da Silva, TNSS Rodrigues, MAV Figueiredo, et al. Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength [J]. The Journal of Adhesion. 2006, 82(11):1091-1115.

EFFECTS OF ADHESIVE LAYER THICKNESS ON THE LOAD-BEARING CAPACITY OF SCARF ADHESIVE JOINT¹⁾

Liao Lijuan^{*2)}, Huang Chenguang^{*}

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The effects of adhesive layer thickness on the load-bearing capacity of the scarf adhesive joint subjected to uniaxial tensile loading are examined using FEM including a cohesive zone model (CZM) with a bilinear shape in mixed-mode. In addition, the adhesive layer thickness-dependence and value confirmations of the key cohesive parameters, such as initial stiffness, fracture energy and separation strength, are also discussed. The numerical results show that the ultimate loading of the scarf adhesive joint increases as the adhesive layer thickness decreases in the case of given scarf angle. Characterized using the ultimate loading and applied displacement together, the loading-bearing capacity of the scarf adhesive joint adopting ductile adhesive is improved by increasing the adhesive layer thickness in the scope of the values chosen in the present study. Furthermore, under definite adhesive layer thickness, the ultimate loading and load-bearing capacity of the scarf adhesive joint increase as the scarf angle decreases.

Key words: Adhesive layer thickness, Load-bearing capacity, Cohesive zone model, Scarf adhesive joint, Scarf angle

1) The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (11202222).

2) E-mail: ljl@imech.ac.cn