

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20180726.001

交变载荷对 CFRP 复合材料-铝合金粘接接头  
剩余强度的影响

慕文龙, 那景新\*, 秦国锋, 谭伟, 申浩

(吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130022)

**摘 要:** 为了给碳纤维增强聚合物(CFRP)复合材料粘接结构的安全设计及应用提供参考, 针对 CFRP 复合材料-铝合金对接接头, 研究了拉-拉交变载荷作用下的疲劳寿命特性及剩余强度变化规律。设计专用夹具, 完成接头的制作及固化, 并测试其拉伸、剪切准静态失效强度, 在此基础上进行不同载荷水平下的疲劳寿命测试。选取特定载荷水平, 测试不同循环次数后的接头剩余强度, 并对失效形式进行观察分析。结果表明: CFRP 复合材料-铝合金对接接头强度-寿命( $S-N$ )曲线在单对数坐标上符合线性函数规律; 随着交变载荷循环周期的增加, 接头剩余强度呈先慢后快的下降趋势, 而且在较大的载荷水平下, 下降幅度更为明显; 经历交变载荷循环前、后接头失效形式发生改变, 由局部 CFRP 复合材料表层撕裂转变为局部界面破坏。结合试验测试所获得的初始失效准则, 并引入疲劳退化因子, 建立内聚力模型对交变载荷作用下的粘接接头强度衰减进行数值模拟, 结果表明所建立模型能够有效预测交变载荷作用下的接头剩余强度。

**关键词:** 碳纤维增强聚合物复合材料; 粘接接头; 交变载荷; 剩余强度; 内聚力模型

**中图分类号:** TB332      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3851(2019)05-1124-08

Effect of alternating load on residual strength of adhesively bonded  
CFRP composite-aluminum alloy joints

MU Wenlong, NA Jingxin\*, QIN Guofeng, TAN Wei, SHEN Hao

(State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** To provide a reference for the safety design and application of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites adhesive structure, the fatigue life characteristics and residual strength of adhesively bonded CFRP composite-aluminum alloy butt joint were studied. The special fixture was designed to complete the production and solidification of the joints, and the tensile and shear quasi-static failure strength were tested. On the basis, the fatigue life under different stress levels was tested. The residual strength of the joint under specific load levels after different cycles was obtained and the failure modes are observed and analyzed. The results show that the fatigue stress-number of cycle ( $S-N$ ) curve of adhesive joints accords with linear function on the single logarithmic coordinate. With the increase of alternating load cycles, the residual strength of the joint decreases, first slowly and then quickly. The decrease is more obvious under the larger load level. The failure modes of joint also changed which from slight fiber tear of CFRP composite transformer into local interfacial failure. Combined with the initial failure criterion obtained by experiment and the fatigue degradation factor, the cohesive zone model is used to simulate the strength attenuation of the adhesive joint under alternating load, and the results show that the model can predict the residual strength of the joint under alternating load effectively.

**Keywords:** carbon fiber reinforced polymer composites; adhesively bonded joint; alternating load; residual strength; cohesive zone model

收稿日期: 2018-05-17; 录用日期: 2018-07-06; 网络出版时间: 2018-08-08 16:23  
网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180726.001>  
基金项目: 国家自然科学基金(51775230); 吉林大学研究生创新基金资助项目(101832018C198)  
通讯作者: 那景新, 教授, 博士生导师, 研究方向为车身轻量化及新材料连接技术 E-mail: najingxin@jlu.edu.cn  
引用格式: 慕文龙, 那景新, 秦国锋, 等. 交变载荷对 CFRP 复合材料-铝合金粘接接头剩余强度的影响[J]. 复合材料学报, 2019, 36(5): 1124-1131.  
MU Wenlong, NA Jingxin, QIN Guofeng, et al. Effect of alternating load on residual strength of adhesively bonded CFRP composite-aluminum alloy joints[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(5): 1124-1131 (in Chinese).

相比于传统金属材料, 碳纤维增强聚合物 (CFRP) 复合材料具有高比强度、高比模量、耐腐蚀和抗疲劳性能良好等优点, 在航空航天、汽车、建筑等行业得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。然而现有的材料连接技术如焊接、铆接等不能完全满足 CFRP 复合材料连接的需要, CFRP 复合材料连接技术成为制约其进一步发展的关键因素之一。粘接作为一种新型的结构连接技术, 具有密封性好、应力分布均匀、抗疲劳和耐腐蚀等优点, 能够在不破坏零件结构的同时保证一定粘接强度, 实现异种材料连接, 在 CFRP 复合材料连接中起到越来越重要的作用<sup>[3]</sup>。

实际服役过程中, 粘接结构在长期交变载荷作用下, 可能会发生疲劳破坏, 造成其在受力远小于静态失效载荷时发生失效, 从而产生严重事故<sup>[4]</sup>。同时在持续动态载荷作用下, 粘接结构容易萌生疲劳裂纹而发生损伤, 存在一定程度的性能(强度、刚度等)衰减, 影响其使用安全性<sup>[5]</sup>。因此针对交变载荷作用下的粘接接头性能进行研究, 获得疲劳寿命及性能衰减规律, 提供有效的剩余强度预测方法具有十分重要的意义。

现有粘接接头的疲劳性能研究主要集中在接头几何参数、材料属性、疲劳加载条件及表面处理、固化条件等因素对疲劳性能的影响<sup>[4-6]</sup>。邓军等<sup>[7]</sup>通过疲劳试验获得了 CFRP 复合材料板-钢梁粘接结构的线性变化强度-寿命( $S-N$ )曲线, 发现疲劳极限值为最大静载的 30%。Boutar 等<sup>[8]</sup>研究了表面粗糙度和胶层厚度对单搭接接头疲劳性能的影响, 并确定了实现最大疲劳寿命的组合。Jen 等<sup>[9]</sup>发现随着搭接长度和胶层厚度的增加, 接头疲劳强度均呈下降趋势。Yang 等<sup>[10]</sup>研究了不同固化工艺参数(压力、温度和时间)对 CFRP 复合材料-铝合金粘接结构疲劳寿命的影响, 发现固化温度的影响最为显著。Imanaka 等<sup>[11]</sup>对嵌接接头和蝶形对接接头进行疲劳试验, 研究了主应力比和疲劳强度之间的关系, 并在此基础上建立了复杂应力状态下的疲劳失效准则。

针对粘接接头在交变载荷作用下的性能衰减, 学者也展开了相关研究。王玉奇等<sup>[12]</sup>对 5052 铝合金单搭接胶接接头进行了疲劳试验, 结果表明, 在疲劳循环载荷作用下, 接头刚度基本稳定, 而残余强度随着循环载荷周次的增加, 呈现出先增大后减小的变化趋势。赵京南<sup>[13]</sup>通过疲劳试验获取了钢-CFRP 复合材料粘接接头在特定恒幅载荷下的疲劳寿命, 并基于不同加载周期接头的剩余强度和固有

频率变化值对胶层疲劳损伤特性进行了研究。She-noy 等<sup>[14]</sup>对经历疲劳循环后的单搭接接头剩余强度进行测试, 发现随着疲劳循环次数的增加, 接头强度呈非线性下降趋势, 在即将达到疲劳寿命时下降十分迅速。Crocombe 等<sup>[15]</sup>基于背面应变技术对单搭接接头疲劳损伤过程进行了研究, 并通过数值模拟对传感器规格和位置进行了优化。

以往的粘接接头疲劳研究通常针对单搭接接头(内部以剪应力为主), 而很少考虑正应力作用下粘接接头的疲劳性能, 特别是交变载荷对接头剩余强度的影响。本文采用结构胶 Araldite® 2015 制作 CFRP 复合材料-铝合金对接粘接接头, 并对其进行交变载荷作用下的疲劳寿命试验及剩余强度测试, 重点研究了 40%、50% 载荷水平下, 粘接接头失效强度随循环次数的变化规律, 并结合宏观和 SEM 微观观察交变载荷对接头失效形式的影响, 分析其失效机制。在此基础上, 基于双线性内聚力单元建立接头仿真模型, 并引入疲劳退化因子, 对交变载荷作用下的接头剩余强度进行预测。

1 试验材料及方法

1.1 材料选择

本文所选取的粘接剂为 Araldite® 2015 (亨斯迈先进材料有限公司), 其为双组分环氧树脂粘接剂, 具有较高的粘接强度及优异的疲劳性能, 广泛应用于汽车工业; 粘接基材为车体结构中常见的 6061 铝合金及碳纤维增强聚合物基 (CFRP) 复合材料板材。CFRP 复合材料板材选用单向斜纹预浸布加工而成, 其基体和纤维分别是 YPH-23 环氧树脂和 T800 碳纤维, 铺层顺序为  $[(0/90)/0/90/0/90/0/90/0/90]$ , 板材整体厚度为 2 mm; 粘接剂、铝合金及 CFRP 复合材料主要材料参数(制造商提供)如表 1~3 所示。

表 1 Araldite® 2015 材料属性参数  
Table 1 Properties of adhesive Araldite® 2015

Young's modulus/ MPa	Shear modulus/ MPa	Poisson's ratio
1850	560	0.33

表 2 6061 铝合金材料属性参数  
Table 2 Properties of 6061 aluminum alloy

Density/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	Poisson's ratio	Young's modulus/ MPa
2730	0.33	71000

表 3 碳纤维增强聚合物 (CFRP) 复合材料属性参数

Table 3 Material parameters of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite

	$E_x/\text{GPa}$	$E_y/\text{GPa}$	$\nu_{xy}$
Unidirectional-CFRP	$125\pm12$	$10\pm2$	0.07
Twill weave-CFRP	$55\pm5$	$55\pm5$	0.13
	$G_{xy}/\text{GPa}$	$G_{xz}/\text{GPa}$	$G_{yz}/\text{GPa}$
Unidirectional-CFRP	$7\pm0.6$	$2\pm0.5$	$2\pm0.3$
Twill weave-CFRP	$4\pm0.5$	$2\pm0.3$	$2\pm0.3$

Notes:  $E$ —Young's modulus;  $G$ —Shear modulus;  $\nu$ —Poisson's ratio.

1.2 接头制作

本文设计了 CFRP 复合材料-铝合金对接接头, 用来研究粘接接头在正应力状态下的疲劳特性。对接接头尺寸如图 1 所示, 粘接面积为  $25\text{ mm}\times 25\text{ mm}=625\text{ mm}^2$ 。CFRP 复合材料板通过粘接剂与铝合金进行连接, 两侧胶层厚度均为  $0.2\text{ mm}$ 。为了防止试验过程中 CFRP 复合材料板边界发生撕裂, 影响测试结果的一致性, CFRP 复合材料尺寸大于粘接面积, 为  $35\text{ mm}\times 35\text{ mm}=1\,225\text{ mm}^2$ 。

为了获得更加准确的 CFRP 复合材料-铝合金粘接接头失效准则, 提供有效的有限元仿真参数, 本文在通过对接接头准静态拉伸测试获得正应力状态下失效强度的基础上, 设计了剪切加载装置, 对接头进行准静态条件下的剪应力失效强度测试。拉伸、剪切测试原理如图 2 所示。在剪切试验中 CFRP 复合材料片材两侧受力对称分布, 不存在弯曲变形, 从而保证了胶层应力状态达到设计要求。

在试验环境(温度保持在  $25^\circ\text{C}\pm 3^\circ\text{C}$ , 相对湿度保持在  $(50\pm 5)\%$ )条件下, 完成所有试件的粘接。涂胶之前, 对铝合金粘接表面进行喷砂处理, CFRP 复合材料表面采用 800# 砂纸打磨处理, 增加表面粗糙度, 然后使用丙酮对铝合金、CFRP 复合材料粘接表面进行去脂和清洁。待试件干燥后进行

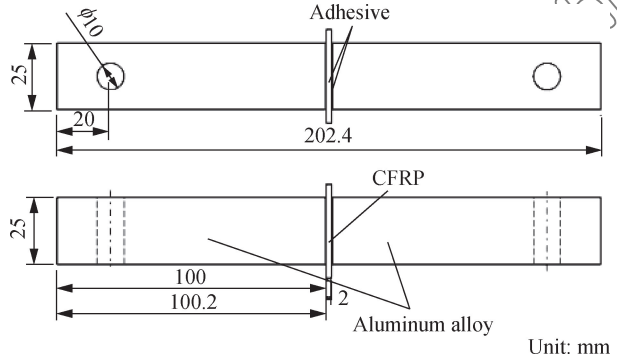


图 1 对接粘接接头尺寸示意图(mm)

Fig. 1 Schematic of steel-aluminum butt joints (mm)

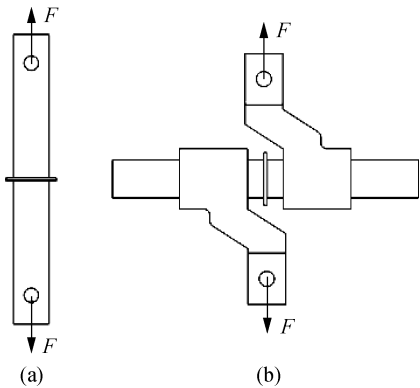


图 2 测试原理图

Fig. 2 Diagram of testing principle

施胶, 并通过所设计的专用夹具完成粘接, 胶层厚度由  $0.2\text{ mm}$  玻璃珠进行控制。粘接完成后在  $80^\circ\text{C}$  高温下进行  $2\text{ h}$  的固化, 并在试验环境中保持  $24\text{ h}$ , 然后进行准静态试验及疲劳试验。粘接夹具如图 3 所示。

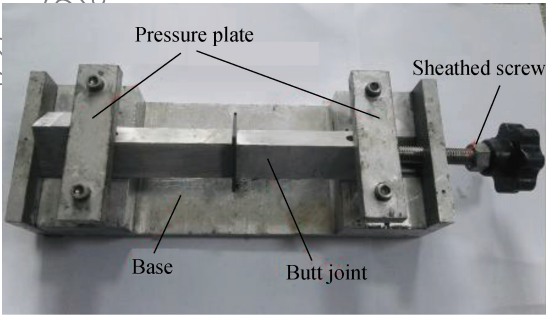


图 3 粘接夹具

Fig. 3 Model of adhesive fixture

1.3 试验方案

使用 WDW3100 微机控制电子万能试验机(长春科新试验仪器有限公司)对固化好的粘接接头进行准静态拉伸、剪切测试。对接接头、剪切加载装置通过万向节与拉伸试验机相连, 以消除测试过程中的非轴向力作用。拉伸试验机以  $1\text{ mm/min}$  的恒定速度拉伸试件直至破坏, 每组测试重复 5 次。由于结构胶粘接接头变形较小, 在拉伸过程中, 试验机加持机构(包括试验机横梁、夹头等部件)之间的微小间隙及部件变形都会导致位移采集不准确。因此在试验过程中, 采用基于三维数字图像相关技术(3D Digital Image Correlation, 3D-DIC)的非接触全场应变测量系统测取接头真实位移, 试验现场如图 4 所示。试验载荷由试验机力传感器采集。

采用动态伺服加载测试系统(吉林冠腾自动化



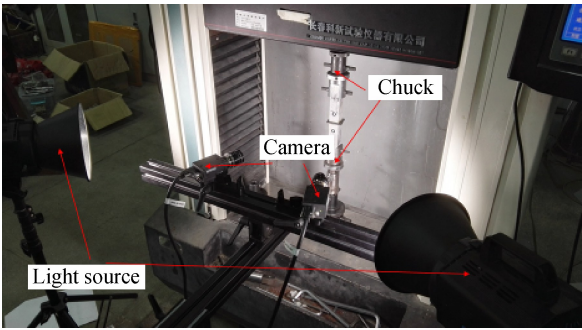


图 4 粘接接头拉伸测试现场  
Fig. 4 Joint test site

技术有限公司)对接头进行拉-拉恒幅正弦波加载试验(如图 5 所示)。为了提高试验效率,设计了杠杆加载结构(如图 5 局部放大图所示),能够同时对两个粘接接头进行试验。试验采用力控制方式,加载频率为 10 Hz,载荷比(最小载荷/最大载荷) $r=0.1$ 。在疲劳寿命测试中,CFRP 复合材料-铝合金粘接接头的载荷水平共分为 3 级,交变载荷的峰值分别设定为准静态失效载荷(Quasi-Static Failure Load, QSFL)的 90%、80%和 70%,每个载荷水平下至少做 3 次疲劳试验;在剩余强度测试中,将载荷水平分别设定为准静态失效载荷的 40%、50%,循环周期分为 5 组(20 万、40 万、60 万、80 万和 100 万次),每组至少做 3 次试验,循环加载试验完成之后再对其分别进行准静态拉伸试验。

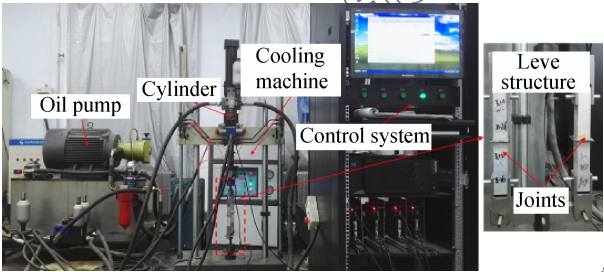


图 5 动态伺服加载测试系统  
Fig. 5 Dynamic servo loading test system

2 试验结果与分析

2.1 CFRP 复合材料-铝合金粘接接头疲劳寿命

计算不同载荷水平下疲劳应力  $S$ , 计算公式如下:

$$S = \frac{F_{\max}}{A}$$
 (1)

式中:  $F_{\max}$  为交变载荷峰值;  $A$  为接头粘接面积。

以应力为纵坐标, 交变载荷循环次数的对数为横坐标绘制散点图。考虑到疲劳试验往往具有较大的离散性, 采用散点法对疲劳试验结果进行处理, 剔

除偏差较大的无效数据。根据试验数据分布规律, 选取线性函数作为目标拟合函数, 并采用最小二乘法对有效数据进行拟合, 获得应力-疲劳寿命( $S-N$ ) 曲线如图 6 所示, 数据拟合优度  $R^2$  为 0.9167, 说明试验数据具有较好的一致性,  $S-N$  曲线在单对数坐标上符合线性函数规律。同时可知, CFRP 复合材料-铝合金对接接头具有良好的疲劳性能, 在 70% 载荷水平下, 接头平均疲劳寿命即达到 124 万次。

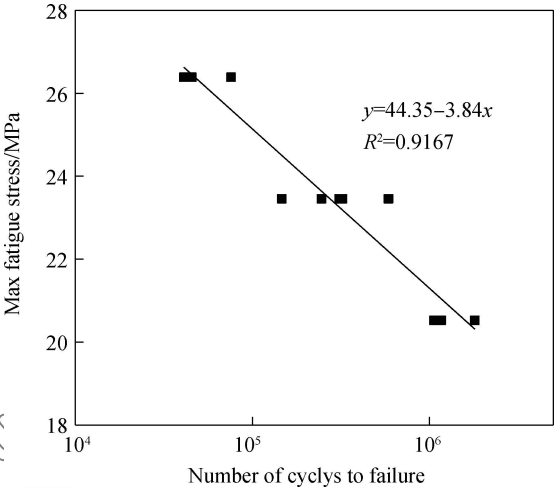


图 6 CFRP 复合材料-铝合金粘接接头疲劳寿命试验数据散点图及  
剩余强度-寿命( $S-N$ ) 曲线  
Fig. 6 Scatter diagram of fatigue life test data and fatigue stress-  
number of cycle ( $S-N$ ) curve of adhesively bonded  
CFRP composite Al butt joints

2.2 CFRP 复合材料-铝合金粘接接头剩余强度

对经历不同循环次数的粘接接头准静态失效载荷进行统计, 接头剩余强度  $S_D$  计算如下:

$$S_D(N) = \frac{F_r(N)}{A}$$
 (2)

式中,  $F_r(N)$  为交变载荷循环  $N$  次后的粘接接头准静态拉伸失效载荷。

对剩余强度数据进行统计处理, 获得 40% 和 50% 载荷水平下, 不同循环次数后的接头剩余强度, 如图 7 所示。可知, 交变载荷对 CFRP 复合材料-铝合金粘接接头失效强度存在影响, 针对所选取的两种载荷水平, 随着循环次数的增加, CFRP 复合材料-铝合金粘接接头的拉伸剩余强度呈下降趋势。在 40%、50% 载荷水平下, 经历 20 万次循环后, 接头强度相对于初始准静态失效强度分别下降了 1.19% 和 1.79%, 循环次数从 20 万到 40 万、40 万到 60 万, 两种情况下接头强度相比于初始失效强度分别下降了 1.60%、2.59% 和 1.57%、



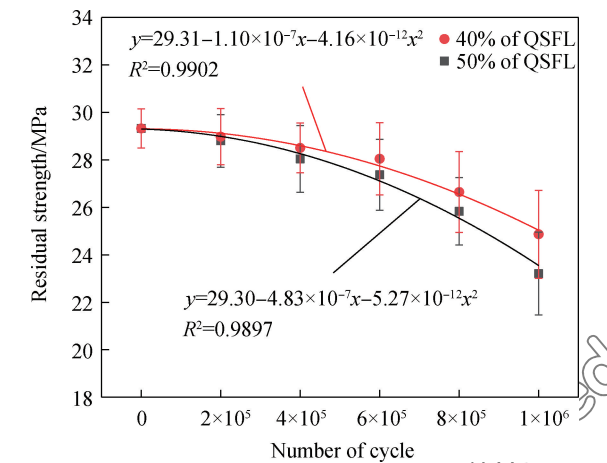


图 7 40%、50%准静态失效载荷(QSFL)水平下 CFRP 复合材料-铝合金粘接接头剩余强度随循环周期变化规律

Fig. 7 Residual strength of adhesively bonded CFRP composite-aluminum alloy joints as a function of fatigue cycles under 40%, 50% quasi-static failure load (QSFL)

2.28%，下降幅度不明显。而当交变载荷循环次数达到 60 万次后，接头强度下降幅度增大，从 60 万到 80 万、80 万到 100 万，在 40%、50% 载荷水平下，接头强度分别下降了 4.77%、5.25% 和 6.07%、8.93%。由上述分析可知，在初始加载阶段，CFRP 复合材料-铝合金粘接接头强度变化不明显，而随着循环次数的增加，交变载荷对接头强度的影响逐渐增大，表明粘接接头在载荷循环作用下，胶层内部裂纹逐渐扩大，损伤不断累积<sup>[12-14]</sup>。

对比 40% 和 50% 载荷水平下 CFRP 复合材料-铝合金粘接接头剩余强度可以发现，在经历相同的循环次数后，50% 载荷下接头强度下降均更加明显。经过 100 万次循环后，接头强度达到最小，在 40% 载荷水平下，粘接接头强度相比于初始准静态失效强度下降了 15.21%，而在 50% 载荷水平下，下降了 20.85%。说明交变载荷的大小对接头强度衰减存在影响，较大的载荷水平加剧了接头损伤，造成强度下降更加明显。

根据接头剩余强度随交变载荷循环次数的变化规律，采用二次多项式对试验数据进行拟合，得到的拟合曲线及拟合优度  $R^2$  如图 7 所示。可知，两种载荷水平下拟合优度  $R^2$  都接近 1，具有较高的拟合精度。

2.3 CFRP 复合材料-铝合金粘接接头失效形式

图 8 为对未经历载荷循环，40%、50% 载荷水平下经历 100 万次循环 CFRP 复合材料-铝合金粘

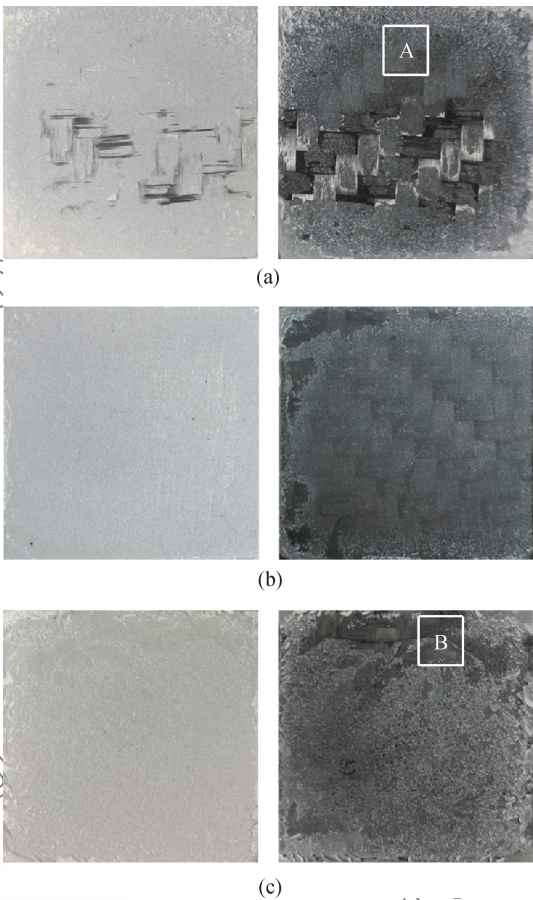


图 8 CFRP 复合材料-铝合金粘接接头失效表面 SEM 图像

((a) 未经历循环; (b) 40% QSFL 载荷水平下经历 100 万次循环; (c) 50% QSFL 载荷水平下经历 100 万次循环)

Fig. 8 Representative fracture surfaces SEM images of adhesively bonded CFRP composite-Al butt joints ((a) without cycle; (b) 10<sup>6</sup> cycles at 40% of QSFL; (c) 10<sup>6</sup> cycles at 50% of QSFL)

接接头在准静态拉伸试验后的失效表面进行宏观观察，并对局部区域(图中方框 A、B 标示)采用 SEM 微观观察，如图 9 所示，分析接头失效形式。可知，经历交变循环前、后接头失效形式均呈现以内聚破坏为主的混合失效，说明本文所采用的接头粘接工艺具有一定的有效性。

由图 9(a)和图 9(b)可知，在未经历循环的接头断面 A 区域，残留在基材表面的粘接剂较多，且分布均匀，而由图 9(c)和图 9(d)可知，经历 100 万次循环后，接头的 B 区域内胶层明显变薄，失效表面更加平整，更接近界面破坏。文献[16-17]中观察到相同的现象。

未经循环的 CFRP 复合材料-铝合金粘接接头发生了一定的 CFRP 复合材料表层撕裂，说明在初始条件下，Araldite® 2015 粘接强度与 CFRP 复合

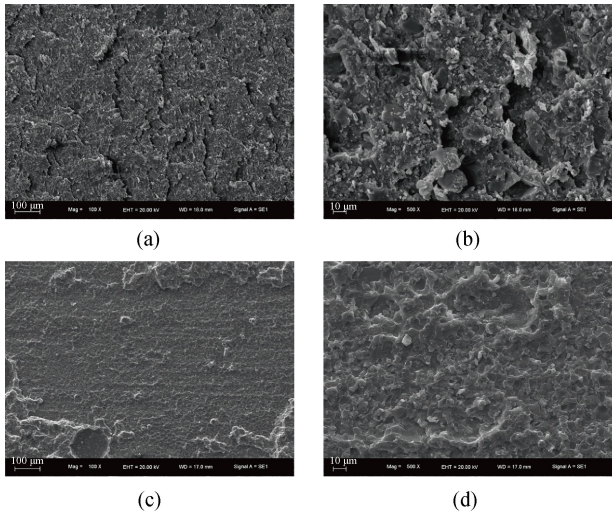


图9 CFRP 复合材料-铝合金粘接接头失效表面 SEM 图像 ((a)图8中区域A的100倍放大图;(b)图8中区域A的500倍放大图;(c)图8中区域B的100倍放大图;(d)图8中区域B的500倍放大图)

Fig. 9 Representative fracture surfaces SEM images of adhesively bonded CFRP composite-Al butt joints ((a) 100 times enlarged view of region A in Fig. 8;(b) 500 times enlarged view of region A in Fig. 8;(c) 100 times enlarged view of region B in Fig. 8;(d) 500 times enlarged view of region B in Fig. 8)

材料树脂基底粘接强度接近,而经历100万次交变载荷循环后,接头断裂表面不再出现CFRP复合材料撕裂,转而呈现局部的界面破坏,说明交变载荷造成了胶层损伤,同时对粘接界面存在一定影响。

### 3 数值模拟

#### 3.1 数值模拟方法

为了模拟交变载荷作用下发生损伤后粘接接头的失效过程,实现接头剩余强度预测,采用ABAQUS®软件建立CFRP复合材料-铝合金粘接

接头三维有限元模型,并进行数值模拟分析。

所建立的CFRP复合材料-铝合金粘接接头模型如图10所示,其中两侧铝合金沿坐标系 $z$ 轴方向长度为20 mm(与拉伸试验中位移采集点位置相对应),在分析过程中考虑了几何非线性。由于胶层附近区域存在局部应力集中和较大的应力梯度,因此采用变密度网格划分技术,控制单元尺寸大小,局部网格如图10中放大图所示。胶层采用内聚单元(COH3D8),CFRP复合材料采用连续壳单元(SC8R),铝合金采用3D应力单元(C3D8R)。接头的左侧截面采用固定约束,右侧截面加载水平位移,并约束其他方向的自由度。

本文中胶层内聚力模型采用经典的双线性牵引力-位移法则,其所包含的关键参数有初始刚度 $E$ 、临界牵引力 $T$ 和断裂能 $G$ 。采用内聚力单元进行粘接接头有限元仿真时,需要提供合适的初始失效准则,当满足该准则时,材料开始失效。二次应力准则广泛应用于粘接结构的失效预测<sup>[18]</sup>,如下式:

$$\left(\frac{T_1}{T_1^0}\right)^2 + \left(\frac{T_{II}}{T_{II}^0}\right)^2 = 1 \tag{3}$$

式中: $T_1$ 、 $T_{II}$ 分别为材料法向和切向应力, $T_1^0$ 、 $T_{II}^0$ 分别为法向和切向临界牵引力,即对应本文测试获得的粘接接头拉伸失效强度和剪切失效强度。

当材料达到初始损伤后,随着破坏的进展其刚度开始退化,退化过程采用能量法则来控制,如下式:

$$\frac{G_1}{G_{1c}} + \frac{G_{II}}{G_{IIc}} = 1 \tag{4}$$

式中: $G_1$ 、 $G_{II}$ 为由法向和切向牵引力做功所释放的能量, $G_{1c}$ 和 $G_{IIc}$ 为对应方向的断裂能。

铝合金和CFRP复合材料的仿真参数分别如

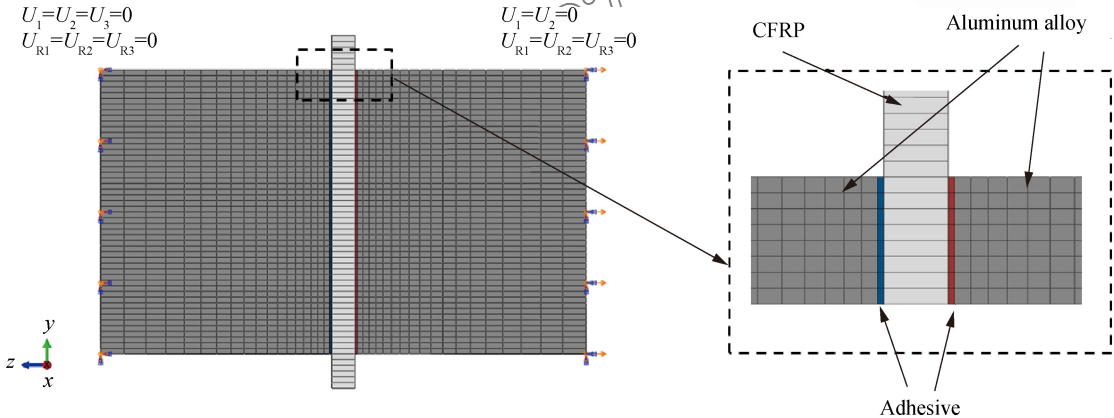


图10 CFRP 复合材料-铝合金对接接头的有限元模型

Fig. 10 Finite element model of adhesively bonded CFRP composite-Al butt joints

表 2 和 3 所示, 粘接胶层的内聚力模型参数如表 4 所示, 其中模式 I 和 II 的临界牵引力通过试验测试获得, 其他参数参考已有的研究<sup>[19]</sup>。

表 4 粘接剂内聚力模型参数  
Table 4 Parameters of cohesive zone model of adhesive Araldite® 2015

Parameter	Value
Initial stiffness $E_I$ /GPa	1.82
Initial stiffness $E_{II}$ /GPa	0.56
Critical pulling force $T_I$ /MPa	29.3
Critical pulling force $T_{II}$ /MPa	26.5
Fracture energy $G_{IC}$ /(N·mm <sup>-1</sup> )	0.43
Fracture energy $G_{IIC}$ /(N·mm <sup>-1</sup> )	4.7

为了实现经历交变载荷循环后粘接接头的失效预测, 定义疲劳退化因子  $D$ , 其计算公式如下:

$$D = \frac{S_D}{S_F} \tag{5}$$

式中:  $S_D$  为不同循环次数后的接头平均剩余强度;  $S_F$  为接头准静态平均失效强度。以 50% 载荷水平为例, 将图 7 中接头剩余强度衰减函数及准静态失效强度代入式 (5), 获得任意循环周期下的退化因子函数如下式:

$$D = \frac{S_D}{S_F}$$
$$= \frac{29.30 - 4.83 \times 10^{-7} N - 5.27 \times 10^{-13} N^2}{29.32}$$
$$= 1.00 - 1.65 \times 10^{-8} N - 1.79 \times 10^{-13} N^2 \tag{6}$$

假设经历交变载荷循环后, 粘接剂内聚力模型各参数随退化因子等幅度退化<sup>[20-21]</sup>。通过将原始参数与疲劳退化因子相乘, 获得退化后的初始刚度、临界牵引力及断裂能, 并将其重新代入接头仿真模型, 从而实现经历交变载荷循环后的接头剩余强度预测。

3.3 仿真分析结果

CFRP 复合材料-铝合金对接接头试验与仿真载荷-位移曲线对比如图 11 所示。可知, 有限元仿真曲线与试验获得载荷-位移曲线基本吻合, 其中最大拉伸载荷相差 1.57%, 最大位移相差 3.24%, 说明仿真模型具有一定的有效性。

在 50% 载荷水平下, 不同循环次数后 CFRP 复合材料-铝合金粘接接头的试验、仿真剩余强度如图 12 所示。可知, 仿真结果与试验数据相比最大误差不超过 1.6%, 表明本文所采用的预测模型具有一定精度, 能够实现不同循环次数后的接头剩余

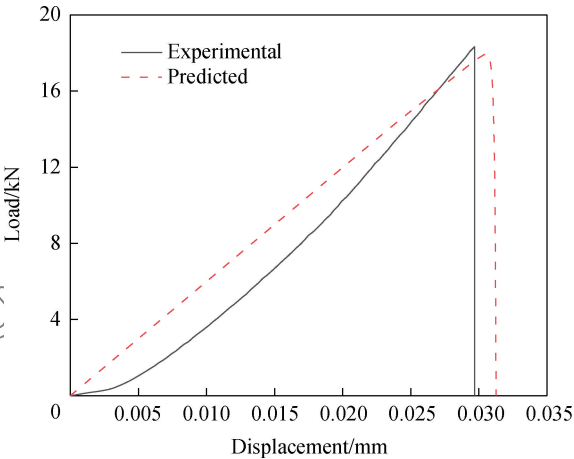


图 11 CFRP 复合材料-铝合金粘接接头试验与仿真载荷-位移曲线  
Fig. 11 Experimental and predicted load-displacement curves of adhesively bonded CFRP composite-Al butt joints

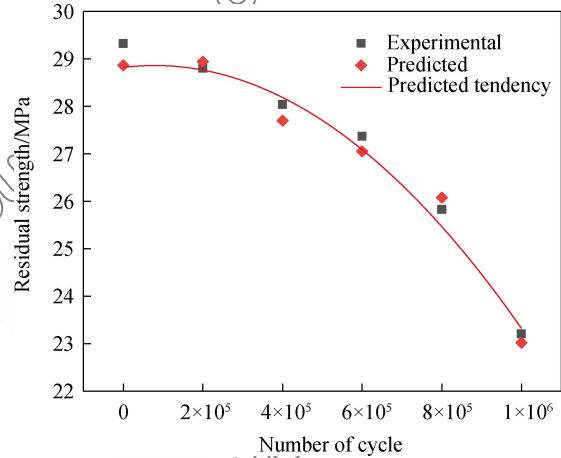


图 12 CFRP 复合材料-铝合金粘接接头试验与仿真的剩余强度  
Fig. 12 Experimental and predicted residual strength of adhesively bonded CFRP composite-Al butt joints

强度预测。

4 结 论

(1) 交变载荷对碳纤维增强聚合物基 (CFRP) 复合材料-铝合金粘接接头剩余强度存在影响。随着循环次数的增加, 接头剩余强度逐渐下降。在初始加载阶段, 强度下降不明显, 而随着交变载荷的持续作用, 下降幅度逐渐增大, 总体呈先慢后快的下降趋势, 衰减规律符合二次多项式函数。同时较大的疲劳载荷水平加剧了粘接接头的强度下降。

(2) 在交变载荷作用下, 接头失效形式发生一定程度改变。未经历交变载荷循环的 CFRP 复合材料-铝合金粘接接头发生局部 CFRP 复合材料撕裂, 而经历 100 万次循环后, 接头出现局部界面破



坏,说明针对本文所选取材料,交变载荷造成了胶层损伤,同时对基材-粘接剂界面存在一定影响。

(3) 建立粘接接头有限元仿真模型,结合试验测得的初始失效准则,并引入疲劳退化因子,对内聚力本构参数进行修正,获得任意循环周期下的接头剩余强度。通过与试验结果进行对比,表明数值模型能够有效实现交变载荷作用下的CFRP复合材料-铝合金粘接接头剩余强度预测。

## 参考文献:

- [1] ELMARAKBI A. Advanced composite materials for automotive applications: Structural integrity and crashworthiness [M]. John Wiley & Sons, Ltd., 2014.
- [2] 孙旋,童明波,陈智,等.碳纤维复合材料接头力学性能试验与仿真分析[J].复合材料学报,2016,33(11): 2517-2527.  
SUN X, TONG M B, CHEN Z, et al. Test and simulation analysis of mechanical properties for joint of carbon fiber composites[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2016, 33(11): 2517-2527 (in Chinese).
- [3] SILVA L F M D, ÖCHSNER A, ADAMS R D. Handbook of adhesion technology[M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [4] WAHAB M M A. Fatigue in adhesively bonded joints: A review[J]. ISRN Materials Science, 2012, DOI: 10.5402/2012/746308.
- [5] IMANAKA M, HAMANO T, MORIMOTO A, et al. Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive[J]. Journal of Adhesion Science & Technology, 2003, 17(7): 981-994.
- [6] GOEIJ W C D, TOOREN M J L V, BEUKERS A. Composite adhesive joints under cyclic loading[J]. Materials & Design, 1999, 20(5): 213-221.
- [7] 邓军,黄培彦. CFRP板与钢梁粘接的疲劳性能研究[J].土木工程学报,2008,41(5): 14-18.  
DENG J, HUANG P Y. Fatigue behaviour of adhesive bonding in steel beams strengthened with a CFRP plate[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(5): 14-18 (in Chinese).
- [8] BOUTAR Y, NAÏMI S, MEZLINI S, et al. Fatigue resistance of an aluminium one-component polyurethane adhesive joint for the automotive industry: Effect of surface roughness and adhesive thickness[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2018, 83: 143-152.
- [9] JEN Y M, KO C W. Evaluation of fatigue life of adhesively bonded aluminum single-lap joints using interfacial parameters[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(2): 330-340.
- [10] YANG Z J, ZHANG K F, MA Y Y, et al. Orthogonal test research on the effect of curing technology on the fatigue life of adhesive bonding of CFRP and aluminum alloy[J]. Advanced Materials Research, 2011, 181-182: 534-539.
- [11] IMANAKA M, IWATA T. Fatigue failure criterion of adhesively-bonded joints under combined stress conditions[J]. Journal of Adhesion, 1996, 59(1-4): 111-126.
- [12] 王玉奇,何晓聪,曾凯,等.基于循环载荷的单搭胶接头残余强度分析[J].材料导报,2016,30(24): 82-87+93.  
WANG Y Q, HE X C, ZENG K, et al. Research on residual strength of adhesive bonding of single lap joints[J]. Materials Review, 2016, 30(24): 82-87+93 (in Chinese).
- [13] 赵京南.钢-CFRP胶接头疲劳损伤特性试验研究[D].大连:大连理工大学,2016.  
ZHAO J G. Experimental study on fatigue damage performance of CFRP-steel adhesively bonded joint [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016 (in Chinese).
- [14] SHENOY V, ASHCROFT I A, CRITCHLOW G W, et al. Strength wearout of adhesively bonded joints under constant amplitude fatigue[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(5): 820-830.
- [15] CROCOMBE A D, ONG C Y, CHAN C M, et al. Investigating fatigue damage evolution in adhesively bonded structures using backface strain measurement[J]. Journal of Adhesion, 2002, 78(9): 745-776.
- [16] 周申光.振动载荷下单搭胶接头的疲劳特性研究[D].大连:大连理工大学,2014.  
ZHOU S G. Research on fatigue behavior of single-lap joint under vibration loads[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014 (in Chinese).
- [17] PANG J, DU Y, WU K, et al. Fatigue analysis of adhesive joints under vibration loading[J]. Journal of Adhesion, 2013, 89(12): 899-920.
- [18] LEE M, MEO E, BLACKLOCK M, et al. Predicting the strength of adhesively bonded joints of variable thickness using a cohesive element approach[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2015, 58: 44-52.
- [19] AZEVEDO J C S, CAMPILHO R D S G, SILVA F J G D, et al. Cohesive law estimation of adhesive joints in mode II condition[J]. Theoretical & Applied Fracture Mechanics, 2015, 80: 143-154.
- [20] SUGIMAN S, CROCOMBE A D, ASHCROFT I A, et al. The fatigue response of environmentally degraded adhesively bonded aluminium structures[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2013, 41(3): 80-91.
- [21] HAN X, CROCOMBE A D, ANWAR S N R, et al. The strength prediction of adhesive single lap joints exposed to long term loading in a hostile environment[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2014, 55: 1-11.