

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20190708.001

# 服役温度对铝合金-碳纤维增强树脂复合材料 粘接接头准静态失效的影响

栾建泽, 宋学伟, 那景新\*, 谭伟, 慕文龙  
(吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130022)

**摘 要:** 为了研究服役温度对铝合金-碳纤维增强树脂 (CFRP) 复合材料粘接接头准静态失效的影响, 本文加工了铝合金-CFRP 复合材料粘接接头。考虑车辆实际运行工况下的服役温度, 选取低温 (-40℃)、常温 (20℃) 和高温 (80℃) 三种环境温度, 结合设计的 Arcan 夹具对铝合金-CFRP 复合材料粘接接头分别进行 1 mm/min 和 100 mm/min 的准静态试验, 得到不同温度下铝合金-CFRP 复合材料对接接头 (BJs)、45°嵌接接头 (45°SJs) 和剪切接头 (TSJs) 的准静态失效强度, 并结合失效断面对接头失效形式进行分析, 建立了失效准则方程和三维响应曲面。结果表明: 不同加载速率下的铝合金-CFRP 复合材料粘接接头失效强度在高温环境下均呈明显的下降趋势, 在低温环境下均呈一定程度的上升趋势。高温下的失效模式为胶层的内聚失效, 低温下的失效模式中纤维撕裂的比例上升。相对于 1 mm/min 加载速率下的准静态失效强度, 各温度和应力状态下的铝合金-CFRP 复合材料粘接接头在 100 mm/min 加载速率下的准静态失效强度明显提高。

**关键词:** 碳纤维增强树脂; 复合材料; 粘接接头; 温度; 加载速率; 失效

**中图分类号:** TB332      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3851(2020)05-1088-08

## Effect of service temperature on quasi-static failure of aluminum alloy-carbon fiber reinforced polymer composite bonded joints

LUAN Jianze, SONG Xuwei, NA Jingxin\*, TAN Wei, MU Wenlong  
(State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In order to study the effect of service temperature on quasi-static failure of aluminum-carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite bonded joints, aluminum alloy-CFRP composite bonded joints were processed. Considering the service temperature under actual operating conditions of the vehicle, three ambient temperatures of low temperature (-40℃), normal temperature (20℃) and high temperature (80℃) were selected, and the loading rates were 1 mm/min and 100 mm/min in combination with the designed Arcan fixture. The quasi-static failure strength of aluminum alloy-CFRP composite butt joints (BJs), 45° scarf joints (45°SJs) and shear joints (TSJs) at different temperatures were obtained. Combined with the failure section to analyze the failure mode of the joint, the failure criterion equation and the three-dimensional response surface were established. The results show that the quasi-static failure strength of aluminum alloy-CFRP composite bonded joints at different loading rates show a significant downward trend in high temperature environment, and it shows a certain upward trend in low temperature environment. The failure mode in high temperature environment is the cohesive failure of adhesive layer, and the ratio of fiber tear increases in low temperature environment. Compared with the quasi-static failure strength at the loading rate of 1 mm/min, the quasi-static failure strength of the aluminum alloy-CFRP composite bonded joint under different temperature and stress conditions is obviously improved at the loading rate of 100 mm/min.

**Keywords:** carbon fiber reinforced polymer; composite; adhesive joint; temperature; loading rate; failure

收稿日期: 2019-05-30; 录用日期: 2019-06-25; 网络出版时间: 2019-07-10 09:43:11  
网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190708.001>  
基金项目: 国家自然科学基金 (51775230); 吉林大学研究生创新研究计划项目 (101832018C198)  
通信作者: 那景新, 教授, 博士生导师, 研究方向为车身结构设计理论与轻量化技术 Email: [najingxin@jlu.edu.cn](mailto:najingxin@jlu.edu.cn)  
引用格式: 栾建泽, 宋学伟, 那景新, 等. 服役温度对铝合金-碳纤维增强树脂复合材料粘接接头准静态失效的影响 [J]. 复合材料学报, 2020, 37(5): 1088-1095.  
LUAN Jianze, SONG Xuwei, NA Jingxin, et al. Effect of service temperature on quasi-static failure of aluminum alloy-carbon fiber reinforced polymer composite bonded joints[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(5): 1088-1095(in Chinese).

目前汽车行业主要面临能源消耗和环境污染两大挑战,通过使用各种新型材料以减轻汽车质量是实现汽车轻量化的主要方法之一<sup>[1]</sup>。多材料车身是未来汽车轻量化发展的必然方向,其中,铝合金、碳纤维增强树脂(CFRP)复合材料由于其比强度高的性能,成为在多材料车身制造发展中的典型新型材料<sup>[2]</sup>。传统材料连接技术如焊接、铆接等,由于容易造成应力集中,在应用中受到很大限制。粘接作为一种新型连接技术,具有应力分布均匀、抗疲劳性好、密封性好、可实现异种材料连接等优点,在工程领域的设计应用中受到越来越广泛的重视<sup>[3]</sup>。

应用在车辆中的粘接结构经常处于不同的服役温度,其中高温和低温是两种典型的极限工况。粘接剂作为一种聚合物材料,服役温度的变化会影响其物理性能、化学性能及力学性能。在高温环境下,粘接结构的承载能力显著下降;在低温环境下,粘接剂则表现为脆性增强。当环境温度在粘接剂玻璃化转变温度附近时,粘接剂会在玻璃态与高弹态间转变,向高弹态转变的过程中,粘接结构的失效强度和弹性模量急剧下降<sup>[4-5]</sup>。复合材料中的树脂同样随着温度的升高,会先后经历玻璃化转变和热分解两个劣化过程,对复合材料性能产生影响<sup>[6-7]</sup>。除此之外,粘接接头随着服役温度的改变,在粘接剂和粘接基材间产生热应力。因此,不同服役温度时,粘接接头的力学性能由胶粘剂、复合材料和它们之间的热应力共同影响。

Banea等<sup>[8]</sup>研究了车用环氧粘接剂本体在室温(RT)、低温(-40℃)和高温(80℃)下的性能。结果显示,粘接剂在高温条件下拉伸强度降低,延展性增强;在低温条件下,粘接剂的脆性增强,拉伸强度升高。Viana等<sup>[9]</sup>研究了接头粘接强度在极限温度条件下,胶粘剂本体性能的退化;结果发现,低温使粘接接头产生残余应力,从而影响粘接接头的强度;高温也使粘接接头产生残余应力,但由于聚合物链的缓解,残余应力不会产生非常显著地变化,除非对该接头进行高低温循环。Zhang等<sup>[10]</sup>研究了环境条件对复合材料粘接接头粘接性能的影响,结果发现,热效应对粘接接头拉伸强度的影响大于对剪切强度的影响,高温能极大地提高胶粘剂的塑性,尤其对于韧性较强的胶粘剂。Plangger等<sup>[11]</sup>研究了温度对环氧胶粘剂的影响,结果表明,与常温(RT)下主要以粘接失效相比,在低温(-30℃)时,会发生粘接剂和粘接基材的混合失效,从而体现温度对环氧

粘接剂粘接失效的影响。Zhang等<sup>[12]</sup>研究了玻璃纤维增强树脂复合材料和环氧树脂粘接剂双搭接接头在-35~60℃范围内的拉伸力学性能,结果表明,随着温度的升高,断裂机制由纤维撕裂向粘接破坏转变。当温度低于粘接剂玻璃化转变温度时,裂纹产生时的载荷不受其影响。但低温下裂纹扩展速率较高。梅春枝<sup>[13]</sup>研究了湿热环境对胶接接头冲击性能的影响,发现温度越高,吸湿速率越大,对分子链间作用力的破坏作用增大,接头缺陷增多,胶接试样冲击性能下降幅度越大,温度的升高使胶层吸湿机制发生改变,产生不可逆的结构破坏。Sayman等<sup>[14]</sup>研究了温度和横向冲击对玻璃纤维增强树脂复合材料和Loctite 9466 A&B2粘接剂的单搭接粘接接头拉伸性能的影响,研究发现,接头在室温时承载能力最强,当温度升高或降低时,粘接接头在横向冲击下的粘接强度均降低。Banea等<sup>[15]</sup>研究了高温和加载速率对环氧粘接剂拉伸性能的影响,结果发现,环氧树脂粘接剂的拉伸应力随温度升高呈线性下降,随加载速率增大呈对数型上升。Zhao等<sup>[16]</sup>研究了低温暴露环境对高强钢和环氧粘接剂搭接剪切接头冲击性能的影响。结果发现,接头暴露在-40℃环境中,对冲击强度和能量吸收影响不大,但试样的断裂路径和失效界面存在差异。

复合材料粘接结构受服役温度和加载速率等因素的影响,粘接接头的力学性能发生显著变化。多数研究只针对单一因素,因此,研究温度和加载速率对铝合金-CFRP复合材料粘接接头准静态失效的影响规律对于粘接结构的设计和安全应用具有重要意义。

本文旨在研究服役温度和加载速率对不同应力状态下铝合金-CFRP复合材料粘接接头准静态失效的影响。根据车辆服役过程中的环境温度,选取低温(-40℃)、常温(20℃)和高温(80℃)三种环境温度,结合设计的Arcan夹具对铝合金-CFRP复合材料粘接接头分别进行1 mm/min和100 mm/min的准静态试验,得到不同温度和加载速率下铝合金-CFRP复合材料粘接接头的准静态失效强度,并结合失效断面对接头失效进行分析。

1 试验材料及方法

1.1 原材料

试验中碳纤维增强树脂(CFRP)复合材料板材选用斜纹和单向预浸布加工而成,其基体和纤维分别为YPH-69环氧树脂和EM116碳纤维,共8层,其纤维布铺层方向为[(0/90)/0/90/0/90/(0/90)],板材整体

厚度为 2 mm；采用 6061 铝合金制作铝合金接头；选用广泛应用于车辆工业中的双组分环氧类结构胶粘剂 Araldite®2015(亨斯迈先进材料有限公司)，两组分配比为 1：1，具有良好的韧性。CFRP 复合材料、铝合金和 Araldite®2015 粘接剂材料属性如表 1~表 3 所示。

表 1 碳纤维增强树脂 (CFRP) 复合材料力学性能  
Table 1 Mechanical properties of carbon fiber reinforced polymer(CFRP) composites

Material	$E_x$ /GPa	$E_y$ /GPa	$G_{xy}$ /GPa	$\nu_{xy}$
Unidirectional-CFRP	125±12	10±2	7±0.6	0.07
Twill weave-CFRP	55±5	55±5	4±0.5	0.14

Notes:  $E_x$ ,  $E_y$ —Young’s modulus;  $G_{xy}$ —Shear modulus;  $\nu$ —Poisson’s ratio.

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

Material	Young’s modulus/GPa	Poisson’s ratio	Density/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
Aluminum (6061)	71	0.33	2 730

表 3 Araldite® 2015 材料属性  
Table 3 Material properties of Araldite® 2015

Young’s modulus/MPa	Shear modulus/MPa	Poisson’s ratio
1 850	560	0.33

1.2 铝合金-CFRP 复合材料粘接接头制作

本文设计加工了铝合金-CFRP 复合材料粘接接头和 Arcan 夹具，用以研究铝合金-CFRP 复合材料粘接接头在不同应力状态下的失效机制，粘接接头几何尺寸如图 1 所示，粘接面积为 25 mm×25 mm=625 mm<sup>2</sup>，CFRP 复合材料板材两侧通过粘接剂与铝合金胶粘连接，胶层厚度为 0.2 mm。采用尺寸略大于铝合金粘接界面尺寸的 CFRP 复合材料板材 (40 mm×40 mm×2 mm)，以避免可能由于边界效应

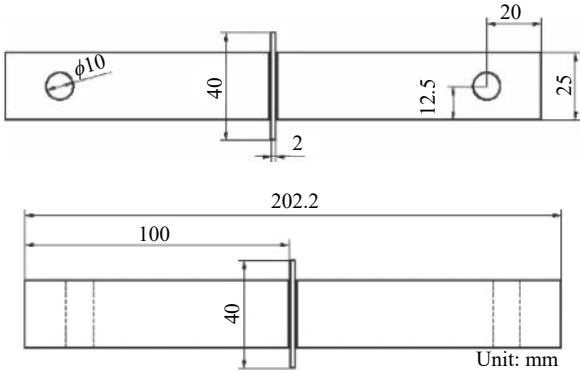


图 1 铝合金-CFRP 复合材料粘接接头几何尺寸

Fig. 1 Geometry dimensions of aluminum alloy-CFRP composite bonded joints

而产生的纤维撕裂。Arcan 夹具如图 2 所示，夹具可以使载荷方向与试件方向形成一定的角度，以达到不同拉剪比的应力组合。



图 2 Arcan 夹具

Fig. 2 Arcan fixture

对于嵌接接头，将失效载荷  $F$  沿着粘接面法向和切向进行分解，用分力除以接头的粘接面积  $S$ ，即可得到对应的拉应力  $\sigma$  和剪应力  $\tau$ ：

$$\sigma = F \sin \alpha / S \tag{1}$$

$$\tau = F \cos \alpha / S \tag{2}$$

定义接头中胶层拉应力比例  $P_\alpha$  的计算方法如下：

$$P_\alpha = \frac{\sigma}{\sigma + \tau} = \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha + \cos \alpha} \tag{3}$$

可知，剪切接头 (TSJs)、45°嵌接接头 (45°SJs) 和对接接头 (BJs) 的拉应力比例随角度  $\alpha$  增加，由 0 增加到 1<sup>[6]</sup>。

铝合金-CFRP 复合材料粘接接头的整个制作过程保持在无尘的试验环境中，并控制环境温度保持在 (25±2)℃、相对湿度保持在 (50±5)%。采用统一的粘接工艺，首先对铝合金的粘接界面进行表面喷砂处理；之后用丙酮清洗铝合金与 CFRP 复合材料板材粘接界面，除去表面油脂和灰尘；待粘接界面干燥后，使用专用双组分胶枪施胶，通过 0.2 mm 直径的玻璃珠控制胶层厚度，在专用夹具上完成粘接接头的制作，如图 3 所示。在粘接剂完全固化前清除余胶，在常温下放置 24 h 后，将从夹具上拆下的接头放置在 80℃ 高温箱内固化 2 h，完成接头的制作。

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) 在不同温度环境中 (-40℃、





图3 粘接夹具

Fig. 3 Work fixture

20℃ 和 80℃) 对固化好的粘接接头进行 90°对接接头 (BJs)、45°嵌接头 (45°SJJs) 和 0°剪切接头 (TSJs) 的准静态测试, 测试温度保持在±3℃ 范围内。粘接接头和 Arcan 夹具通过十字万向节与万能试验机连接, 以避免测试过程中的非轴向力的影响。设定万能试验机分别以 1 mm/min 和 100 mm/min 的恒定速度拉伸至接头失效破坏, 试验过程如图 4 所示。

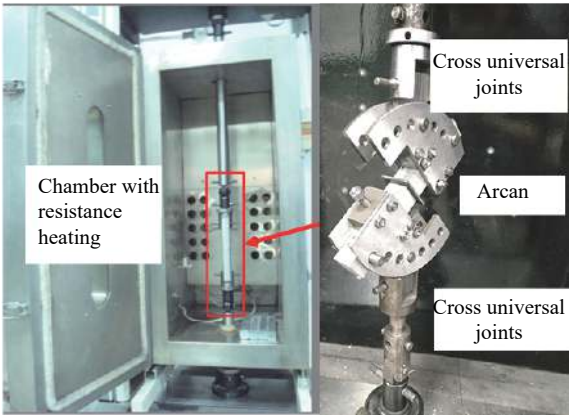


图4 铝合金-CFRP 复合材料粘接接头准静态拉伸测试

Fig. 4 Quasi-static tensile test of aluminum alloy-CFRP composite bonded joints

上述试验每组设置 4 组重复试验, 利用测得的最大失效载荷除以粘接面的失效面积获得粘接接头的失效强度, 剔除无效数据, 取平均值作为最终结果, 对接头的失效强度及失效模式进行分析。

2 结果与分析

2.1 温度对铝合金-CFRP 粘接接头准静态失效强度的影响

图 5 和图 6 分别为 1 mm/min 和 100 mm/min 加载速率时不同温度下铝合金-CFRP 复合材料粘接接头的平均失效强度。

由图 5 可知, 当加载速率为 1 mm/min 时, 在 80℃ 高温环境下, 与 20℃ 常温下的铝合金-CFRP 复合材料粘接接头相比, TSJs 接头、45°SJJs 接头和 BJJs 接头的平均失效强度分别下降了约 63.7%、63.5% 和

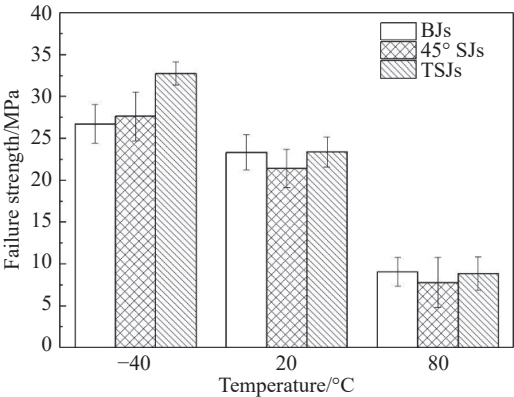


图5 1 mm/min 加载速率时不同温度下铝合金-CFRP 复合材料粘接接头的平均失效强度

Fig. 5 Average failure strength of aluminum alloy-CFRP composite bonded joints under loading rate of 1 mm/min at different temperatures (BJJs—Butt joints; 45°SJJs—45° scarf joints; TSJs—Shear joints)

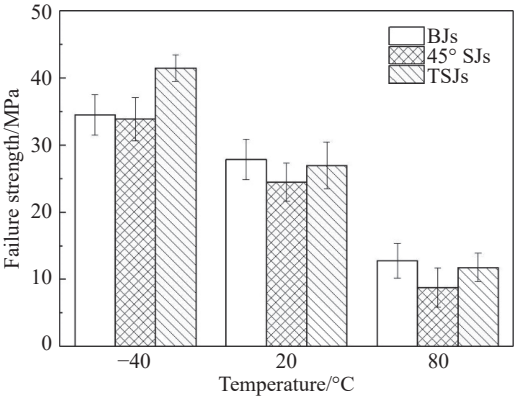


图6 100 mm/min 加载速率时不同温度下铝合金-CFRP 复合材料粘接接头的平均失效强度

Fig. 6 Average failure strength of aluminum alloy-CFRP composite bonded joints under loading rate of 100 mm/min at different temperatures

61.1%; 在-40℃ 低温环境下, 与 20℃ 常温下的接头相比, TSJs 接头、45°SJJs 接头和 BJJs 接头的平均失效强度分别提高了约 34.2%、28.9% 和 14.6%。由图 6 可知, 当加载速率为 100 mm/min 时, 在 80℃ 高温环境下, 与 20℃ 常温下的铝合金-CFRP 复合材料粘接接头相比, TSJs 接头、45°SJJs 接头和 BJJs 接头的平均失效强度分别下降了约 56.4%、64.2% 和 50.1%; 在-40℃ 低温环境下, 与 20℃ 常温下的接头相比, TSJs 接头、45°SJJs 接头和 BJJs 接头的平均失效强度分别提高了约 55.9%、38.9% 和 36.6%。

可以看出, 不同应力状态下的铝合金-CFRP 复合材料粘接接头准静态失效强度在高温 (80℃) 环境下均呈明显的下降趋势, 在低温 (-40℃) 环境下均呈一定程度的上升趋势。

这是由于高温环境超过试验用环氧树脂粘接剂的玻璃化转变温度，粘接剂由玻璃态向高弹态转变，塑性和延展性增强，从而使不同应力状态下铝合金-CFRP 复合材料粘接接头的粘接强度大幅下降。而在低温环境下，温度低于粘接剂的玻璃化转变温度，粘接剂接近于应变较小的刚性材料，低温对 CFRP 复合材料基体性能的影响与粘接剂相似。

2.2 温度对铝合金-CFRP 粘接接头准静态失效模式的影响

铝合金-CFRP 复合材料粘接接头胶层的失效模式分为内聚失效、界面失效和混合失效；CFRP 复合材料板材的失效模式主要分为基体失效、纤维失效和分层失效。图 7 和图 8 分别为 1 mm/min 和 100 mm/min 加载速率时不同温度下铝合金-CFRP 复合材料粘接接头的失效断面。

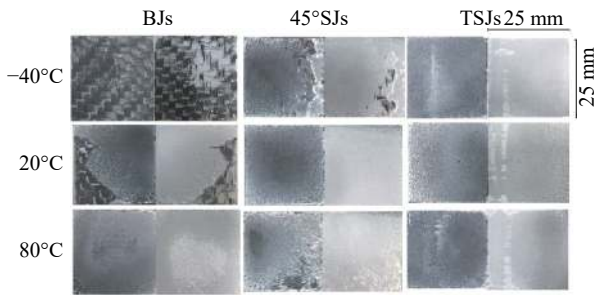


图 7 1 mm/min 加载速率时不同温度下铝合金-CFRP 复合材料粘接接头的失效断面

Fig. 7 Failure modes of aluminum alloy-CFRP composite bonded joints under loading rate of 1 mm/min at different temperatures

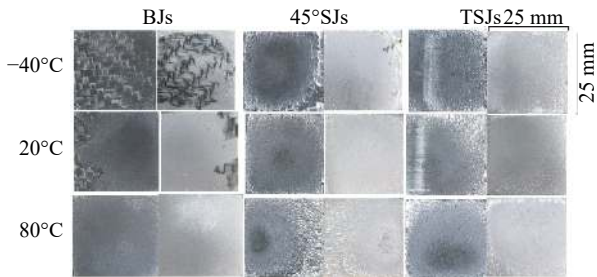


图 8 100 mm/min 加载速率时不同温度下铝合金-CFRP 复合材料粘接接头的失效断面

Fig. 8 Failure modes of aluminum alloy-CFRP composite bonded joints under loading rate of 100 mm/min at different temperatures

由图 7 可知，当加载速率为 1 mm/min 时，BJs 接头在 20℃ 常温下的失效模式为碳纤维基材和胶层内聚失效的混合失效 (约 25% 的纤维撕裂和 75% 的胶层内聚失效)；在 80℃ 高温下的失效模式为胶层的内聚失效；在-40℃ 低温下的失效模式以纤维撕裂为主，较 20℃ 常温时，纤维撕裂面积明显增大，近于

覆盖整个粘接界面。45°SJ's 接头在 20℃ 常温和 80℃ 高温下的失效模式均为胶层的内聚失效；在-40℃ 低温下的失效模式以胶层的内聚失效为主，存在少量的纤维撕裂 (约 5% 的纤维撕裂)。TSJ's 接头在三种温度下的失效模式均为胶层的内聚失效。

由图 8 可知，当加载速率为 100 mm/min 时，BJs 接头在 20℃ 常温下的失效模式为碳纤维基材和胶层内聚失效的混合失效 (约 15% 的纤维撕裂和 85% 的胶层内聚失效)；在 80℃ 高温下的失效模式为胶层的内聚失效；在-40℃ 低温下的失效模式同样为碳纤维基材和胶层内聚失效的混合失效 (约 85% 的纤维撕裂和 15% 的胶层内聚失效)，以纤维撕裂为主，较 20℃ 常温时，纤维撕裂面积明显增大。45°SJ's 和 TSJ's 接头在 20℃ 常温、80℃ 高温和-40℃ 低温下的失效模式均为胶层的内聚失效。100 mm/min 应变率下的各粘接接头表现出与 1 mm/min 应变率下相似的失效模式。

铝合金-CFRP 复合材料粘接接头准静态下的失效模式受粘接剂和 CFRP 复合材料粘接基材共同影响，高温下各种粘接接头均表现为胶层的内聚失效，失效强度主要与粘接剂性能有关。随着温度的降低，粘接剂的力学性能提高，失效断面的纤维撕裂比例明显增加。

2.3 铝合金-CFRP 粘接接头失效准则

车用粘接结构应力状态较为复杂，服役温度范围较大，因此建立适用于工程的粘接结构失效准则对粘接结构的失效预测具有重要意义。粘接结构胶层厚度较薄，主要存在平行于粘接界面的剪应力和垂直于粘接界面的拉应力，二次应力准则广泛用于粘接结构的失效预测<sup>[17-19]</sup>。本文通过拟合三种应力状态下粘接接头的拉应力和剪应力值，得到不同温度下铝合金-CFRP 复合材料粘接结构分别在 1 mm/min 和 100 mm/min 加载速率准静态的失效准则。二次应力准则如下：

$$\left(\frac{\sigma}{N}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{S}\right)^2 = 1 \tag{4}$$

式中： $\sigma$  为拉应力； $\tau$  为剪应力； $N$  为模式 I (拉应力) 的失效强度； $S$  为模式 II (剪应力) 的失效强度。

为了拟合不同温度下铝合金-CFRP 复合材料粘接结构的失效准则，根据 BJ's、45°SJ's、TSJ's 接头拉应力和剪应力随温度的变化趋势，建立了以剪应力为横坐标、拉应力为纵坐标的坐标系。利用 MATLAB 实现，采用最小二乘法拟合不同温度下的二次应力

失效准则如图 9 和图 10 所示。可以看出，铝合金-CFRP 复合材料粘接结构的拉应力和剪应力在预测曲线上或外侧，表示粘接结构失效破坏，在预测曲线内侧表示结构安全。对于铝合金-CFRP 复合材料粘接结构准静态失效准则预测曲线，随着温度的升高，曲线范围逐渐缩小，说明温度上升降低了粘接结构的准静态承载能力。

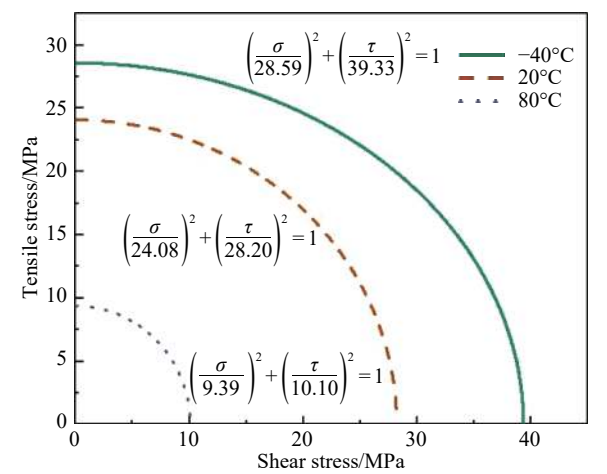


图 9 不同温度下铝合金-CFRP 复合材料粘接结构的准静态失效强度预测 (加载速率为 1 mm/min)

Fig. 9 Quasi-static failure strength prediction of aluminum alloy-CFRP composite bonded structures at different temperatures (Loading rate of 1 mm/min)

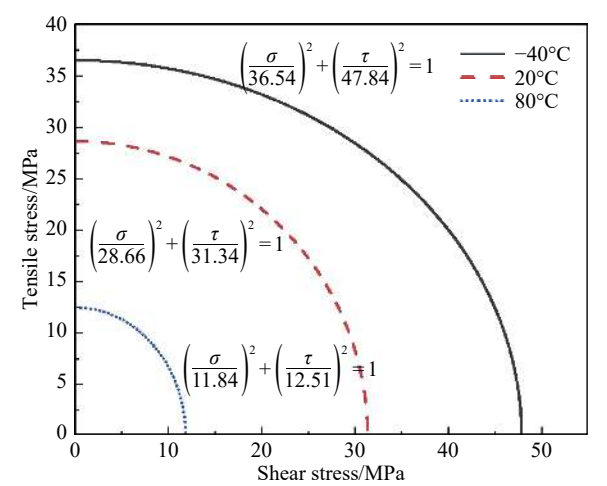


图 10 不同温度下铝合金-CFRP 复合材料粘接结构的动态冲击失效强度预测 (加载速率为 100 mm/min)

Fig. 10 Impact failure strength prediction of aluminum alloy-CFRP composite bonded structure at different temperatures (Loading rate of 100 mm/min)

图 11 为不同温度下铝合金-CFRP 复合材料粘接结构的失效准则拟合精度。可知，本文基于试验建立的铝合金-CFRP 复合材料粘接结构失效准则具有

较高的拟合精度。可以发现，二次应力准则用于不同温度与加载速率下铝合金-CFRP 复合材料粘接结构准静态的失效预测中具有很好的拟合效果。

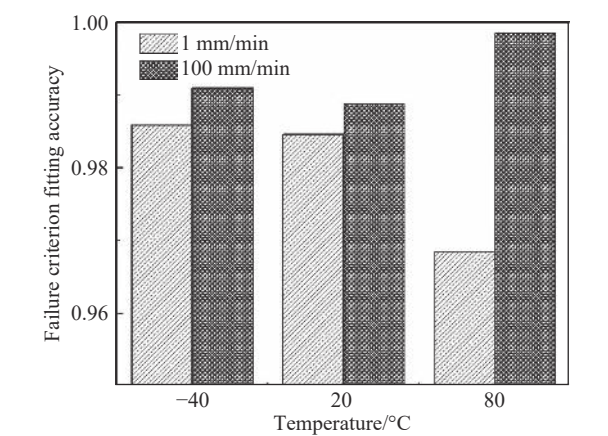


图 11 不同温度下铝合金-CFRP 复合材料粘接结构的失效准则拟合精度

Fig. 11 Fitting accuracy of failure criteria of aluminum alloy-CFRP composite bonded structure at different temperatures

进一步在图 9 和图 10 已经建立起不同温度下失效准则的基础上，基于响应面原理，通过 MATLAB 建立失效准则随温度的响应方程，加载速率分别为 1 mm/min 和 100 mm/min 的准静态失效准则随温度的响应方程分别为

$$\left(\frac{\sigma}{26.71382 - 0.10337T - 0.00141T^2}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{32.68619 - 0.20487T - 0.00097T^2}\right)^2 = 1 \quad (5)$$

$$\left(\frac{\sigma}{32.20303 - 0.15435T - 0.00115T^2}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{37.16998 - 0.28332T - 0.00042T^2}\right)^2 = 1 \quad (6)$$

式中， $T$ 为服役温度，根据式 (5) 和式 (6)，建立任意温度下粘接结构的准静态失效准则，通过该失效准则可以直接对铝合金-CFRP 复合材料粘接结构胶层的裂纹产生和扩展进行预测，为粘接结构的工程应用提供指导和参考<sup>[20]</sup>。图 12 为铝合金-CFRP 复合材料粘接结构失效准则的三维响应曲面。可以看到，相同温度下，加载速率为 100 mm/min 的铝合金-CFRP 复合材料粘接结构准静态时的失效强度恒大于加载速率为 1 mm/min 的粘接结构准静态时的失效强度。

3 结论

研究了服役温度和加载速率对不同应力状态的铝合金-碳纤维增强树脂 (CFRP) 复合材料粘接接头准静态失效的影响，获得了失效强度和失效模式的



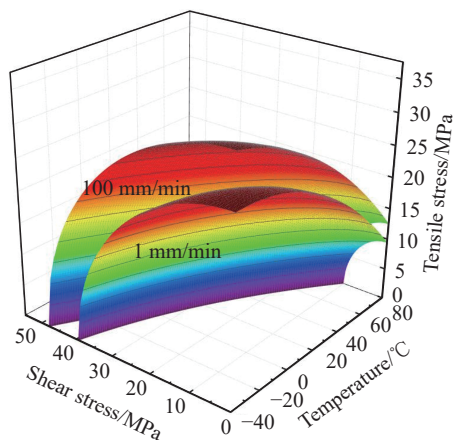


图12 铝合金-CFRP 复合材料粘接结构失效准则  
随温度变化的三维响应曲面

Fig. 12 Three-dimensional response surface of failure criterion of  
aluminum alloy-CFRP composite bonded structure  
varied with temperature

变化规律,分析了失效强度和失效模式的影响因素,针对不同温度建立二次应力失效准则,在此基础上建立起任意温度下的失效准则方程和三维响应曲面,对工程中涉及的粘接结构进行失效预测。

(1) 不同加载速率下,三种应力状态的铝合金-CFRP 复合材料粘接接头准静态下的失效强度在高温(80℃)环境下均呈现明显的下降趋势,高温环境超过试验用环氧树脂粘接剂的玻璃转化转变温度,粘接剂向高弹态转变。失效模式均为胶层的内聚失效,失效强度主要由粘接剂影响。

(2) 不同加载速率下,三种应力状态的铝合金-CFRP 复合材料粘接接头准静态下的失效强度在低温(-40℃)环境下呈现一定程度的提高,低温环境下粘接剂力学性能增强,CFRP 基材发生纤维撕裂,粘接剂与CFRP 基材粘接界面出现混合失效。

(3) 较加载速率为1 mm/min 的铝合金-CFRP 复合材料粘接接头准静态下的失效强度,各温度和应力状态下的铝合金-CFRP 复合材料粘接接头在加载速率为100 mm/min 时准静态下的失效强度明显提高,证明由于加载速率效应,铝合金-CFRP 复合材料粘接接头在准静态下的失效强度随加载速率的增大而增加。

## 参考文献:

[1] QIN G, NA J, MU W, et al. Failure load prediction of adhesive joints under different stress states over the service temperature range of automobiles[J]. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2018, 34(4): 509-516.

[2] ELMARAKBI A. Advanced composite materials for automotive applications: Structural integrity and crashworthiness[M]. John Wiley & Sons, Ltd., 2014.

[3] MARQUES E A S, DA SILVA L F M, BANE A M D, et al. Adhesive joints for low- and high-temperature use: An overview[J]. *The Journal of Adhesion*, 2015, 91(7): 556-585.

[4] TSVERAVA V G, NEPOVINNYKH V I, RUSIN M Y, et al. Fractography of degradation surfaces of adhesive joints after high-temperature thermal aging[J]. *Polymer Science Series D*, 2009, 2(3): 174-177.

[5] VIANA G, COSTA M, BANE A M D, et al. Moisture and temperature degradation of double cantilever beam adhesive joints[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2017, 31(16): 1824-1838.

[6] 秦国锋, 那景新, 慕文龙, 等. 高温老化对CFRP/铝合金粘接接头失效的影响[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2019, 49(4): 1063-1071.

QIN G F, NA J X, MU W L, et al. Degradation failure of adhesively bonded CFRP/aluminum alloy subjected to high temperature environment[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2019, 49(4): 1063-1071(in Chinese).

[7] 刘伟庆, 方海, 方园. 纤维增强复合材料及其结构研究进展[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(4): 1-16.

LIU W Q, FANG H, FANG Y. Research progress of fiber-reinforced composites and structures[J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(4): 1-16(in Chinese).

[8] BANE A M D, DA SILVA L F M. The effect of temperature on the mechanical properties of adhesives for the automotive industry[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2010, 224(2): 51-62.

[9] VIANA G, COSTA M, BANE A M, et al. A review on the temperature and moisture degradation of adhesive joints[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2017, 231(5): 488-501.

[10] ZHANG J, CHENG X Q, GUO X, et al. Effect of environment conditions on adhesive properties and material selection in composite bonded joints[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2020, 96: 102302.

[11] PLANGGER K, SCHEJA J. Epoxy adhesives under temperature influence[J]. *Adhesion Adhesives & Sealants*, 2015, 12(3): 28-31.

[12] ZHANG Y, VASSILOPOULOS A P, KELLER T. Effects of low and high temperatures on tensile behavior of adhesively-bonded GFRP joints[J]. *Composite Structures*, 2010, 92(7): 1631-1639.

[13] 梅春枝. 湿热环境对胶接接头冲击性能的影响[D]. 宜昌: 三峡大学, 2012.

MEI C Z. Effect of hydrothermal condition on the impact toughness of adhesively bonded joint[D]. Yichang: China

Three Gorges University, 2012(in Chinese).

[14] SAYMAN O, ARIKAN V, DOGAN A, et al. Failure analysis of adhesively bonded composite joints under transverse impact and different temperatures[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 54: 409-414.

[15] BANE A M D, DE SOUSA F S M, DA SILVA L F M, et al. Effects of temperature and loading rate on the mechanical properties of a high temperature epoxy adhesive[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2011, 25(18): 2461-2474.

[16] ZHAO H, MA X, CAI Z, et al. Effect of low temperature exposure on impact characteristics of epoxy bonded high strength steels[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2011, 16(5): 405-411.

[17] LEE M, YEO 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.

[18] 秦国锋. 温湿老化对车用CFRP/铝合金粘接接头静态失效的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2018.

QIN G F. Effects of temperature and humidity on the static failure of adhesively bonded CFRP/Aluminium alloy joints for automotive applications[D]. Changchun: Jilin University, 2018(in Chinese).

[19] 那景新, 高原, 慕文龙, 等. 高温老化对玄武岩纤维增强树脂复合材料-铝合金单搭接接头失效的影响[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(1): 140-146.

NA J X, GAO Y, MU W L, et al. Effect of high temperature exposure on adhesively bonded basalt fiber reinforced polymer composite-aluminum alloy single lap joints[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(1): 140-146(in Chinese).

[20] QIN G, NA J, TAN W, et al. Failure prediction of adhesively bonded CFRP-aluminum alloy joints using cohesive zone model with consideration of temperature effect[J]. *The Journal of Adhesion*, 2019, 95(8): 723-746.