

文章编号: 1000-4750(2017)11-0218-07

# 基于临界应力强度因子的 胶接对接接头抗拉强度简便预测方法

李 戎<sup>1,2</sup>, 梁 斌<sup>1</sup>, NODA Nao-Aki<sup>2</sup>

(1. 河南科技大学土木工程学院, 河南, 洛阳 471023; 2. 九州工业大学机械系, 日本, 北九州市 804-8550)

**摘 要:** 为了能够对胶接对接接头进行抗拉强度预测, 该文以有限元分析方法为基础, 通过利用参考问题的无量纲应力强度因子、接头模型与参考问题模型之间应力值的比值以及接头抗拉强度的试验数值, 得到了胶接对接接头的临界应力强度因子数值, 从而提出了一个基于临界应力强度因子的胶接对接接头抗拉强度的简便预测新方法。该方法能够在保证精确度的基础上快速计算出胶接对接接头的应力强度因子, 通过使用任意某一胶层厚度时的抗拉强度试验数值预测出其他胶层厚度时对接接头的抗拉强度数值。通过三种胶接对接接头的算例对比分析, 证明了该方法的预测结果与实际结果非常接近, 预测精度良好, 便于工程应用。

**关键词:** 胶接对接接头; 粘结抗拉强度预测; 有限元分析方法; 临界应力强度因子; 胶层厚度

**中图分类号:** TG495; TG494.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.06.0497

## A CONVENIENT ADHESIVE STRENGTH PREDICTION METHOD FOR ADHESIVE BUTT JOINT IN TERMS OF THE CRITICAL STRESS INTENSITY FACTOR

LI Rong<sup>1,2</sup>, LIANG Bin<sup>1</sup>, NODA Nao-Aki<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Kyushu Institute of Technology, Kitakyushu-shi 804-8550, Japan)

**Abstract:** For the purpose of predicting the tensile strength for adhesive butt joint, a convenient adhesive strength prediction method is presented in terms of the critical stress intensity factor. Based on the finite element method and adhesive tensile strength, the critical stress intensity factor can be obtained conveniently and accurately since the reference problem has exact solutions. Then, a new prediction method for the adhesive butt joint is proposed based on the conclusion that the critical stress intensity factor is almost independent of the adhesive thickness. In this paper, the predicted adhesive strengths for adhesive butt joints with different adhesive thicknesses can be obtained conveniently by using only one arbitrary reference tensile strength. To verify the correctness of this method, the measured and predicted adhesive tensile strength for adhesive butt joints with three kinds of material combinations are analyzed. The calculation results indicated that the predicted results coincide with the experimental results. The validity and usefulness of the proposed method in engineering application is proved.

**Key words:** adhesive butt joint; adhesive tensile strength prediction; finite element method; critical stress intensity factor; adhesive thickness

收稿日期: 2016-06-28; 修改日期: 2017-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51105132, 11402077)

通讯作者: 梁 斌(1963—), 男, 河南人, 教授, 博士, 博导, 主要从事工程结构强度、稳定性及优化设计研究(E-mail: liangbin4231@163.com).

作者简介: 李 戎(1986—), 女, 河北人, 讲师, 博士, 主要从事工程结构强度、复合结构应力解析研究(E-mail: lirongxb@163.com);

NODA Nao-Aki(1956—), 男, 日本人, 教授, 博士, 博导, 主要从事特殊形状/材料、复合结构的应力解析研究  
(E-mail: noda@mech.kyutech.ac.jp).

胶接接头因能提高连接效率而越来越多地应用到汽车、飞机、电子产品等结构的设计中<sup>[1-5]</sup>。例如,随着 IC(Integrated Circuit)技术的发展,IC 芯片的尺寸越来越大,封装越来越轻薄。研究指出,当 IC 封装处于高温环境或者承受机械载荷时,经常会发生界面剥离破坏<sup>[6]</sup>。因此,胶接结构的粘合强度研究在 IC 芯片产品设计中占有越来越重要的地位。

常用的胶接结构有对接、单搭接、双搭接等型式<sup>[7-8]</sup>。Naito 等<sup>[1]</sup>研究了胶层厚度对接接头和单搭接接头粘合强度的影响。研究发现,胶对接接头的抗拉强度随着胶层厚度的增大而减小<sup>[1,8-10]</sup>。随着胶层厚度的增加,胶层中的缺陷或者空洞有可能会增多并影响试验结果<sup>[9]</sup>。因此,本文研究中所采用的试验样本<sup>[10-11]</sup>在试验前均经过处理以尽量避免缺陷和残余应变。Mintzas<sup>[12]</sup>、Qian<sup>[13]</sup>和 Reedy<sup>[14]</sup>等基于有限元分析方法<sup>[15-16]</sup>和试验数据,研究了胶接接头的粘结强度。研究指出,胶对接接头的临界应力强度因子的数值不会随着接头胶层厚度的增减而发生明显变化。因此,可以使用临界应力强度因子作为剥离破坏准则并预测胶对接接头的抗拉强度。然而,由于数值求解上的困难,合理有效且便于工程应用的界面强度分析方法现在还很有限。

为此,本文给出了一种临界应力强度因子的简便计算方法,并基于临界应力强度因子和胶层厚度之间的关系进行强度预测。求解时,通过利用参考问题的无量纲应力强度因子、对接接头模型与参考问题模型之间应力值的比值以及接头抗拉强度的试验数值,得到了对接接头的临界应力强度因子。本文以三种胶对接接头为例,计算了不同胶层厚度时胶对接接头的抗拉强度的预测数值,将试验结果与理论预测结果进行对比分析,验证了本方法的可行性和准确性。本文研究方法适用于胶对接接头界面破坏时的抗拉强度预测,为了简便预测抗拉强度,本文研究时不考虑胶层中缺陷和残余应变的影响。

### 1 力学模型

采用有限元软件 MSC.Marc 进行计算,建立如图 1 所示的理想界面有限元模型(二维)。胶层厚度为  $h$ ,被粘物宽度为  $W$ 、长度为  $l$ ,在接头两端施加拉力  $\sigma_y^\infty$ ,  $x$  和  $y$  分别为直角坐标系  $(x, y)$  的横向坐

标和纵向坐标。

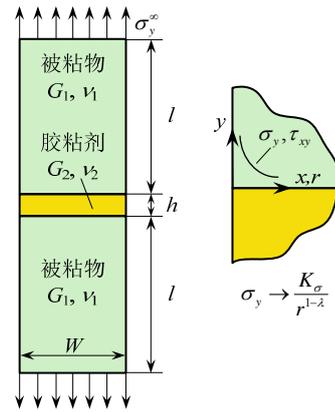


图 1 胶对接接头结构示意图

Fig.1 Dimensions of adhesive butt joint

### 2 理论推导

异种材料界面端的一般模型如图 2 所示<sup>[17]</sup>。 $\theta_1$ 、 $\theta_2$  为任意边缘角,可以通过选择其结合角,得到各种特殊的界面端模型。

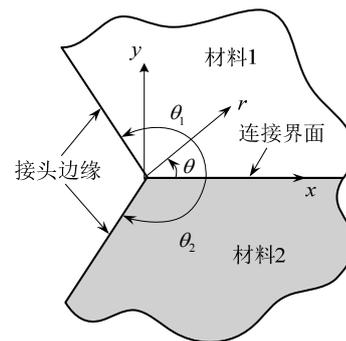


图 2 异种材料接合界面端的几何模型

Fig.2 Bi-material wedge with Cartesian and polar coordinates placed at corner where two different materials meet

对于如图 1 所示的胶对接接头来说,  $\theta_1 = \theta_2 = \pi/2$ ,  $\theta = 0$ 。当  $\alpha(\alpha - 2\beta) > 0$  时,在外载作用下,界面端部存在奇异性应力场,应力  $\sigma_y$  和其离界面端点的距离  $r$  之间存在关系式  $\sigma_y \propto 1/r^{1-\lambda}$ 。其中,  $\alpha$  和  $\beta$  是 Dundur 材料复合系数,其表达式为:

$$\alpha = \frac{G_1(\kappa_2 + 1) - G_2(\kappa_1 + 1)}{G_1(\kappa_2 + 1) + G_2(\kappa_1 + 1)},$$

$$\beta = \frac{G_1(\kappa_2 - 1) - G_2(\kappa_1 - 1)}{G_1(\kappa_2 + 1) + G_2(\kappa_1 + 1)}, \quad (1)$$

$$\kappa_j = \begin{cases} \frac{3 - \nu_j}{1 + \nu_j} & \text{(平面应力)} \\ 3 - 4\nu_j & \text{(平面应变)} \end{cases}, \quad j = 1, 2.$$

$\lambda$  为奇异性指数, 表示了应力或位移分布的主要特征, 并且只与界面端附近的几何形状和结合材料的组合有关, 对图 1 所示的接头来说, 其表达式为<sup>[18-19]</sup>:

$$\left[ \sin^2\left(\frac{\pi}{2}\lambda\right) - \lambda^2 \right]^2 \beta^2 + \lambda^2(\lambda^2 - 1) \alpha^2 + \frac{\sin^2(\pi\lambda)}{4} + 2\lambda^2 \left[ \sin^2\left(\frac{\pi}{2}\lambda\right) - \lambda^2 \right] \alpha\beta = 0 \quad (2)$$

式(2)的解  $\lambda$  的范围为  $0 \leq \text{Re}(\lambda) \leq 1$ 。接头界面端无量纲应力强度因子  $F_\sigma$  的表达式为:

$$F_\sigma = \frac{K_\sigma}{\sigma_y^\infty (W)^{1-\lambda}} = \frac{\lim_{r \rightarrow 0} [r^{1-\lambda} \times \sigma_y^r(r)]}{\sigma_y^\infty (W)^{1-\lambda}} \quad (3)$$

其中,  $K_\sigma$  为应力强度因子。由于界面端奇异性存在, 使用有限元软件得到的界面应力数值  $\sigma_y^{\text{FEM}}$  会随着建模时有限元网格尺寸大小的改变而改变, 即  $\sigma_y^{\text{FEM}} \neq \sigma_y^r$ 。因此, 不能直接使用  $\sigma_y^{\text{FEM}}$  来计算应力强度因子。

研究发现<sup>[20-21]</sup>, 当两个模型的宽度  $W$ 、材料属性、受力、界面端附近网格划分完全相同, 并且界面端附近单元尺寸足够小时, 两个模型界面端点处应力的比值便不会随端点附近网格尺寸的变化而发生改变, 且应力的比值等于应力强度因子的比值。因此, 可以通过使用界面端应力的比值  $\sigma_y^{\text{FEM}} / \sigma_{y^*}^{\text{FEM}}$  来计算应力强度因子。

表 1 给出了不同网格尺寸时界面端应力分布情况 ( $\alpha=0.3, \beta=0$ )。其中,  $e_{\min}$  为界面端最小单元尺寸, \*代表图 3 中已经得到精确解具体数值的参考问题<sup>[20-21]</sup>。表 1 中参考问题模型长宽比  $l/W=3$ (长宽比需满足  $l/W \geq 1$ ),  $W=10 \text{ mm}$ , 两端施加的拉力  $\sigma_y^\infty=1 \text{ MPa}$ , 采用有限元软件 MSC.Marc 建立如图 3 所示的参考问题有限元模型(二维), 使用平面应变四节点四边形单元, 界面端附近网格加密。当界面端附近最小单元尺寸  $e_{\min}=1/3^{12}$  时, 单元总数 86187, 其中界面端附近单元数约为 80000。要说明的是, 参考问题一般为具有精确解的简单胶接问题。关于参考问题的详细内容, 可参见文献<sup>[20-21]</sup>, 本文不再赘述。从表 1 中可以看出,  $\sigma_y^{\text{FEM}}$  随着  $r/W$  的增大而减小, 且  $\sigma_y^{\text{FEM}}|_{e_{\min}=1/3^{12}} \neq \sigma_y^{\text{FEM}}|_{e_{\min}=1/3^9}$ 。但是应力的比例数值  $\sigma_y^{\text{FEM}} / \sigma_{y^*}^{\text{FEM}}$  却基本不变, 且  $(\sigma_y^{\text{FEM}} / \sigma_{y^*}^{\text{FEM}})|_{e_{\min}=1/3^{12}} \approx$

$$(\sigma_y^{\text{FEM}} / \sigma_{y^*}^{\text{FEM}})|_{e_{\min}=1/3^9}。$$

即, 应力强度因子、无量纲应力强度因子和界面应力之间的关系式为:

$$\begin{aligned} \frac{K_\sigma^*}{K_\sigma} &= \frac{\sigma_y^{\sigma^*} (W)^{1-\lambda} F_\sigma^*}{\sigma_y^\infty (W)^{1-\lambda} F_\sigma} = \frac{F_\sigma^*}{F_\sigma}, \\ \frac{K_\sigma^*}{K_\sigma} &= \lim_{r \rightarrow 0} \frac{[r^{1-\lambda} \times \sigma_y^{r^*}(r)]}{[r^{1-\lambda} \times \sigma_y^r(r)]} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{[\sigma_y^{\text{FEM}^*}(r)]}{[\sigma_y^{\text{FEM}}(r)]} \end{aligned} \quad (4)$$

而临界应力强度因子  $K_{\sigma_c}$  和抗拉强度  $\sigma_c$  满足关系式:

$$K_{\sigma_c} = F_\sigma \sigma_c W^{1-\lambda} \quad (5)$$

因此, 当参考问题的  $F_\sigma^*$  已知时, 便可由式(4)、式(5)得到胶接对接接头的临界应力强度因子  $K_{\sigma_c}$ 。

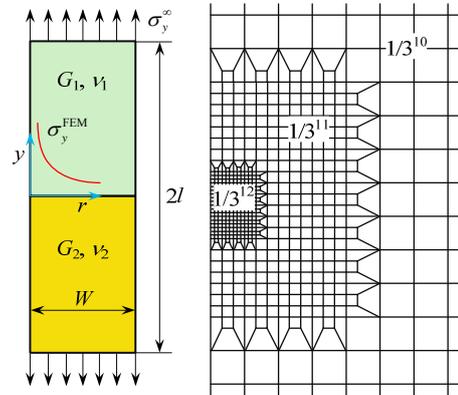


图 3 参考模型结构示意图

Fig.3 Dimensions of reference model

表 1 不同网格尺寸时界面端应力分布情况( $h/W=0.001$ )  
Table 1 Stress distributions at end of interface for adhesive joints with different mesh sizes when  $h/W=0.001$

界面端单元尺寸 $e_{\min}=1/3^{12}$ mm			界面端单元尺寸 $e_{\min}=1/3^9$ mm		
$r/W$	$\sigma_y^{\text{FEM}}$	$\frac{\sigma_y^{\text{FEM}}}{\sigma_{y^*}^{\text{FEM}}}$	$r/W$	$\sigma_y^{\text{FEM}}$	$\frac{\sigma_y^{\text{FEM}}}{\sigma_{y^*}^{\text{FEM}}}$
0	1.322	0.524	0	1.073	0.524
1/5314410	1.128	0.524	1/196830	0.912	0.522
2/5314410	1.081	0.524	2/196830	0.874	0.522
3/5314410	1.051	0.524	3/196830	0.851	0.522
4/5314410	1.031	0.524	4/196830	0.835	0.522
5/5314410	1.015	0.524	5/196830	0.824	0.523

### 3 算例与讨论

作为算例, 本文预测了三种胶接对接接头的抗拉强度。表 2 给出了本文中所用到的三种胶接对接接头的弹性模量  $E$ , 泊松比  $\nu$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\lambda$ 。胶接对接接头 1 中  $W=10 \text{ mm}$ 、 $l=30 \text{ mm}$ ; 胶接对接接头 2 和 3 中  $W=12.7 \text{ mm}$ ,  $l=38 \text{ mm}$ 。

表 2 材料属性表

Table 2 Material properties of adherent and adhesives

胶接对接接头		E/GPa	$\nu$	$\alpha$	$\beta$	$\lambda$
1	被粘物 铝合金	70	0.35	0.94	0.21	0.714
	胶粘剂 爱牢达胶粘剂	2.1	0.36			
2	被粘物 中碳钢 S35C	210	0.30	0.97	0.20	0.685
	胶粘剂 环氧树脂 A	3.14	0.37			
3	被粘物 中碳钢 S35C	210	0.30	0.98	0.19	0.674
	胶粘剂 环氧树脂 B	2.16	0.38			

3.1 算例验证

本节通过三个算例验证本文方法的正确性，取文献[10-11]中的试验结果作为预测参考对象。文献[10]中，为了尽量减少缺陷，胶粘剂经过真空脱泡处理，涂胶后胶接对接接头 2、3 分别放置于室温环境固化 50 d 和 60 d。在脆性破坏发生前，荷载-应变曲线中的荷载和应变数值均呈线性关系。这两种对接接头的破坏均开始于粘附平面的附着表面。文献[11]中，胶接前，被粘物表面用金刚砂纸打磨、丙酮脱脂，接着化学蚀刻约 30 min，最后温水清洗、热风干燥。将双组份环氧树脂胶结剂按照 1:1 混合均匀后涂抹在粘接面上，样本两端使用夹具进行固定以排除气泡。涂胶后样本放置于室温环境固化 48 h。荷载-应变关系曲线显示荷载和应变数值在转折点前呈线性关系。显微镜检查显示破坏发生在界面角点，初始裂纹沿界面扩展。为了简便预测抗拉强度，本文将胶层作为没有缺陷以及残余应变的均匀材料考虑。

求解时，首先由式(4)得到胶接对接接头的无量纲应力强度因子，接着将试验结果代入式(5)即可得到接头的临界应力强度因子。当  $l/W \geq 1$  时，参考模型(见图 3)的界面应力不再发生变化，此时  $F_\sigma^*$  的数值大小仅与材料参数  $\alpha$  和  $\beta$  有关。胶层厚度不同时接头所对应的参考问题的  $F_\sigma^*$  是相同的。以接头 1 为例，其所对应的参考模型的  $F_\sigma^*$  均为 0.4295，具体计算结果见表 3。

表 3 无量纲应力强度因子计算(接头 1)

Table 3 Calculation of dimensionless critical stress intensity factors (butt joint 1)

h/mm	$F_\sigma^*$	$F_\sigma / F_\sigma^*$	$F_\sigma$
0.5	0.4295	0.4037	0.173
1.0	0.4295	0.5054	0.217
1.5	0.4295	0.5819	0.250
2.5	0.4295	0.7054	0.303
3.0	0.4295	0.7573	0.325

表 4 给出了胶接对接接头 1、2、3 的无量纲应力强度因子  $F_\sigma$ 。从中可以看出，无量纲应力强度因子随着胶层厚度的增大而增大，但增长速度随着胶层厚度的增大而逐渐减小；胶粘剂对无量纲应力强度因子的影响主要表现在胶层厚度较小的情况下。

表 4 无量纲应力强度因子  $F_\sigma$

Table 4 Dimensionless critical stress intensity factor  $F_\sigma$

h/mm	胶接对接接头		
	1	2	3
0.05	—	0.0671	0.062
0.1	—	0.0831	0.778
0.3	—	0.119	0.112
0.5	0.173	—	—
0.6	—	0.15	0.142
1.0	0.217	0.178	0.171
1.5	0.250	—	—
2.0	—	0.231	0.223
2.5	0.303	—	—
3.0	0.325	—	—
5.0	—	0.335	0.331

表 5 给出了三种接头抗拉强度  $\sigma_c$  的试验结果<sup>[10-11]</sup>。由结果可见，三种接头的抗拉强度均随着胶层厚度的增大而减小，抗拉强度的减小速度随着胶层厚度的增大而逐渐减小；胶粘剂对抗拉强度的影响随着胶层厚度的增大而逐渐减小，这些结果与表 4 中无量纲应力强度因子的变化规律一致。因此，在没有试验结果的情况下，可以通过使用无量纲应力强度因子进行强度预测。

表 5 粘结抗拉强度  $\sigma_c$  /MPa

Table 5 Adhesive tensile strength  $\sigma_c$

h/mm	胶接对接接头		
	1 <sup>[11]</sup>	2 <sup>[10]</sup>	3 <sup>[10]</sup>
0.05	—	57.2±7.34	76.8±2.96
0.1	—	53.3±6.52	71.4±0.981
0.3	—	32.5±2.72	49.7±3.03
0.5	12.35	—	—
0.6	—	25.9±2.71	41.2±1.94
1.0	10.19	22.6±1.18	25.3±3.09
1.5	8.61	—	—
2.0	—	18.4±2.08	19.7±1.31
2.5	8.494	—	—
3.0	7.027	—	—
5.0	—	13.4±1.76	13.6±1.70

表 6 给出了不同胶层厚度时三种接头的临界应力强度因子  $K_\sigma$ 。由结果可见，虽然胶接对接接头的抗拉强度  $\sigma_c$  会随着胶层厚度的增大而减小，但是临界应力强度因子  $K_\sigma$  的数值几乎恒定不变。 $K_{\sigma c(ave)}$  为

$K_{\sigma_c}$  的平均值±标准偏差。接头 1:  $K_{\sigma_c(ave)} = 0.609 \pm 0.0475 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.286}$ , 接头 2:  $K_{\sigma_c(ave)} = 1.04 \pm 0.0643 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.315}$ , 接头 3:  $K_{\sigma_c(ave)} = 1.20 \pm 0.144 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.326}$ 。这些结果与参考文献[12-14]中的表述一致。

表 6 临界应力强度因子  $K_{\sigma_c}$  / (MPa·m<sup>1-λ</sup>)  
Table 6 Critical stress intensity factor  $K_{\sigma_c}$

h/mm	胶对接接头		
	1	2	3
0.05	—	0.970±0.125	1.15±0.0442
0.1	—	1.12±0.137	1.34±0.0184
0.3	—	0.978±0.0818	1.34±0.0818
0.5	0.574	—	—
0.6	—	0.981±0.102	1.41±0.0665
1.0	0.593	1.02±0.0532	1.04±0.127
1.5	0.577	—	—
2.0	—	1.07±0.121	1.06±0.0703
2.5	0.690	—	—
3.0	0.612	—	—
5.0	—	1.13±0.149	1.09±0.135

表 7 列出了采用本文计算方法得到的三种接头的临界应力强度因子  $K_{\sigma_c(ave)}$  / (MPa·m<sup>1-λ</sup>)。通过与参考文献[11-12]的计算结果进行对比,验证了本文计算方法的有效性和正确性。与参考文献[11-12]中使用的计算方法相比,本文计算方法免去了复杂的矩阵运算和积分计算,计算过程简便。

表 7 临界应力强度因子的对比分析  
Table 7 Comparison of critical stress intensity factors

	接头 1	接头 2	接头 3
本文	0.609±0.0475	1.04±0.0643	1.20±0.144
文献	0.607 <sup>[11]</sup>	1.042 <sup>[12]</sup>	1.007 <sup>[12]</sup>

### 3.2 抗拉强度预测

为了提高预测结果的准确度,本文预测时使用的抗拉强度为试验结果的平均值。由上文叙述可知,不同胶层厚度时对接接头的临界应力强度因子几乎恒定不变,因此,只要得到某一胶层厚度时对接接头的临界应力强度因子  $K_{\sigma_c}$  (本文中用 ref 表示),并把此  $K_{\sigma_c}$  看作其他胶层厚度时的  $K_{\sigma_c}$ ,便可由式(5)预测出其他胶层厚度时的临界应力强度因子。为了更贴近工程实际,下面分别选取  $h=0.5$ 、 $h=0.05$  时接头的临界应力强度因子作为 ref。表 8 给出了预测时所用到的三种胶对接接头的 ref 问题的相关参数信息。

表 8 参数信息(ref)  
Table 8 Results of ref problem

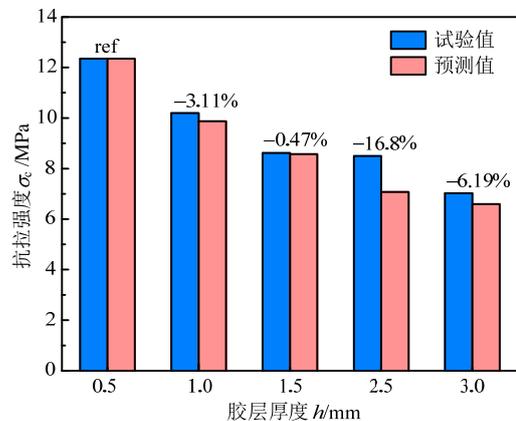
接头	h/mm	W/mm	$K_{\sigma_c}$ / (MPa·m <sup>1-λ</sup> )
1	0.5	10	0.574
2	0.05	12.7	0.970
3	0.05	12.7	1.150

表 9 给出了采用本文预测方法得到的三种胶对接接头抗拉强度的预测值以及文献[10-11]的对应数据。从中可以看出,本文结果与文献结果的吻合很好。

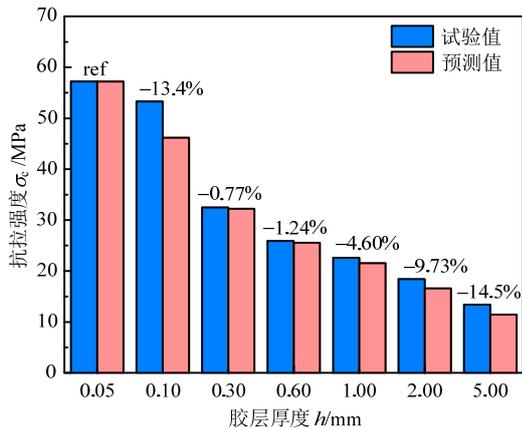
表 9 粘结抗拉强度预测值 /MPa  
Table 9 Prediction adhesive tensile strength

h/mm	胶对接接头					
	1		2		3	
	预测	试验 <sup>[11]</sup>	预测	试验 <sup>[10]</sup>	预测	试验 <sup>[10]</sup>
0.05(ref)	—	—	57.2	57.2	76.8	76.8
0.1	—	—	46.2	53.3	77.0	71.4
0.3	—	—	32.3	32.5	42.6	49.7
0.5(ref)	12.4	12.4	—	—	—	—
0.6	—	—	25.6	25.9	33.6	41.2
1.0	9.87	10.2	21.6	22.6	27.9	25.3
1.5	8.57	8.61	—	—	—	—
2.0	—	—	16.6	18.4	21.4	19.7
2.5	7.07	8.49	—	—	—	—
3.0	6.59	7.03	—	—	—	—
5.0	—	—	11.5	13.4	14.4	13.6

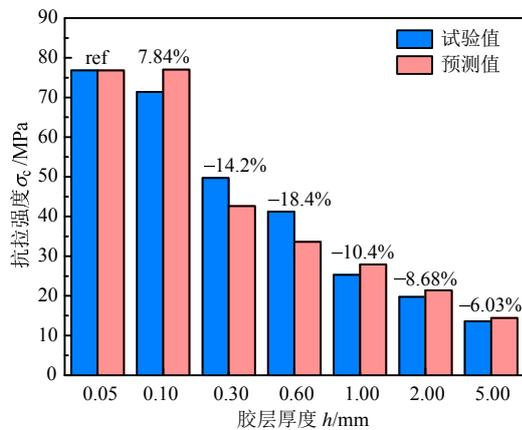
图 4 为文献中抗拉强度测量结果和本文预测结果的对比柱状图。从中可以看出,对于胶对接接头 1,预测误差为 0.47%~16.8%;对于胶对接接头 2,预测误差为 0.77%~14.5%;对于胶对接接头 3,预测误差为 6.03%~18.4%。三种胶对接接头的预测误差均小于 20%,且大部分预测误差控制在 10%以内,最小预测误差仅为 0.47%。结果表明,本文预测方法简便实用且预测结果有较高的精确度。



(a) 胶对接接头 1



(b) 胶接对接接头 2



(c) 胶接对接接头 3

图 4 粘结强度试验数值和预测数值的对比分析

Fig.4 Experimental and predicted adhesive strength for adhesive joints with different adhesive thicknesses

值得一提的是，本文中采用的 ref 问题的胶层厚度范围为 0.05~0.5，三种接头的胶层厚度范围为 0.05~3.0 以及 0.5~5.0。如图 5 所示，当胶层厚度改变时，预测误差未出现规律性的变化。因此本文预测精度基本不受 ref 问题的胶层厚度的影响。本文

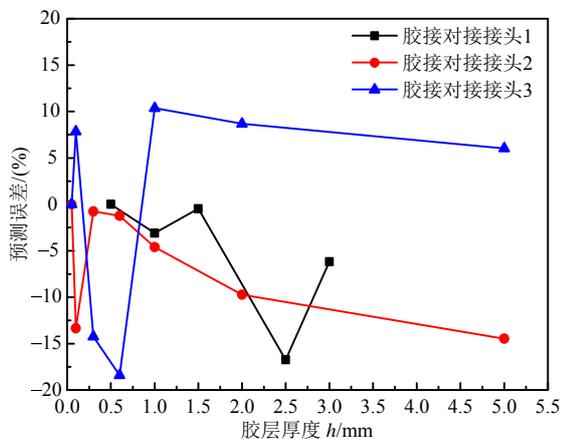


图 5 预测误差对比分析

Fig.5 Comparison of predictive errors

预测方法可能适用于不同胶层厚度对接接头的强度预测，但具体的胶层厚度适用范围研究结果还很有限，本项目后续工作将进行进一步的研究。

本文方法是基于无胶接缺陷的理想胶层，虽然试验中接头经过特殊处理可以在很大程度上避免胶层缺陷或者空洞的产生，但是仍然有可能存在缺陷并最终影响预测精度。另外，不同胶层厚度的接头，细察破坏模式可能会不同，破坏机理不同会导致实际测量的破坏强度不同，从而可能导致预测误差。因此，在使用本方法进行强度预测时，除了在试验过程中尽量避免产生胶层缺陷或者空洞以外，选择预测中使用的 ref 问题时最好避免选用胶层厚度较厚的接头，并最好取用多次试验结果的平均值。

### 4 结论

本文基于临界应力强度因子，提出了胶接对接接头抗拉强度的简便预测方法。基于有限元模型，通过使用模型界面尖端应力数值得到胶接接头的无量纲应力强度因子，从而可以由任意一个胶层厚度时胶接对接接头抗拉强度的试验结果预测出其他胶层厚度时抗拉强度数值。计算过程简便实用，可以在有限的试验数据的基础上进行强度预测。将预测结果与试验数据进行对比，表明本文预测方法预测精度较高，可准确快速的预测出接头的抗拉强度，具有重大的工程应用价值。

### 参考文献:

- [1] Naito K, Onta M, Kogo Y. The effect of adhesive thickness on tensile and shear strength of polyimide adhesive [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012, 36: 77—85.
- [2] Liu Z X, Huang Y A, Yin Z P, Bennati S, Valvo P S. A general solution for the two-dimensional stress analysis of balanced and unbalanced adhesively bonded joints [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014, 54: 112—123.
- [3] 赵波, 吕振华, 吕毅宁. 基于理论解的三种胶接接头简化有限元单元[J]. 工程力学, 2010, 27(7): 1—9. Zhao Bo, Lü Zhenhua, Lü Yining. Enforcing of a theoretical solution of three adhesive joints into simplified finite element formulations for stiffness prediction [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(7): 1—9. (in Chinese)
- [4] Huang Z, Kumar P, Dutta I, Pang J H L, Sidhu R. A general methodology for calculating mixed mode stress intensity factors and fracture toughness of solder joints with interfacial cracks [J]. Engineering Fracture

- Mechanics, 2014, 131: 9–25.
- [5] Kitasako Y, Burrow M F, Nikaido T, Harada N, Inokoshi S, Yamada T, Takatsu T. Shear and tensile bond testing for resin cement evaluation [J]. *Dental Materials*, 1995, 11(5/6): 298–304.
- [6] Hattori T, Sakata S, Hatsuda T, Murakami G. A stress singularity parameter approach for evaluating adhesive strength [J]. *JSME International Journal. Series 1, Solid Mechanics, Strength of Materials*, 1988, 31(4): 718–723.
- [7] Stazi F, Giampaoli M, Rossi M, Munafò P. Environmental ageing on GFRP pultruded joints: Comparison between different adhesives [J]. *Composite Structures*, 2015, 133: 404–414.
- [8] Afendi M, Majid M S A, Daud R, Rahman A A, Teramoto T. Strength prediction and reliability of brittle epoxy adhesively bonded dissimilar joint [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2013, 45(2): 21–31.
- [9] Ikegami K, Kajiyama M, Kamiko S, Shiratori E. Experimental studies of the strength of an adhesive joint in a state of combined stress [J]. *The Journal of Adhesion*, 1979, 10(1): 25–38.
- [10] Suzuki Y. Adhesive tensile strengths of scarf and butt joints of steel plates (Relation between adhesive layer thicknesses and adhesive strengths of joints) [J]. *JSME International Journal*, 1987, 30(265): 1042–1051.
- [11] Akisanya A R, Meng C S. Initiation of fracture at the interface corner of bi-material joints [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2003, 51(1): 27–46.
- [12] Mintzas A, Nowell D. Validation of an  $H_{cr}$ -based fracture initiation criterion for adhesively bonded joints [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2012, 80: 13–27.
- [13] Qian Z, Akisanya A R. An experimental investigation of failure initiation in bonded joints [J]. *Acta Materialia*, 1998, 46(14): 4895–4904.
- [14] Reedy E D Jr, Guess T R. Interface corner failure analysis of joint strength: Effect of adherend stiffness [J]. *International Journal of Fracture*, 1997, 88(4): 305–314.
- [15] He X C. A review of finite element analysis of adhesively boned joints [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2011, 31(4): 248–264.
- [16] 熊波, 罗锡林, 谭惠丰. 考虑接头作用的全复合材料桁架结构多尺度分析[J]. *工程力学*, 2015, 32(8): 229–235.
- Xiong Bo, Luo Xilin, Tan Huifeng. Multi-scale analysis of all-composite truss considering joint effects [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(8): 229–235. (in Chinese)
- [17] 周一波, 李晓叶, 王效贵. 压电与导体双材料界面端的奇异性研究[J]. *工程力学*, 2014, 31(8): 209–216.
- Zhou Yibo, Li Xiaoye, Wang Xiaogui. Singularities in the wedge of piezoelectric media and conductor [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(8): 209–216. (in Chinese)
- [18] Bogy D B. Edge-bonded dissimilar orthogonal elastic wedges under normal and shear loading [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1968, 35(3): 460–466.
- [19] Bogy D B. Two edge-bonded elastic wedges of different materials and wedge angles under surface tractions [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1971, 38(2): 377–386.
- [20] Zhang Y, Noda N A, Wu P Z, Duan M L. A mesh-independent technique to evaluate stress singularities in adhesive joints [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2015, 57: 105–117.
- [21] Noda N A, Shirao R, Li J, Sugimoto J S. Intensity of singular stress fields causing interfacial debonding at the end of a fiber under pullout force and transverse tension [J]. *International Journal of Solids Structures*, 2007, 44(13): 4472–4491.