

# 基于响应面法的颗粒增强黏结接头参数优化及断裂失效分析

王玉涛 曾凯 张洪申 邢保英

(昆明理工大学机电工程学院, 昆明 650500)

**文 摘** 基于Box-Behnken Design (BBD)设计方法,开展 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒增强黏结工艺试验研究。建立了黏结特征参数(颗粒粒径、黏结层厚度、质量分数)与响应值(失效载荷、能量吸收值)之间的多元回归模型,并通过实验对模型进行了验证。建立了黏结层的代表性体积单元(Representative volume element, RVE)有限元分析模型,探讨胶层断裂失效机理。结果表明,颗粒粒径对接头破坏载荷的影响最大。对能量吸收值影响最大的是颗粒质量分数。最佳工艺参数颗粒粒径为 $46\ \mu\text{m}$ ,胶层厚度为 $0.6\ \text{mm}$ ,质量分数为 $5\%$ 。有限元分析表明, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒的加入改变了裂纹扩展路径,增加了裂纹长度,使得胶层的断裂能增加,进而提高了黏结接头的力学性能。

**关键词** 黏结接头,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒, 响应面法, 有限元模型, 力学性能

中图分类号: TG495

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2024.05.011

## Parameter Optimization and Fracture Failure Analysis of Particle-reinforced Adhesive Bonding Joints Based on Response Surface Method

WANG Yutao ZENG Kai ZHANG Hongshen XING Baoying

(Mechanical and Electrical Engineering College, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500)

**Abstract** Based on Box-Behnken Design (BBD) method, the experimental research of alumina particles reinforced bonding was carried out. The multivariate regression models between bond characteristic parameters (particle size, adhesive layer thickness and mass fraction) and response values (failure load, energy absorption value) were established, and the models were verified by experiments. The RVE (representative volume element) model was established to verify the failure mechanism of adhesive layer fracture. The results indicate that the greatest impact on the failure load of the joint is particle size. The greatest impact on energy absorption value of the joint is particle mass fraction. The optimal process parameters are particle size of  $46\ \mu\text{m}$ , adhesive layer thickness of  $0.6\ \text{mm}$  and mass fraction of  $5\%$ . Finite element analysis shows that the addition of alumina particles changes the cracks propagation path, which increases the crack length and the fracture energy of adhesive layer, thus enhance the mechanical properties of adhesive joints.

**Key words** Adhesive bonded joint,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles, Response surface method, Finite element model, Mechanical property

### 0 引言

黏结技术被广泛应用于汽车和航空制造领域<sup>[1-3]</sup>,黏结常用的环氧树脂胶被广泛应用到各个领域,但因其固化产物脆性大、剥离强度低等缺点限制了环氧树脂胶的进一步发展<sup>[4-5]</sup>。为了提高黏结剂的力学性能,有学者提出,在环氧树脂胶中加入 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒对其进行改性以获得高性能复合材料<sup>[6-7]</sup>。

HSIEH<sup>[8]</sup>和SILVA<sup>[9]</sup>等在环氧树脂黏结剂中加入纳米 $\text{SiO}_2$ 颗粒,发现 $\text{SiO}_2$ 颗粒的加入提高了黏结剂的增韧效果。MA等<sup>[10]</sup>利用TEM研究无机纳米颗粒对环氧树脂增韧机理的影响。结果表明,这些纳米颗粒提高了脆性环氧树脂的抗拉强度,减少了缺陷对其力学性能的影响。TAIB等<sup>[11]</sup>验证了胶层厚度对复合材料单搭接头强度的影响。结果表明:随着黏

收稿日期:2022-06-14

基金项目:国家自然科学基金(51565022;52065034)

第一作者简介:王玉涛,1996年出生,硕士研究生,主要从事薄板材料连接新技术研究工作。E-mail:2676726174@qq.com

结层厚度的增加,黏结强度降低。MOREIRA 等<sup>[12]</sup>研究了在环氧树脂中加入不同直径的 $Al_2O_3$ 纳米颗粒作为填料。结果表明,颗粒越大,聚合物基质团聚越大,热导率增强越大。CAMPILHO 等<sup>[13]</sup>分析了单搭接接头中内聚力模型形状对强度预测的影响。结果表明,内聚力模型形状对韧性黏结剂黏结接头的影响较大,其中梯形形状与实验数据吻合最好。然而,国内外学者综合考虑多个工艺参数及其相互作用对黏结接头质量影响的文章鲜有报道。

本文主要研究工艺参数对微米级 $Al_2O_3$ 颗粒增强黏结接头质量的影响。采用BBD分析方法,建立失效载荷和能量吸收值两个目标量与黏结特征参数之间的回归模型。采用黏结层的RVE有限元分析模型,探讨胶层断裂失效机理。

## 1 试验

### 1.1 试件制备

材料为1.5 mm厚的5182铝合金薄板,黏结试样的尺寸为100 mm×25 mm×1.2 mm,试件搭接长度为25 mm,如图1所示。所用黏结剂为3M公司生产的DP460环氧树脂胶,其中将 $Al_2O_3$ 颗粒作为胶层的第二相。试件黏结前先用砂纸对搭接区进行打磨,然后用无水乙醇进行擦拭。将相应质量分数的环氧树脂和 $Al_2O_3$ 颗粒在烧杯中均匀搅拌5~10 min。然后,采用不同粗细的铜丝控制胶层厚度,黏结完成后将试件放入25 °C恒温箱中固化24 h。

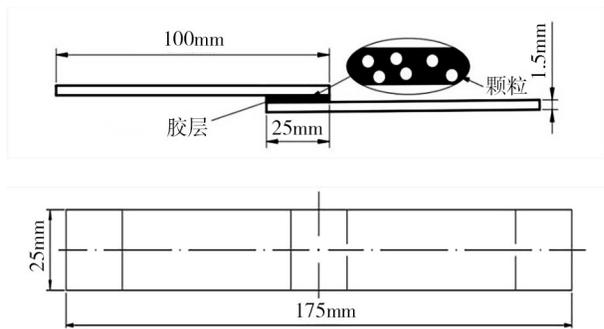


图1 单搭黏结接头

Fig. 1 The single lap adhesive bonding joints

### 1.2 试验设计

采用BBD方法设计试验方案,以颗粒粒径( $X_1$ )、胶层厚度( $X_2$ )和颗粒质量分数( $X_3$ )三个变量为特征参数,接头的失效载荷( $Y_1$ )和能量吸收值( $Y_2$ )为目标量建立回归模型。通过预实验确定了三个变量的参数范围,如表1所示。

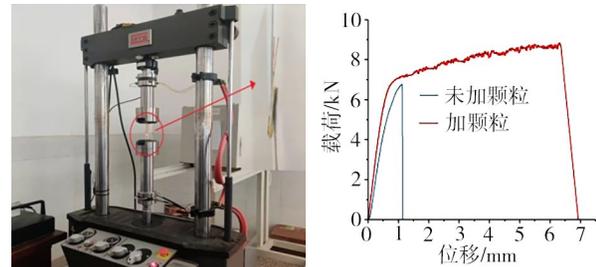
借助MTS电液伺服材料试验机对试件进行静态拉伸试验,获得了不同参数下黏结接头的载荷位移曲线,拉伸速率设为5 mm/min。试验设备如图2(a)

表1 参数水平及范围

Tab. 1 Factor level and scope

Factors	Levels		
	(-1)	(0)	(+1)
$X_1$ :The particle size/mm	0.02	0.04	0.1
$X_2$ :Adhesive layer thickness/mm	0.2	0.4	0.6
$X_3$ :Mass fraction/%	5	15	30

所示。为了避免人为误差,每组试验重复三次,试验结果为均值,结果如表2所示。其中,能量吸收值是黏结接头拉伸过程中载荷对位移的积分,可以用载荷位移曲线与坐标所围成的面积来表示。图2(b)是胶层厚度为0.6 mm,加 $Al_2O_3$ 颗粒与不加 $Al_2O_3$ 颗粒的载荷位移曲线图,从图中可以看出通过在黏结层中加入 $Al_2O_3$ 颗粒,可以显著提高黏结接头的强度。



(a) MTS电液伺服材料试验机 (b) 载荷位移曲线图

图2 试验设备和载荷位移曲线图

Fig. 2 Test equipment and load displacement curves

表2 颗粒增强黏结试验结果

Tab. 2 Particle reinforced bonding test results

Run	颗粒粒径/mm	胶层厚度/mm	质量分数/%	失效载荷/N	能量吸收值/J
1	0.04	0.4	15	8 855.23	54.23
2	0.10	0.6	15	8 061.48	24.87
3	0.04	0.2	30	8 830.62	49.21
4	0.04	0.6	30	8 762.80	47.45
5	0.10	0.2	15	8 097.98	23.90
6	0.04	0.4	15	8 753.83	50.13
7	0.02	0.4	30	8 770.90	43.47
8	0.02	0.2	15	8 441.65	21.04
9	0.10	0.4	30	8 006.41	20.63
10	0.02	0.4	5	8 847.22	69.48
11	0.02	0.6	15	8 978.50	74.75
12	0.04	0.4	15	8 973.42	67.27
13	0.10	0.4	5	8 950.93	60.09
14	0.04	0.6	5	9 098.48	79.80
15	0.04	0.2	5	8 714.61	110.96

## 2 结果及分析

### 2.1 响应面模型的建立

应用响应面法建立黏结特征参数的数学模型,显著性水平设定为0.05,当 $P_{\text{mob}}>F$ 的值小于0.05时,认为该模型显著。用最小二乘法对试验数据进行拟合,通过保留显著性较强的交互因素和各单因素项,对方程进行优化。优化结果如下:

$$Y_1 = 7272.48658 + 28954.96775X_1 + 4866.08261X_2 - 6.19678X_3 - 15320.0464X_1X_2 - 440.39367X_1X_3 - 48.49334X_2X_3 - 1.80626 \times 10^5 X_1^2 - 3502.26688X_2^2 + 1.00596X_3^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 57.542 + 1834.32946X_1 + 56.44222X_2 - 5.64632X_3 - 856.69444X_1X_2 - 14493.94631X_1^2 + 0.11573X_3^2 \quad (2)$$

方程(1)和(2)分别表示失效载荷和能量吸收值的优化模型。从方差分析表3可以看出,失效载荷和能量吸收值模型均显著, $P$ 值均小于0.05。

表3 方差分析表

Tab. 3 Analysis of variance table

响应值	因素	平方和 $S_s$	自由度 $d_f$	均方差 $M_s$	$F$ 值	$P_{\text{mob}}>F$
失效载荷	模型	1627 000	9	180 800	6.87	0.024
	$X_1$	540 600	1	540 600	20.54	0.006
	$X_2$	24 766.51	1	24 766.51	0.94	0.377
	$X_3$	318 400	1	318 400	12.10	0.018
	$X_1X_2$	67 447.44	1	67 447.44	2.56	0.170
	$X_1X_3$	222 100	1	222 100	8.44	0.034
	$X_2X_3$	59 835.26	1	59 835.26	2.27	0.192
	$X_1^2$	155 500	1	155 500	5.91	0.059
	$X_2^2$	72 317.25	1	72 317.25	2.75	0.158
	$X_3^2$	82 546.68	1	82 546.68	3.14	0.137
	失拟项	107 400	3	35 803.91	2.96	0.262
能量吸收值	模型	6 929.23	6	1 154.87	4.62	0.026
	$X_1$	784.85	1	784.85	3.14	0.114
	$X_2$	7.32	1	7.32	0.03	0.868
	$X_3$	3 182.94	1	3 182.94	12.73	0.007
	$X_1X_2$	211.37	1	211.37	0.85	0.385
	$X_1^2$	1 006.74	1	1 006.74	4.03	0.080
	$X_3^2$	1 098.92	1	1 098.92	4.40	0.069
	失拟项	1 840.03	6	306.67	3.83	0.222

此外,单因素下对接头失效载荷的影响显著程度如下:颗粒粒径最显著,其次是胶层厚度,质量分数影响最小。对吸能值的影响显著程度如下:质量分数最显著,颗粒粒径次之,胶层厚度影响最小。

### 2.2 试验验证与参数优化

黏结强度很大程度上取决于黏结接头的静态性

能。因此,对响应面模型的优化采用了较大的失效载荷和能量吸收值。结果表明,当颗粒粒径为46  $\mu\text{m}$ 、胶层厚度为0.6 mm、质量分数为5%时,可获得最大失效载荷9.208 kN、能量吸收值96 J。对得到的黏结特征参数进行试验验证,试验得到的失效载荷和能量吸收值分别为8.797 48 kN和93.97 J。试验验证所得的真实值与失效载荷、能量吸收值模型所得的预测值误差分别为4.45%、2.1%。结果表明,预测值与实验值的误差在5%以内。因此,通过该模型预测黏结接头的失效载荷、能量吸收值以及优化黏结工艺参数是可行的。

### 2.3 影响因素分析

通过方差分析,可以确定失效荷载模型的显著性以及各因素对失效载荷的影响规律。图3为单因素及交互项对失效载荷的影响规律。由图3(a)可知,失效载荷随颗粒粒径和胶层厚度的增加呈先增加后减小的趋势,但是颗粒粒径对失效载荷的影响更显著。随着颗粒质量分数的增加,失效载荷先减小后逐渐趋于稳定。当胶层厚度为中值0.4 mm时,由响应面图3(b)可知,质量分数的变化对失效载荷的影响不大,增加颗粒粒径时响应面的曲率变化较大且出现峰值。在较小质量分数且颗粒粒径处于中值时,失效载荷最大。由等高线图3(c)可以看出,等高线右半部分比左半部分更为密集,分析可知,在颗粒粒径较小时,质量分数的增大对失效载荷的影响呈现出负相关规律。等高线左下角比较稀疏,说明质量分数和颗粒粒径较小时改变两者对失效载荷影响不大。

图4为单因素及交互项对能量吸收值的影响规律。由图4(a)可知,随着颗粒粒径的增加,能量吸收值先增加后减小。能量吸收值与胶层厚度呈正相关性且曲率较小,表明胶层厚度对能量吸收值影响较小。随着颗粒质量分数的增加,能量吸收值先降低然后缓慢增加。当颗粒质量分数为中值15%时,由响应面图4(b)可知,随着粒径的增大,能量吸收值先增大后减小。胶层厚度与能量吸收值呈正相关。在粒径为20~40  $\mu\text{m}$ 的低水平下,能量吸收值随着胶层厚度的增加而增大。原因是随着粒径的增大,颗粒在胶层中的比例增大,因此与胶层接触增加提高了接头的减震能力。当颗粒粒径大于60  $\mu\text{m}$ 时,随着胶层厚度的增加,能量吸收值逐渐减小。这是因为颗粒尺寸过大影响了黏结效果,降低了能量吸收值。由等高线图4(c)可以看出,左侧等高线图稀疏,右侧等高线图密集。分析表明,当颗粒粒径较小时,能量吸收值随胶层厚度的增大而增大,而当颗粒粒径较大时,胶层厚度的变化对能量吸收值影响较小。

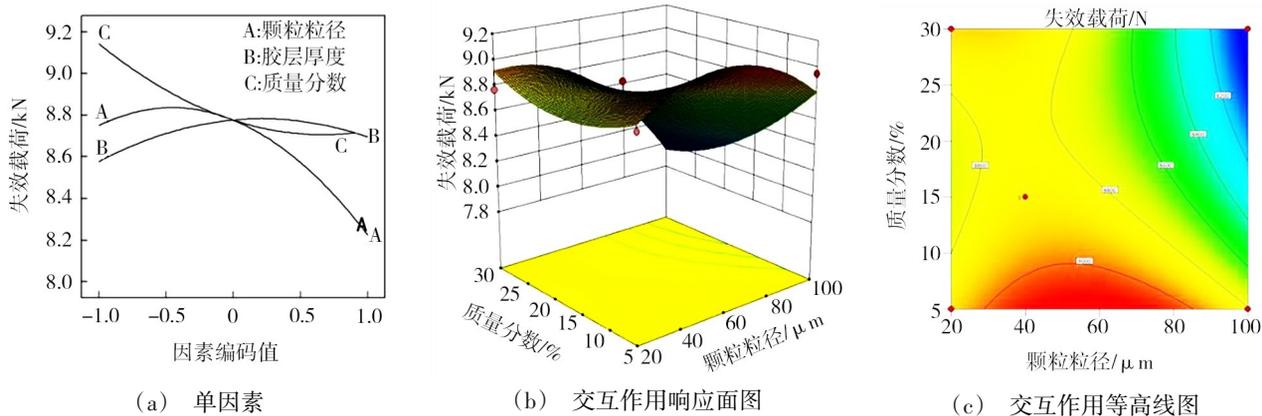


图3 单因素及交互作用对失效载荷的影响

Fig. 3 Influence of single factor and interaction on failure load

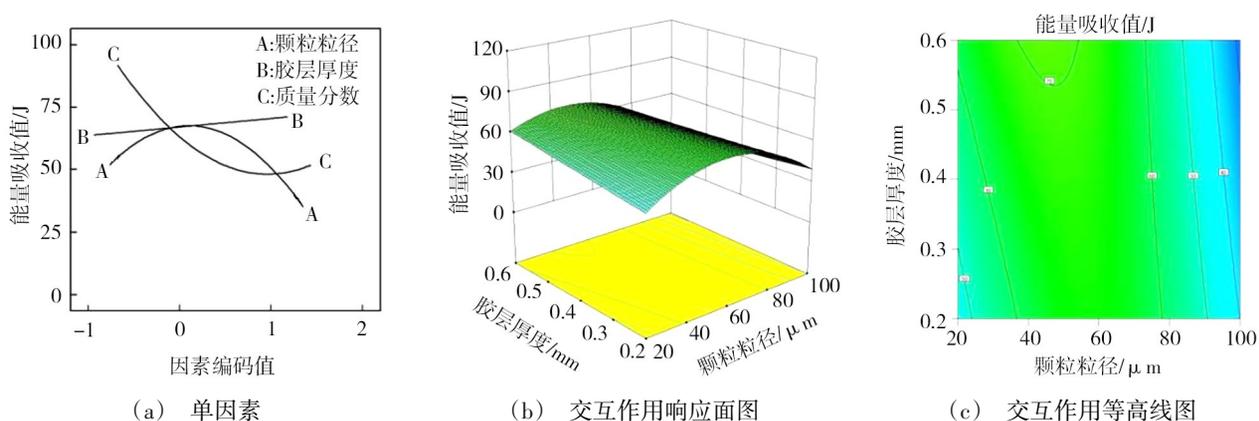


图4 单因素及交互作用对能量吸收值的影响

Fig. 4 Influence of single factor and interaction on energy absorption value

### 3 颗粒增强黏结层的断裂失效有限元模型

#### 3.1 模型建立和界面参数的确定

为了分析黏结接头在拉伸作用下的失效过程,建立了胶层RVE几何模型,并利用ABAQUS软件进行有限元分析。首先采用蒙特卡罗算法和Python脚本控制 $Al_2O_3$ 颗粒尺寸和体积分数,其次采用内聚力模型来模拟胶层与颗粒之间和胶层内部的界面相力学响应,其中基板材料的塑性变形过程采用GTN模型来描述。黏结层与基板之间采用Tie接触,最后采用4节点平面应变单元(CPS4R)对胶层进行网格划分,网格大小为0.02 mm。在模型的左边界和下边界设置约束条件为: $u_x = 0, u_y = 0$ ;模型的右边界设置约束条件为: $u_x = 0$ ;而模型的上边界设置约束条件为: $u_x = 0, u_y = 5 \text{ mm}$ 。将模型下端固定不动,对模型上端施加沿Y轴方向的拉力。作为有限元仿真中重要的一环,界面参数的选取决定了有限元仿真能否得到理想的结果,但一般材料的界面参数难以确定,所以常用ABUQUS仿真模拟和查阅参考文献中的数据得到合适的界面参数,并借助B-K(Benzeggagh-

Kenane)准则判断黏结层的失效。其中: $\sigma_{I_{max}}$ 为17.5 MPa, $\sigma_{II_{max}}$ 为26 MPa, $G_{IC}$ 为0.55 kJ/m<sup>2</sup>, $G_{IIC}$ 为6.25 kJ/m<sup>2</sup>[14]。

#### 3.2 胶层内裂纹扩展分析

为了探究胶层中颗粒粒径与体积分数对黏结强度的影响,通过ABAQUS软件仿真得到了不同粒径和体积分数下的裂纹长度,通过对比不同参数下裂纹长度的大小来说明不同参数对黏结强度的影响。其中应按公式(3)将颗粒质量分数换算为相应的体积分数。不同参数下的裂纹长度变化如图5所示。

$$V_i = \frac{\frac{m_i}{P_i}}{\sum_i^N \frac{m_i}{P_i}} \quad (3)$$

式中, $V_i$ 为 $Al_2O_3$ 颗粒体积分数, $m_i$ 为 $Al_2O_3$ 颗粒的质量分数, $P_i$ 是 $Al_2O_3$ 颗粒的密度, $N$ 是粒子的数量。

由图5(a)可知,在保持体积分数一致的情况下,不同颗粒粒径与胶层的接触面积不同,因此各粒径的裂纹起始时间不同,粒径大的颗粒先产生裂纹。

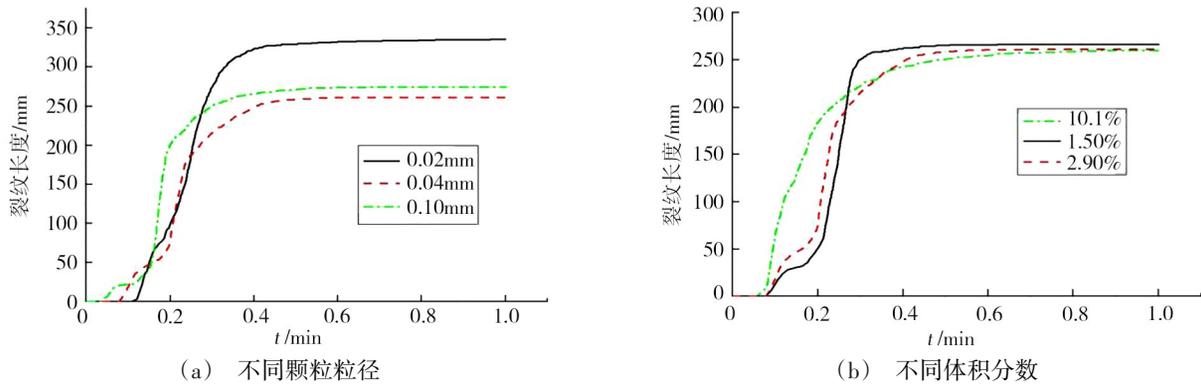


图5 不同颗粒粒径和体积分数下的裂纹长度和时间曲线图  
 Fig. 5 Curves of crack length and time under different particle sizes and volume fractions

裂纹扩展速率最快的是粒径大小为  $100\ \mu\text{m}$ , 然后是粒径大小为  $20\ \mu\text{m}$ , 当颗粒粒径为  $40\ \mu\text{m}$  时裂纹扩展速率最慢。这是因为当颗粒粒径较大时在胶层内所占空间就大, 颗粒数量就会减少, 从而使裂纹扩展的时候阻碍减小, 因此裂纹扩展速度就快; 颗粒粒径较小时, 虽然同等尺寸范围内的颗粒数量增多, 但是小颗粒粒径与胶层的有效接触面积小, 从而每个颗粒界面强度较小, 导致颗粒间的裂纹扩展速度加快。由图 5(b) 可知, 在保持颗粒粒径一致的情况下, 裂纹扩展速率最快的是体积分数为 10.1%, 然后是体积分数为 2.9% 的时候, 当体积分数为 1.5% 时裂纹扩展速率最慢, 原因是体积分数越大导致颗粒数量越多, 所以颗粒之间产生的团聚现象更加明显, 使裂纹在胶层内的扩展速度加快。由于裂纹扩展速度的减

缓, 使其承受更长的裂纹长度的能力增强, 进而提高了接头的断裂韧性<sup>[15]</sup>。

对比图 5(a) 和图 5(b) 可以发现, 不同颗粒粒径下最终裂纹长度有很大的差异, 但在不同体积分数下最终裂纹长度差异不大, 这也从侧面说明了颗粒粒径对黏结强度的影响比颗粒体积分数大。而从扩展速率来看, 仿真与试验结果相似。

### 3.3 模型断裂过程分析

通过 ABAQUS 有限元仿真软件对黏结接头的最优参数进行单轴拉伸的数值模拟, 分析  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒加入胶层后的增韧机理。图 6 是颗粒粒径为  $20\ \mu\text{m}$ 、体积分数为 1.5% 的条件下, 黏结层内的应力分布云图和利用 SEM 观察得到的拉剪断口微观形貌图。

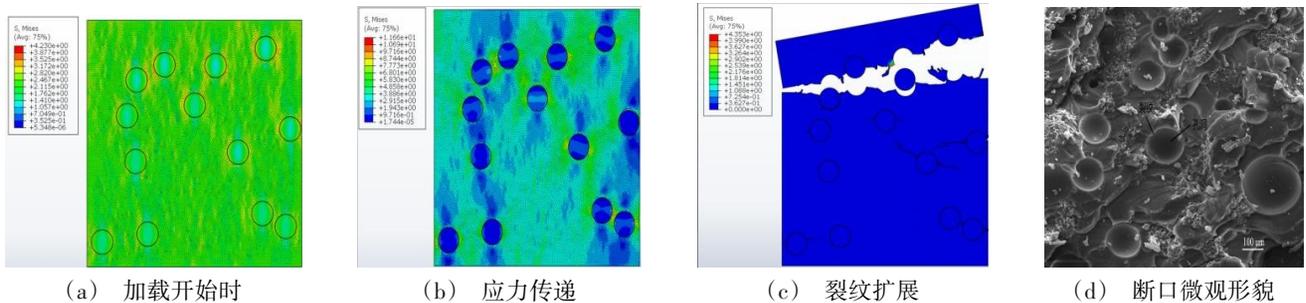


图6 胶层断裂过程应力分布图和SEM微观形貌图  
 Fig. 6 The stress distribution of fracture process of adhesive layer and SEM micrograph

如图 6(a) 所示, 在模型加载初期, 应力出现在基体顶端, 这是因为试件是由底部固定从上端进行拉伸。如图 6(b) 所示, 颗粒周围逐渐出现应力, 对裂纹扩展路径产生影响。随着加载的继续, 颗粒附近有高应力分布。如图 6(c) 所示, 随着裂纹的扩展, 裂纹周围的应力会向周围颗粒传递, 当裂纹扩展时遇到下一个颗粒, 裂纹将形成新的扩展路径, 当裂纹改变

扩展路径时需要大量的载荷提供支持, 因此达到增强基体材料韧性的目的。如图 6(d) 所示, 由于颗粒的脱黏, 在断口的表面会留下一个个球形的孔洞, 裂纹出现在孔洞的周围, 并且在颗粒之间拓展, 改变了裂纹的扩展路径, 增加了裂纹长度, 裂纹扩展过程中消耗的能量也会增加, 从而提高黏结接头的强度, 仿真与断口分析结果一致。

## 4 结论

(1)基于BBD方法建立 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒增强黏结接头失效载荷与能量吸收值的多元非线性回归模型,并通过试验验证了模型的可靠性,确定了1.5 mm厚的5182铝合金薄板黏结最优特征参数颗粒粒径为46  $\mu\text{m}$ 、胶层厚度为0.6 mm、质量分数为5%。

(2)颗粒粒径、胶层厚度以及质量分数三个影响黏结接头质量的因素中,颗粒粒径对接头失效载荷的影响最大,其次是胶层厚度,颗粒质量分数的影响最小。颗粒质量分数对能量吸收值影响最显著,其次是颗粒粒径和胶层厚度。

(3)仿真结果表明,颗粒粒径对裂纹扩展速率的影响规律为先减小后增大;体积分数对裂纹扩展速率的影响规律为逐渐减小;这与单因素分析结果一致。在胶层中加入 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒可以增加裂纹长度,提高胶层的断裂能,进而增强黏结接头的力学性能。

### 参考文献

- [1] 那景新,浦磊鑫,范以撒,等. 湿热环境对Sikaflex-265铝合金黏接接头失效强度的影响[J]. 吉林大学学报(工学版),2018,48(5):1131-1138.
- NA J X, PU L X, FAN Y Z, et al. Effect of temperature and humidity on the failure strength of Sikaflex-265 aluminum adhesive joints[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 48(5): 1131-1138.
- [2] YI J Q, ZENG K, HE X C, et al. Nonlinear multiple regression model and optimization of process parameters for weld bonding of DP780 high strength steel [J]. Materials Transactions, 2020, 61(4): 700-707.
- [3] 栾建泽,那景新,谭伟,等. 服役低温老化对铝合金-玄武岩纤维增强树脂复合材料黏接接头力学性能的影响及失效预测[J]. 复合材料学报,2020,37(8):1884-1893.
- LUAN J Z, NA J X, TAN W, et al. Effect of service low-temperature aging on mechanical properties of aluminum alloy-basalt fiber reinforced polymer composite bonding joints and failure prediction[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(8): 1884-1893.
- [4] HU P, HUANG Z Y, JIN G F, et al. Preparation of inorganic filler modified epoxy resin adhesive and study on its compatibility with UDMH [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1802(2): 022046.
- [5] KARTHIKEYAN L, ROBERT T M, MATHEW D, et al. Novel epoxy resin adhesives toughened by functionalized poly(ether ether ketone)s[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2021, 106: 102816.
- [6] DRAH A, KOVAČEVIĆ T, RUSMIROVIĆ J, et al. Effect of surface activation of alumina particles on the performances of thermosetting-based composite materials [J]. Journal of Composite Materials, 2019, 53(19): 2727-2742.
- [7] SOLEIMANI E, ZAMANI N. Surface modification of alumina nanoparticles: A dispersion study in organic media [J]. Acta Chimica Slovenica, 2017, 64(3): 644-653.
- [8] HSIEH T H, KINLOCH A J, MASANIA K, et al. The mechanisms and mechanics of the toughening of epoxy polymers modified with silica nanoparticles [J]. Polymer, 2010, 51(26): 6284-6294.
- [9] SILVA L J, RUBIO J C C, PANZERA T H, et al. The effect of silica microparticles and maleic anhydride on the physico-mechanical properties of epoxy matrix phase [J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2012, 20(3): 203-208.
- [10] MA J, MO M S, DU X S, et al. Effect of inorganic nanoparticles on mechanical property, fracture toughness and toughening mechanism of two epoxy systems [J]. Polymer, 2008, 49(16): 3510-3523.
- [11] TAIB A A, BOUKHILI R, ACHIOU S, et al. Bonded joints with composite adherends. Part I. Effect of specimen configuration, adhesive thickness, spewfillet and adherend stiffness on fracture [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2005, 26(4): 226-236.
- [12] MOREIRA D C, BRAGA N R, SPHAIER L A, et al. Size effect on the thermal intensification of alumina filled nanocomposites [J]. Journal of Composite Materials, 2016, 50(26): 3699-3707.
- [13] 李伟平,曾凯,邢保英,等. 胶接点焊接头断裂失效过程的仿真分析[J]. 兵器材料科学与工程, 2020, 43(2): 113-117.
- LI Weiping, ZENG Kai, XING Baoying, et al. Simulation analysis of fracture failure process of spot weld-bonded joint [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2020, 43(2): 113-117.
- [14] MANJUNATHA C M, TAYLOR A C, KINLOCH A J, et al. The cyclic-fatigue behaviour of an epoxy polymer modified with micron-rubber and nano-silica particles [J]. Journal of Materials Science, 2009, 44(16): 4487-4490.
- [15] CAMPILHO R D S G, BANEJA M D, NETO J A B P, et al. Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013, 44: 48-56.