

服役低温老化对铝合金-玄武岩纤维增强树脂复合材料 粘接接头力学性能的影响及失效预测

栾建泽¹, 那景新^{*1}, 谭伟¹, 慕文龙¹, 秦国锋²

(1. 吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130022; 2. 广西师范大学 职业技术师范学院, 桂林 541004)

摘要: 为了给铝合金-玄武岩纤维增强树脂 (BFRP) 复合材料粘接结构在汽车工业中的应用提供参考和指导, 加工了铝合金-BFRP 复合材料粘接接头。结合汽车服役中的温度区间, 选取 -10°C 和 -40°C 的低温老化环境, 对接头进行 0、10、20、30 天的老化。对老化后的粘接接头进行准静态拉伸试验和剪切试验, 得到不同老化时间下铝合金-BFRP 粘接接头的准静态失效强度。结合 DSC 和 FTIR 分析低温老化对 BFRP 复合材料的影响, 并对粘接接头的失效断面进行宏观分析和 SEM 分析。结果表明: 在低温老化环境中, 胶粘剂与 BFRP 复合材料的化学性质受低温老化作用影响不大, BFRP 中的官能团与玻璃化转变温度 (T_g) 没有发生明显的变化, 接头的失效强度和失效模式主要受胶粘剂与粘接基材的热应力影响。对于拉伸接头, 随着低温老化时间的增加, BFRP 复合材料纤维与树脂基体间的结合力降低, 铝合金-BFRP 复合材料接头的失效断面中纤维撕裂的比例逐渐减少, 拉伸接头失效强度逐渐下降。老化后剪切接头仍为内聚失效, BFRP 复合材料的低温老化对铝合金-BFRP 复合材料剪切接头的失效强度几乎没有影响, 剪切接头失效强度的下降主要是胶粘剂与粘接基材热膨胀系数不一致引起的热应力的影响。采用二次应力准则公式对 -10°C 和 -40°C 低温环境下, 拉应力、剪应力值随老化时间的变化规律进行了拟合, 在此失效准则的基础上, 根据响应面原理, 建立接头失效强度随老化时间变化的三维曲面, 为粘接技术在车身结构中的工程应用提供参考。

关键词: 玄武岩纤维增强树脂复合材料; 粘接; 低温; 老化; 失效预测

中图分类号: U463.82

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2020)08-1884-10

Effect of service low-temperature aging on mechanical properties of aluminum alloy-basalt fiber reinforced polymer composite bonding joints and failure prediction

LUAN Jianze¹, NA Jingxin^{*1}, TAN Wei¹, MU Wenlong¹, QIN Guofeng²

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Teachers College for Vocational and Technical Education, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to provide reference and guidance for the application of aluminum alloy-basalt fiber reinforced polymer (BFRP) composite bonding structure in automobile industry, the aluminum alloy-BFRP bonding joints were manufactured. Considering the temperature range in the service of automobiles, the low-temperature aging environment of -10°C and -40°C was selected to accelerate the aging of joints for 0, 10, 20 and 30 days. The quasi-static tensile test and shear test were carried out on the bond joints after aging, and the quasi-static failure strength of aluminum alloy-BFRP composite bonding joints with different aging time was obtained. DSC and FTIR were combined to analyze the influence of low temperature aging on the chemical properties of adhesive joints, and the failure section of adhesive joints was analyzed by macroscopic analysis and SEM. The results show that the chemical properties of aluminum alloy-BFRP composite bonding joints are not significantly affected by the low-temperature

收稿日期: 2019-08-27; 录用日期: 2019-09-23; 网络首发时间: 2019-10-14 16:14:52

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191014.001>

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, 研究方向为车身轻量化及新材料连接技术 E-mail: najingxin@jlu.edu.cn

引用格式: 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粘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 Jianze, NA Jingxin, TAN Wei, 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(in Chinese).

aging, and the functional groups and glass conversion temperature (T_g) of BFRP composite do not change significantly in the low-temperature aging environment. The failure strength and failure mode of the joints are mainly affected by the thermal stress of adhesive and bonding substrate. As for tensile joints, with the increase of low-temperature aging time, the mechanical properties between BFRP composite fiber and resin matrix decrease, the proportion of fiber tearing in the failure section of aluminum alloy-BFRP composite joint decreases gradually, and the failure strength of tensile joints decreases gradually. After aging, the shear joint is still a cohesive failure, and the low-temperature aging of BFRP composite has little effect on the mechanical properties of aluminum alloy-BFRP composite joint. The decrease of failure strength of shear joint is mainly caused by the thermal stress which is the result of the inconsistency of thermal expansion coefficient between adhesive and bonding substrate. The second stress criterion formula was used to fit the variation rules of tensile stress and shear stress with aging time. On the basis of this failure criterion, according to the response surface principle, the three-dimensional surface of failure criterion with aging time was established to provide reference for the engineering application of bonding technology in body structure.

Keywords: basalt fiber reinforced polymer composite; adhesive; low temperature; aging; failure prediction

纤维增强树脂复合材料由于具有较高的比刚度和比强度、抗疲劳性好等优点,在现代工业中得到越来越广泛的应用。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、玄武岩纤维增强树脂(BFRP)复合材料具有抗腐蚀性能好、耐高温、热稳定性好、抗冲击性能好、原材料来源更广泛、成本更低等优点,成为在多材料车身制造发展中的典型新型材料。汽车工业对燃料消耗和节能减排的要求越来越严格,这为扩大轻质复合材料的应用创造了机会。利用它们来代替车顶、车门和车身外板等金属件,然而,传统的连接方法(如螺栓紧固、铆接、焊接等)会破坏金属和复合材料基体,引入应力集中,从而导致结构完整性降低^[1-4]。

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越来越受到广泛的重视^[4]。

在汽车长期服役过程中,应用的粘接结构会经常处于不同的恶劣工况中,无论在航空航天还是汽车工业中,粘接剂作为一种高分子聚合物材料,其力学性能受服役环境(水分、温度和外载荷等)影响较明显。因而许多学者开展了实验室老化试验来评估环境温度对胶粘剂老化特性的影响^[5]。

H.Zhao等^[6]采用分离式霍普金森拉伸机,分别在室温下和-40℃环境中制备了DP600和DP780钢搭接接头并进行了试验,结果表明,在-40℃环境中接头的冲击强度和能量吸收变化不大,-40℃环境中试样的断裂路径和界面区域存在差异。Zhang等^[7]研究了铝合金/电镀锌钢单搭接接头在

23℃和80℃及循环温度(23~80℃)中的老化行为,结果表明,80℃和循环温度老化下单搭接接头的失效强度明显降低了。黄强等^[8]采用TG、SEM和XPS等分析方法研究了有机硅改性环氧树脂的耐热老化性能,结果表明:胶粘剂剪切强度先提高后下降,氧元素含量逐渐增加,热老化对胶粘剂热失重的影响大于对剪切强度的影响。HUP等^[9]研究了不同温度的老化对单搭接接头失效强度和最大失效位移的影响,发现低温下老化现象更明显。

环氧树脂基体为高分子材料,在温度的作用下也会发生类似的变化,由于复合材料纤维/基体的不均匀性、热膨胀系数和机械性能的差异性,纤维/基体界面在温度环境中容易由于热应力破坏纤维/基体界面,对复合材料的性能造成影响,因此复合材料与金属粘接结构在温度老化后的力学性能由胶粘剂和复合材料共同作用^[10]。秦国锋等^[11]加工了处于剪应力、拉应力和拉剪组合应力状态的碳纤维增强树脂复合材料(CFRP)-铝合金粘接接头,在高温(80℃)环境中进行了10、20、30、40、50天的老化测试,分析了失效强度、失效模式的变化规律,建立了失效准则响应面。王晓宁^[12]研究了玻璃纤维增强环氧乙烯基酯树脂和玻璃纤维增强不饱和聚酯树脂两种复合材料在120℃高温和-30℃低温老化672h后的物理性能和静态力学性能,结果表明高、低温老化后,两种试件的弯曲、拉伸性能均有所降低。张春雷等^[13]采用拉挤工艺制备了碳纤维增强环氧树脂复合材料芯棒,并对其进行高低温人工加速老化试验,结果表明,高低温老化会使复合材料芯棒的康弯曲强度和抗冲击强度有所下降,到老化后期趋于平缓,芯棒

最外层的玻璃纤维层对老化较敏感，对芯棒整体性能影响不大。

复合材料-金属粘接结构中粘接剂与复合材料均受温度老化影响，引起粘接结构力学性能的改变^[14-16]。大多数学者研究的是温度老化前后粘接接头的强度变化规律，缺乏复合材料粘接接头在温度环境中老化机制的研究。因此，本文考虑汽车的服役温度环境(−40~80℃)，选取典型低温环境，进行铝合金-BFRP 复合材料粘接接头在低温老化作用下力学性能的研究。本文中设计了粘接夹具和测试夹具，测试了铝合金-BFRP 复合材料粘接接头测试准静态下接头的剪应力和拉应力。对铝合金-BFRP 复合材料粘接接头在低温(−10℃和−40℃)下进行了不同周期(0、10、20、30天)的老化试验，并对其力学性能进行研究，结合宏观失效断面分析其失效模式，结合 SEM 进一步从微观上分析老化后的失效机制。

1 实验

1.1 原材料

实验采用的基体材料为 BFRP 复合材料板材与 6061 铝合金。BFRP 复合材料由单向玄武岩纤维布和复合成型树脂基底制备而成，板材整体厚度为 2 mm，其纤维布铺层方向为 [0/90/0/90/0/90]，复合成型树脂包括 5113-81A(环氧树脂胶)和 5113-94B(固化剂)，配比(质量比)为 100 : 25；选用汽车工业中广泛应用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(质量比)为 1 : 1。BFRP、铝合金和 Araldite®2015 材料属性如表 1~4 所示。

表 1 玄武岩纤维单向布材料属性参数

Table 1 Property parameters of basalt fiber unidirectional fabric

Surface density/(g·m ⁻²)	Tensile strength/MPa	Elasticity modulus/GPa	Nominal thickness/mm	Single fiber diameter/μm
300	2 100	105	0.115	13

表 2 复合成型树脂 5113-81A/5113-94B 材料属性参数

Table 2 Property parameters of composite molding resin 5113-81A/ 5113-94B

Cure condition	Compressive strength/MPa	Tensile Strength/MPa	Flexural strength/MPa	T _g /℃
25℃×24 h+80℃×2 h	126-130	60-70	80-94	90-100

Note: T_g—Glass transfer temperature.

表 3 铝合金材料属性参数

Table 3 Properties of aluminum alloy

Material	Young's modulus/GPa	Poisson's ratio	Density/(kg·m ⁻³)
Aluminum (6061)	71	0.33	2 730

表 4 Araldite® 2015 材料属性参数

Table 4 Material properties of Araldite® 2015

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

1.2 接头制作

本文采用统一的粘接工艺制作铝合金-BFRP 复合材料粘接接头：粘接接头几何尺寸如图 1 所示，粘接尺寸为 25 mm×25 mm，BFRP 复合材料板材与铝合金通过粘接剂粘接，利用直径为 0.2 mm 的玻璃球控制胶层厚度为 0.2 mm。BFRP 复合材料板材尺寸为 40 mm×40 mm×2 mm，略大于粘接面积以防止边界效应。

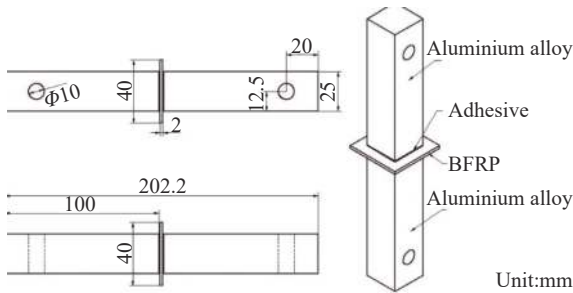


图 1 铝合金-玄武岩纤维增强树脂 (BFRP) 复合材料粘接接头几何尺寸

Fig. 1 Geometry dimensions of the aluminum alloy-basalt fiber reinforced polymer(BFRP) composite adhesive joints

粘接基材的表面预处理流程参考标准 GB/T 7124-2008^[17]。试验环境保持无尘，环境温度控制在 (25±2)℃、相对湿度保持在 (50±5)%。首先对铝合金的粘接界面进行表面喷砂处理；用丙酮清洗铝合金块与 BFRP 复合材料板材粘接区域，除去表面油脂与灰尘；等待粘接区域干燥后，使用专用胶枪施胶，在统一的专用夹具上完成粘接接头的制作，如图 2 所示。清理粘接过程中产生的胶瘤，防止其对测试结果产生影响。在常温下放置 24 h 后，将粘接接头从夹具上取下，放置在 80℃ 高温箱内固化 2 h，完成接头的制作。

1.3 测试方案

首先将粘接接头分为 4 组放在温度环境箱(浙江嘉兴韦斯实验设备有限公司)中进行 0、10、20、30 天的低温老化，干燥箱内环境温度分别设置为 −10℃ 和 −40℃，如图 3 所示。将老化完成后的粘

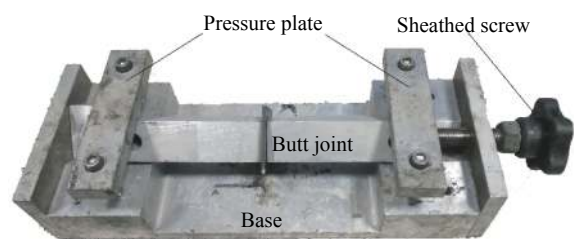


图2 粘接夹具
Fig. 2 Work fixture



图3 低温环境箱
Fig. 3 Cryogenic chamber

接头从环境箱中取出，在试验环境（温度 $(25\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $(50\pm 5)\%$ ）下放置至恢复常温。

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）配合测试夹具对粘接接头进行 1 mm/min 恒定速度的准静态拉伸与剪切测试直至接头破坏，粘接接头和测试夹具通过十字万向节与WDW3100微机控制电子万能试验机连接，以避免测试过程中的非轴向力影响测试数据。记录拉伸作用力随位移的变化曲线，获得粘接接头的失效强度，剔除无效数据，取每组试验4个试件的平均值作为代表值。

当环境温度低于Araldite®2015玻璃化转变温度 (T_g) 时，进一步的固化反应相对较慢^[10]。为了研究低温老化对BFRP复合材料 T_g 的影响，采用PerkinElmer DSC(Waltham, USA) 设备对未老化和典型极限工况下 $(-40^{\circ}\text{C}$ 老化30天) 的BFRP复合

材料进行DSC分析。

为了研究BFRP复合材料在低温老化环境中的官能团变化，采用VERTEX70(Bruker spectrometer) 设备对未老化和典型极限工况下 $(-40^{\circ}\text{C}$ 老化30天) 的BFRP复合材料进行FTIR分析，波谱范围为 $4\,000\sim 600\text{ cm}^{-1}$ ，分辨率为 4 cm^{-1} 。

为了进一步确认铝合金-BFRP复合材料粘接接头低温老化后的性能，利用JSM-IT500A扫描电子显微镜(SEM, 吉林大学电子显微镜中心) 对BFRP复合材料进行分析，如图4示。

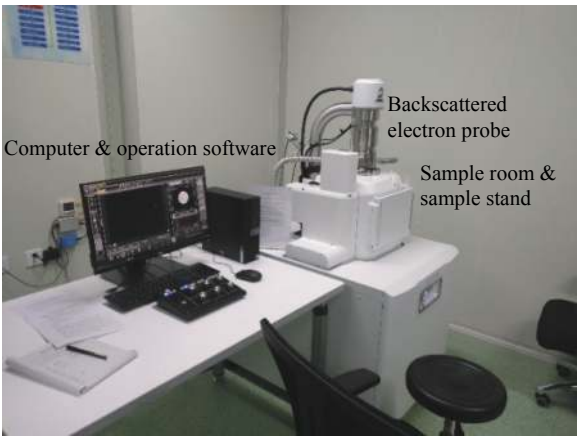


图4 JSM-IT500A InTouchScope™ scanning electron microscope

2 实验结果与分析

2.1 BFRP复合材料的玻璃化转变温度

BFRP的玻璃化转变温度如图5所示，可见，未老化BFRP复合材料的 T_g 为 90.35°C ， -40°C 低

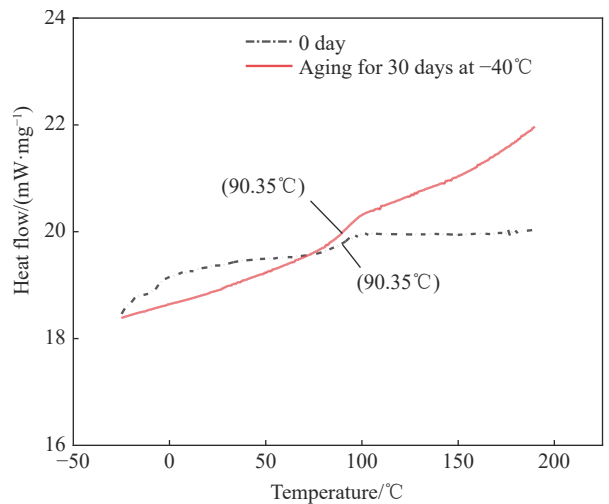


图5 BFRP的玻璃化转变温度 T_g
Fig. 5 Glass conversion temperature T_g of BFRP

温老化 30 天后 BFRP 复合材料的 T_g 为 90.35°C ，说明 BFRP 复合材料在低温老化环境中的 T_g 几乎没有发生变化。

2.2 BFRP 复合材料低温老化前后的官能团

归一化处理后，BFRP 复合材料的 FTIR 图谱如图 6 所示。吸收峰 $3\,320\text{ cm}^{-1}$ 代表 $-\text{OH}$ 或 $-\text{NH}$ 的伸缩振动， $3\,100\sim 2\,800\text{ cm}^{-1}$ 之间的吸收峰代表烷基中的 $-\text{CH}_2$ 、 $-\text{CH}_3$ 的伸缩振动，由于在整个老化过程中苯基不参与反应，其含量保持不变，因此将苯基 $1\,508\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰强度作为参考来评价其他基团在老化过程中的含量变化^[3]。低温老化环境下 BFRP 复合材料的官能团变化不明显，经过低温老化后，波谱图吸收峰的位置没有发生变化，对应吸收峰的强度也没有明显变化。

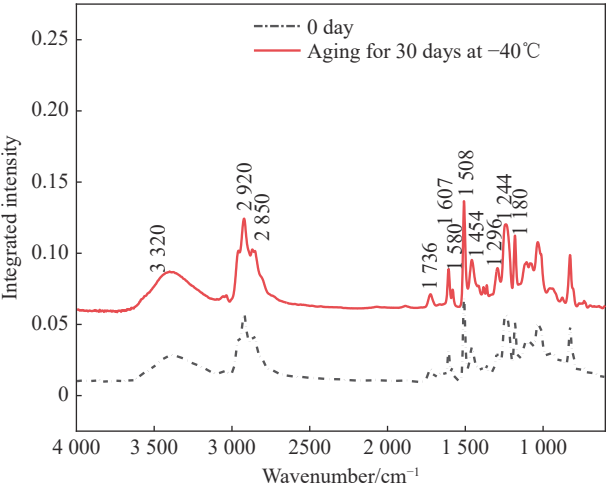


图 6 BFRP 的官能团
Fig. 6 Functional groups of BFRP

2.3 低温老化对铝合金-BFRP 复合材料粘接接头失效强度的影响

由下式计算失效强度 S ：

$$S = \frac{F_{\text{MAX}}}{A} \tag{1}$$

其中： F_{MAX} 为准静态测试接头失效过程中对应的失效载荷； A 为接头的失效面积。铝合金-BFRP 复合材料粘接接头的拉伸失效强度和剪切失效强度随老化时间的变化如图 7、图 8 所示。

-10°C 老化环境下，以老化时间为 0 天（未老化）粘接接头的失效强度为参考，对于拉伸接头，在 10、20、30 天老化后，其失效强度降低，比例约为 0.87%、2.13%、8.34%，随着老化时间的增加，拉伸接头失效强度的下降比例略微增大；对于剪切接头，在 10、20、30 天老化后，其失效强度出

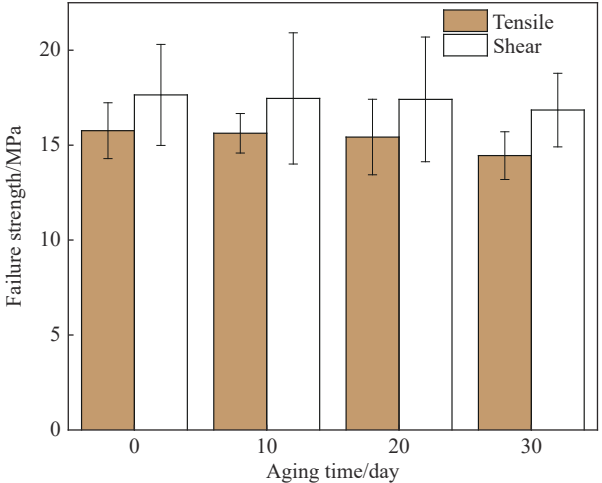


图 7 铝合金-BFRP 复合材料粘接接头失效强度随老化时间变化 (-10°C)
Fig. 7 Failure strength of aluminum alloy-BFRP composite adhesive joint changing with aging time(-10°C)

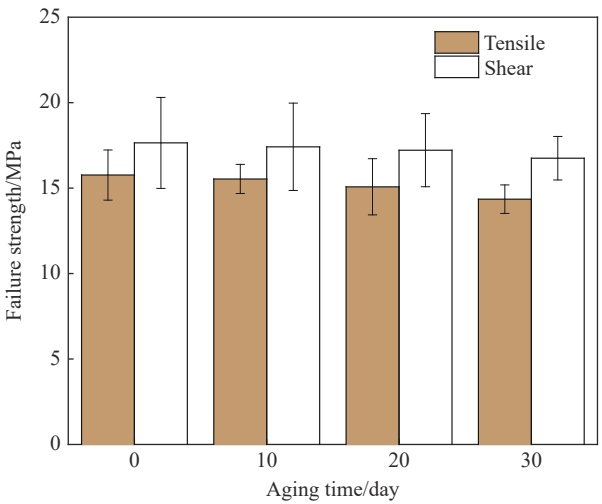


图 8 铝合金-BFRP 复合材料粘接接头失效强度随老化时间变化 (-40°C)
Fig. 8 Failure strength of aluminum alloy-BFRP composite adhesive joint changing with aging time(-40°C)

现了轻微的降低，比例约为 1.05%、1.33%、4.53%； -40°C 老化环境下，以老化时间为 0 天（未老化）粘接接头的失效强度为参考，对于拉伸接头，在 10、20、30 天老化后，其失效强度降低，比例约为 1.44%、4.35%、8.96%；对于剪切接头，在 10、20、30 天老化后，其失效强度出现了轻微的降低，比例约为 1.30%、2.41%、5.09%。

可以看出，铝合金-BFRP 复合材料粘接接头在低温老化环境中失效强度由老化温度和老化时间共同影响。相同老化温度和老化时间下，拉伸接头的失效强度略低于剪切接头，拉伸接头失效强度的下降幅度略微大于剪切接头。

2.4 低温老化对铝合金-BFRP 复合材料粘接接头失效模式的影响

铝合金-BFRP 复合材料粘接接头的失效模式是胶层和复合材料失效模式的组合^[11]。通过对比分析准静态测试中粘接接头的失效模式，进一步探究低温老化影响铝合金-BFRP 复合材料粘接接头失效的原因，失效断面如图 9~12 所示 (左侧为 BFRP 复合材料，右侧为铝合金)。

-10℃ 老化环境下，对于拉伸接头，未老化接头的失效断面是胶层内聚和 BFRP 复合材料表层纤维撕裂的混合失效 (纤维撕裂面积约占失效断面面积的 40%)，在低温老化之后同样是胶层内聚和纤维撕裂的混合失效，但失效断面中的纤维

撕裂面积比例逐渐减少 (老化 30 天后纤维撕裂面积约占失效断面面积的 25%)。文献 [2] 通过对比分析低温老化前后哑铃试件失效强度、杨氏模量和失效应变的变化，发现胶粘剂哑铃试件的力学性能变化不大，低温环境对胶粘剂的力学性能影响较小^[2]。胶粘剂与粘接基材、BFRP 复合材料纤维与树脂基体的热膨胀系数不一致，低温会在胶粘剂与 BFRP 复合材料间产生热应力^[1-2]。由于热应力的影响，BFRP 纤维与树脂基体间的结合力降低；而铝合金-BFRP 复合材料接头的失效断面中纤维撕裂的比例却逐渐减少，可能是胶粘剂与 BFRP 复合材料粘接基材热膨胀系数不一致，在热应力的影响下两者间结合力降低导致的^[1-3]；对于

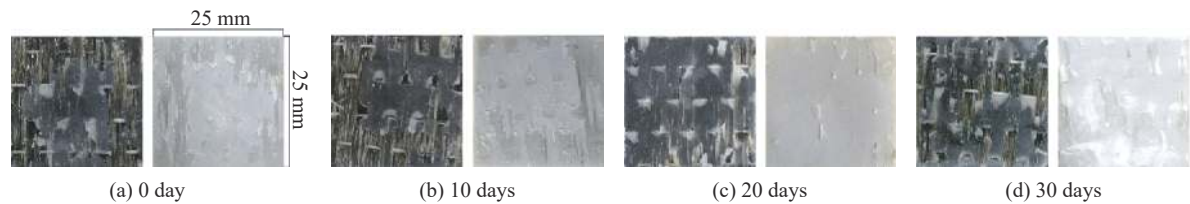


图 9 铝合金-BFRP 复合材料粘接接头拉应力破坏的典型失效断面 (-10℃)

Fig. 9 Representative fracture surfaces of aluminum alloy-BFRP composite adhesive joint under tensile stress (-10℃)



图 10 铝合金-BFRP 复合材料粘接接头剪应力破坏的典型失效断面 (-10℃)

Fig. 10 Representative fracture surfaces of aluminum alloy-BFRP composite adhesive joint under shear stress (-10℃)



图 11 铝合金-BFRP 复合材料粘接接头拉应力破坏的典型失效断面 (-40℃)

Fig. 11 Representative fracture surfaces of aluminum alloy-BFRP composite adhesive joint under tensile stress (-40℃)

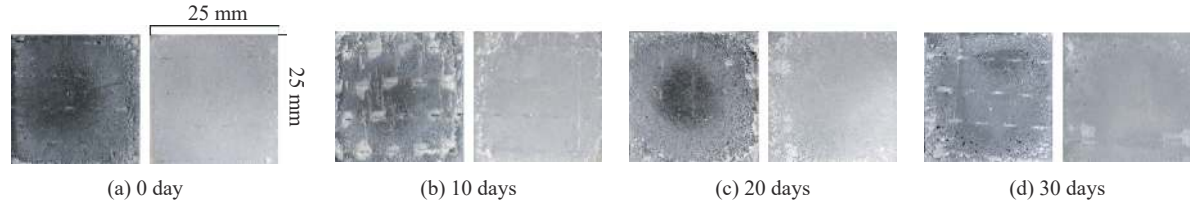


图 12 铝合金-BFRP 复合材料粘接接头剪应力破坏的典型失效断面 (-40℃)

Fig. 12 Representative fracture surfaces of aluminum alloy-BFRP composite adhesive joint under shear stress (-40℃)

剪切接头, 未老化接头和低温老化之后, 失效断面都是胶层内聚失效, 由于低温老化没有改变剪切接头的失效模式, 内聚失效说明 BFRP 复合材料的低温老化对铝合金-BFRP 复合材料剪切接头的失效强度几乎没有影响, 剪切接头在低温环境中失效强度的下降主要是胶粘剂与粘接基材热膨胀系数不一致引起的热应力的影响。

-40℃ 老化环境下, 对于拉伸接头, 老化后的失效断面同样是胶层内聚和纤维撕裂的混合失效, 失效断面中纤维撕裂比例逐渐减少 (老化 30 天后纤维撕裂面积约占失效断面面积的 20%)。对于剪切接头, 老化后的粘接接头同样以胶层的内聚失效为主。30 天老化时间内, 剪切接头的失效强度受胶粘剂与粘接基材间热应力的影响呈现一定程度的下降。

未老化时, 拉应力作用下胶层内聚与纤维撕裂的混合失效模式说明受拉应力时, 胶粘剂与 BFRP 复合材料间的结合力接近于环氧树脂基体与基材间的结合力; 剪应力作用下胶层内聚的失效模式说明受剪应力时, 环氧树脂基体与基材间的结合力始终大于胶粘剂与 BFRP 复合材料的结合力。随着低温老化的进行, Araldite® 2015 环氧类胶粘剂与 BFRP 复合材料在低温下的 T_g 与官能团没有发生明显的变化, 说明低温老化对胶粘剂和 BFRP 化学性质影响不大, 接头的失效强度和失效模式主要受胶粘剂与粘接基材间的热应力影响^[1-2]。剪切接头失效断面始终为胶层内聚, 说明虽然胶粘剂和 BFRP 复合材料在低温环境下由于热应力发生老化, 力学性能降低, 但老化之后, 在剪应力作用下, 胶粘剂与 BFRP 复合材料间的结合力仍低于 BFRP 复合材料与基体间的结合力。

2.5 铝合金-BFRP 复合材料粘接接头失效断面的微观形貌

未老化及极限工况下 (-40℃ 老化 30 天) 铝合金-BFRP 复合材料粘接接头的失效断面如图 13 所示。

由图 13(a) 方框部分所示, 在未经历低温老化的接头断面区域, 纤维周围存在部分残余树脂, 而由图 13(b) 中方框部分所示, -40℃ 低温老化 30 天后, 纤维表面很光滑, 仅存在少量树脂, 说明低温老化在 BFRP 复合材料基材与树脂基体间产生了热应力, 两者间结合力降低。由图 13(c) 所示, 在未经历低温老化的胶层内聚区域, 胶粘剂呈现不规则的起伏, 而由图 13(d) 所示, -40℃ 低

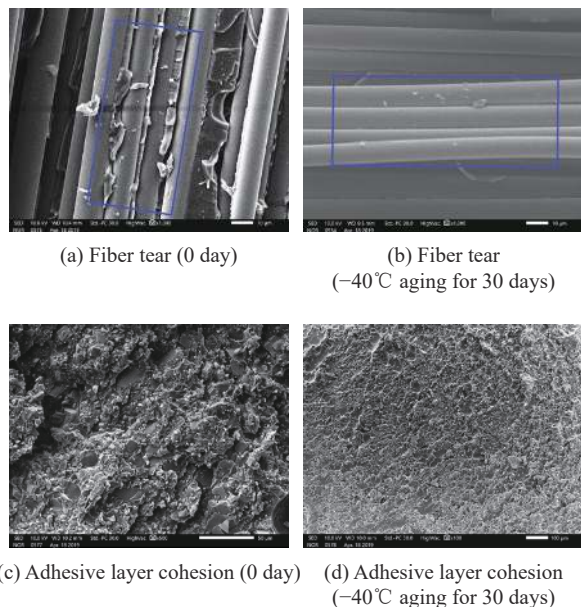


图 13 未老化及极限工况下 (-40℃ 老化 30 天) 铝合金-BFRP 复合材料粘接接头的失效断面

Fig. 13 Failure section of aluminum alloy-BFRP composite bonding joint without aging and aging at -40℃ for 30 days

温老化 30 天后, 局部区域相应的起伏样貌特点相对弱化^[5]。

2.6 铝合金-BFRP 复合材料粘接接头失效准则

工程应用中, 粘接结构应力状态通常较复杂, 服役时间相对较长, 为了对粘接结构的失效行为进行评价, 建立适用于工程应用的粘接结构失效准则, 本文利用二次应力准则公式, 拟合 -10℃ 和 -40℃ 低温下老化时间 T 、粘接接头的拉应力 σ 与剪应力 τ 值, 得到不同低温老化时间下, 铝合金-BFRP 复合材料粘接结构的失效准则:

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

其中: N 为拉应力的失效强度; S 为剪应力的失效强度^[18-21]。

利用 MATLAB 中的最小二乘法拟合试验中老化时间下的二次应力失效准则, 如图 14 所示。粘接结构的拉应力和剪应力均在预测曲线内侧表示结构安全; 粘接结构拉应力或剪应力在预测曲线上或外侧, 表示结构危险^[11]。

为了充分反应低温老化对铝合金-BFRP 复合材料粘接接头性能的影响, 进一步获得任意老化时间下的失效准则, 在建立起上述不同老化时间失效准则的基础上, 采用二次多项式函数、三次多项式函数, 拟合了各参数随低温老化时间的关

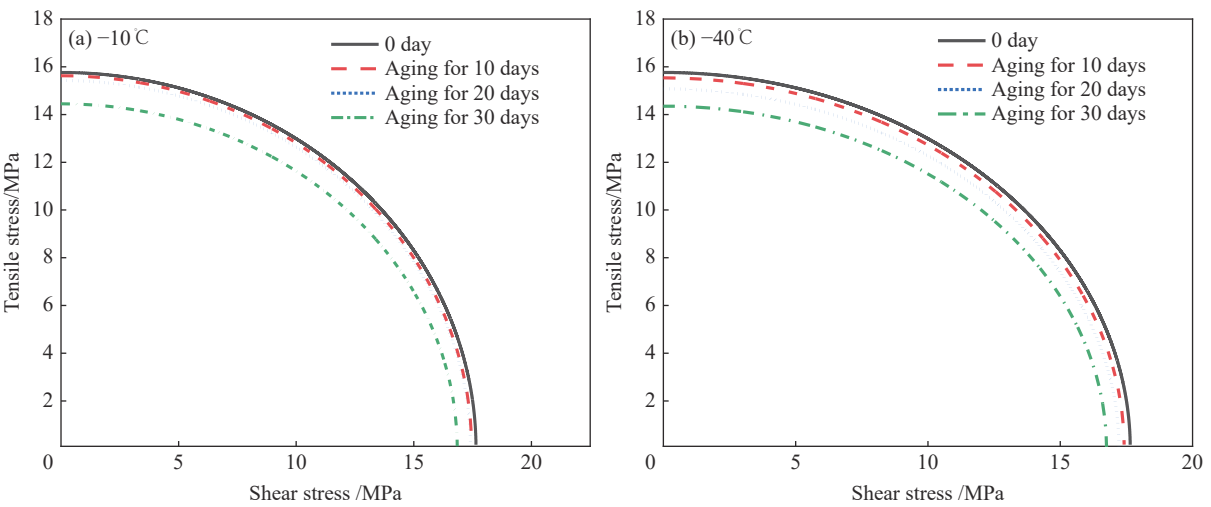


图 14 不同老化时间铝合金-BFRP 复合材料粘接结构的准静态失效强度

Fig. 14 Quasi-static failure strengths of aluminum alloy-BFRP composite bonding structures under different aging cycles

系曲线，根据响应面原理，利用 MATLAB 建立失效准则随老化时间的响应面方程：

$$\left(\frac{\tau}{17.64533 - 0.04735T + 0.00397T^2 - 0.00011T^3}\right)^2 + \left(\frac{\sigma}{15.72701 + 0.02170T - 0.00210T^2}\right)^2 = 1 \tag{3}$$

$$\left(\frac{\tau}{17.62994 - 0.01071T - 0.00061T^2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma}{15.76125 - 0.00952T - 0.00125T^2}\right)^2 = 1 \tag{4}$$

其中， T 表示老化时间。为了更直观地反映失效准则随老化时间地变化规律，根据方程式建立相应的失效准则三维曲面，如图 15 所示。以 45°接头的 5 天和 15 天老化后的试验结果验证相应曲面的拟合精度。试验结果与预测结果的相对误差范围为 4.07%~7.61%，说明了预测方法的可行性和准确性。

3 结论

研究了低温老化对铝合金-玄武岩纤维增强树脂 (BFRP) 复合材料粘接接头力学性能的影响，加工制作了铝合金-BFRP 复合材料粘接接头，在-10℃和-40℃ 环境下进行 0、10、20、30 天的低温老化。结合 DSC、FTIR 和 SEM 测试分析了失效强度和失效模式变化的影响因素，针对不同老化时间建立二次应力失效准则，为工程中涉及长期低温环境下服役的粘接结构失效预测提供失效预测方法和参考。

(1) 在低温老化环境中，BFRP 复合材料与胶

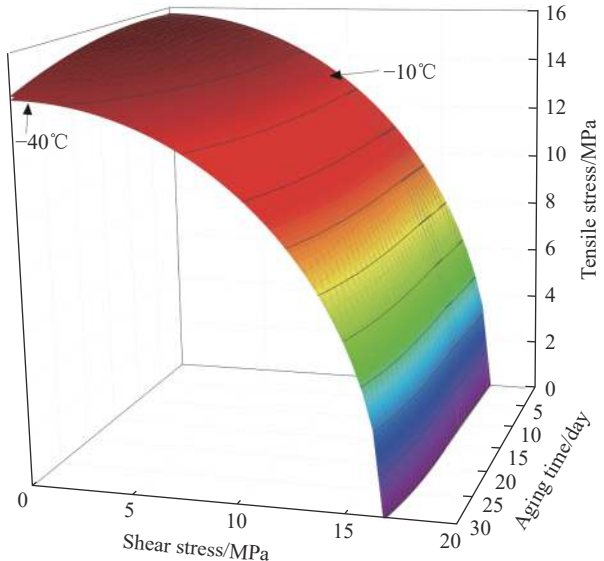


图 15 失效准则随老化时间变化的三维响应曲面

Fig. 15 Three-dimensional response surface of the failure criterion as a function of aging cycles

粘剂化学性质受低温老化作用影响不大，环境温度低于 BFRP 复合材料中环氧树脂的玻璃化转变温度 (T_g)，BFRP 复合材料中的官能团和 T_g 没有发生明显的变化，接头的失效强度和失效模式主要受胶粘剂和粘接基材热应力的影响。

(2) 胶粘剂与粘接基材、玄武岩纤维与树脂基体的热膨胀系数不一致而产生热应力。对于拉伸接头，低温环境下，玄武岩纤维与树脂基体间的结合力降低，铝合金-BFRP 粘接接头的失效断面中纤维撕裂的比例却逐渐减少，这是由于胶粘剂与粘接基材热膨胀系数不一致，在热应力的影响下两者间结合力降低导致的。低温老化后剪切接

头仍为内聚失效,说明BFRP复合材料的低温老化对铝合金-BFRP复合材料剪切接头的失效强度几乎没有影响,剪切接头在低温环境中失效强度的下降主要是胶粘剂与粘接基材热膨胀系数不一致引起的热应力的影响。

(3)采用二次应力准则公式对 -10°C 和 -40°C 低温环境下拉应力、剪应力值随老化时间的变化规律进行了拟合,在此失效准则的基础上,根据响应面原理,建立接头失效强度随老化时间变化的三维曲面,为粘接技术在车身结构中的工程应用提供参考。

参考文献:

- [1] 那景新,慕文龙,谭伟,等.一种车辆服役温度区间内的粘接接头疲劳性能测试装置及测试方法:中国,201810425629.9[P]. 2018-11-02.
NA Jingxin, MU Wenlong, TAN Wei, et al. The invention relates to a calculation method for stiffness performance and strength of structural weight reduction orifice plate: China, 201810425629.9[P]. 2018-11-02 (in Chinese).
- [2] 秦国锋,那景新,慕文龙,等.CFRP/铝合金粘接接头在低温环境中的老化机理研究[J].中国胶粘剂,2019,28(8):27-33.
QIN Guofeng, NA Jingxin, MU Wenlong, et al. Study on aging mechanism of CFRP/aluminum alloy bonded joints in low temperature environment[J]. China Adhesives, 2019, 28(8): 27-33(in Chinese).
- [3] LUAN J Z, NA J X, TAN W, et al. Comparative study on mechanical properties of aluminum alloy and BFRP single lap joints with hygrothermal aging[J]. The Journal of Adhesion, 2020(6):1-18.
- [4] 那景新,高原,慕文龙,等.高温老化对BFRP-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 Jingxin, GAO Yuan, MU Wenlong, et al. Effect of high temperature exposure on adhesively bonded BFRP-aluminum alloy single lap joints[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(1): 140-146(in Chinese).
- [5] 韩啸.胶接接头湿热环境耐久性试验与建模研究[D].大连:大连理工大学,2014.
HAN Xiao. Experimental and modelling study on the durability performance of adhesively bonded joint in hygrothermal environment[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014(in Chinese).
- [6] 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.
- [7] ZHANG F, YANG X, WANG H P, et al. Durability of adhesively-bonded single lap-shear joints in accelerated hygrothermal exposure for automotive applications[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013, 44(Complete): 130-137.
- [8] 黄强,赵鑫刚,刘波,等.改性环氧树脂胶粘剂耐热老化性能的研究[J].黑龙江大学自然科学学报,2011,28(2):229-232.
HUANG Qiang, ZHAO Xingang, LIU Bo. Study on the properties of modification epoxy adhesive in heat-resistant aging[J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2011, 28(2): 229-232(in Chinese).
- [9] HU P, HAN X, LI W D, et al. Research on the static strength performance of adhesive single lap joints subjected to extreme temperature environment for automotive industry[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013, 41: 119-126.
- [10] 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 Guofeng, 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).
- [11] 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(4):1-9.
QIN Guofeng, NA Jingxin, MU Wenlong, 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(4): 1-9(in Chinese).
- [12] 王晓宁.紫外、高低温老化对玻纤增强复合材料性能的影响[D].乌鲁木齐:新疆大学,2017.
WANG Xiaoning. Effects of UV, high and low temperature aging on glass fiber composite materials[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2017(in Chinese).
- [13] 张春雷,朱波,乔琨,等.高低温老化对碳纤维复合材料芯棒力学性能的影响[J].高科技纤维与应用,2012,37(5):20-22,36.
ZHANG Chunlei, ZHU Bo, QIAO Kun, et al. Effect of high-low temperature thermal aging on structure of carbon fiber reinforced composite core[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2012, 37(5): 20-22,36(in Chinese).
- [14] OCAÑA R, ARENAS J M, ALÍA C, et al. Evaluation of degradation of structural adhesive joints in functional automotive applications[J]. Procedia Engineering, 2015, 132: 716-723.
- [15] PLAZEK D J, FRUND Z N. Epoxy resins (DGEBA): The curing and physical aging process[J]. Journal of Polymer Science Part A Polymer Chemistry, 2010, 28(4): 431-448.
- [16] BUDHE S, BANEJA M D, BARROS S D, et al. An updated review of adhesively bonded joints in composite materials[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2017, 72: 30-42.

[17] 中国国家标准化管理委员会. 胶粘剂拉伸剪切强度的测定(刚性材料对刚性材料): GB/T 7124—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

Standardization Administration of the People's Republic of China. Adhesive-Determination of tensile lap-shear strength of rigid-to-rigid bonded assemblies: GB/T 7124 —2008[S]. Beijing: China Standards Press, 2008(in Chinese).

[18] 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.

[19] 谭伟, 那景新, 任俊铭, 等. 高温环境下碳纤维增强树脂复合材料的层间力学性能老化行为与失效预测[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(4): 859-868.

TAN Wei, NA Jingxin, REN Junming, et al. Aging behavior and failure prediction of interlaminar mechanical properties of carbon fiber reinforced polymer at high temperature[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(4): 859-868(in Chinese).

[20] SILVA L F M D, ADAMS R D. Joint strength predictions for adhesive joints to be used over a wide temperature range[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2007, 27(5): 362-379.

[21] 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).