

自研高性能胶胶粘CFRP-钢界面性能的温度影响机制

李传习 高有为 王孝耀 李游 司睹英胡

Effect mechanism of temperature on the interface properties of CFRP-steel bonded by self-developed adhesive

LI Chuanxi, GAO Youwei, WANG Xiaoyao, LI You, SIDU Yinghu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230614.006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

环境温度对压电纤维复合材料性能的影响

Effect of ambient temperature on the properties of piezoelectric fiber composites

复合材料学报. 2021, 38(2): 583–590 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200617.001>

高温下双搭接钢-CFRP板胶粘界面力学性能试验

Experimental study for the adhesive interface mechanical properties of double lapped steel-CFRP plate at high temperature

复合材料学报. 2021, 38(2): 449–460 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200608.002>

超高性能混凝土在环境温度变化下的力学性能试验研究

Experiment study on mechanical properties of ultra-high performance concrete under ambient temperature change

复合材料学报. 2021, 38(10): 3495–3503 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201208.001>

纳米SiO₂质量分数对胶粘碳纤维增强树脂复合材料板-钢搭接界面黏结性能的影响

Effect of nano-SiO₂ mass fraction on the interface performance of glued carbon fiber reinforced polymer composite-steel specimen

复合材料学报. 2020, 37(10): 2619–2635 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200319.001>

固化剂混掺对高温下CFRP板-钢板界面黏结性能的影响

Effect of curing agent mixing on interfacial bond behavior of glued CFRP plate-steel plate at elevated temperature

复合材料学报. 2021, 38(12): 4073–4089 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210311.005>

CFRP-钢界面粘结性能试验与数值模拟

Experimental study and numerical simulation for bond behavior of interface between CFRP and steel

复合材料学报. 2018, 35(12): 3534–3546 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180316.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

自研高性能胶胶粘 CFRP-钢界面性能的温度影响机制



分享本文

李传习^{1,2}, 高有为^{*1}, 王孝耀¹, 李游³, 司曙英胡¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 长沙 410114; 2. 广西大学 土木建筑工程学院, 南宁 530005;

3. 湖南工业大学 土木工程学院, 株洲 412007)

摘要: 粘结界面是碳纤维增强复合材料 (CFRP) 加固钢结构的薄弱环节, 受胶粘剂和温度影响显著。为深入了解自研高性能胶胶粘 CFRP-钢界面性能的温度影响机制, 制作了 28 个 CFRP-钢双搭接试件, 开展了自研高性能胶胶粘剂 G3 和典型商品胶粘剂 Sika30 分别在 7 种环境温度下 (-20°C 、 -5°C 、 10°C 、 25°C 、 40°C 、 55°C 和 70°C) 的拉伸剪切试验。分析了试件的破坏模式、极限承载力、荷载-位移曲线、界面剪应力及粘结-滑移曲线等。结果表明: 随温度升高, 胶粘剂强度降低, 韧性增加; 当温度接近或超过胶粘剂玻璃转化温度, 胶体性能急剧下降, 搭接试件的破坏模式由 CFRP 层离破坏变为钢-胶界面破坏, 界面性能显著降低; G3 试件的低温性能与 Sika30 试件相当, 但 G3 胶粘剂试件的高温性能显著优于 Sika30 胶粘剂试件; 试件在低温环境下的界面性能较 25°C 显著降低, 胶粘 CFRP 加固钢结构需考虑低温下加固系统脆化产生的不利影响。

关键词: 桥梁加固; 界面性能; 高性能胶粘剂; 环境温度; 粘结-滑移关系

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2024)02-0925-12

Effect mechanism of temperature on the interface properties of CFRP-steel bonded by self-developed adhesive

LI Chuanxi^{1,2}, GAO Youwei^{*1}, WANG Xiaoyao¹, LI You³, SIDU Yinghu¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530005, China; 3. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: Bonding interface is the weak link of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) reinforced steel structure, which is significantly affected by adhesive and temperature. In order to investigate the effect of temperature on the interfacial properties of CFRP-steel bonded by a self-developed high-performance adhesive, 28 CFRP-steel double lap specimens were prepared. The tensile shear tests of self-developed high-performance adhesive G3 and typical commercial adhesive Sika30 were carried out at 7 ambient temperatures (-20°C , -5°C , 10°C , 25°C , 40°C , 55°C and 70°C). The failure mode, ultimate bearing capacity, load-displacement curve, interface shear stress and bond-slip curve of the specimens were analyzed. The results show that the strength of the adhesive decreases and the toughness increases with the increase of temperature. When the temperature is close to or exceeds the glass transition temperature of the adhesive, the colloidal performance decreases sharply, and the failure mode of the lap joint specimen changes from CFRP layer separation failure to steel-adhesive interface failure, and the interface performance decreases significantly. The low temperature performance of G3 specimen is comparable to that of Sika30 specimen, but the high temperature performance of G3 adhesive specimen is significantly better than that of Sika30

收稿日期: 2023-04-07; 修回日期: 2023-05-24; 录用日期: 2023-06-03; 网络首发时间: 2023-06-15 09:16:24

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230614.006>

基金项目: 国家自然科学基金 (51778069); 湖南省自然科学基金 (2021JJ40173); 湖南省研究生科研创新重点项目 (QL20210180)

National Natural Science Foundation of China (51778069); Natural Science Foundation of Hunan Province (2021JJ40173); Key Research and Innovation Project for Graduate Students of Hunan Province (QL20210180)

通信作者: 高有为, 博士, 研究方向为钢结构加固、新材料、新技术、新结构 E-mail: gaoyouwei95@163.com

引用格式: 李传习, 高有为, 王孝耀, 等. 自研高性能胶胶粘 CFRP-钢界面性能的温度影响机制 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(2): 925-936.

LI Chuanxi, GAO Youwei, WANG Xiaoyao, et al. Effect mechanism of temperature on the interface properties of CFRP-steel bonded by self-developed adhesive [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(2): 925-936 (in Chinese).

adhesive specimen. The interface performance of the specimen at low temperature is significantly lower than that at 25℃. The adverse effects of brittleness of the reinforcement system at low temperature should be considered in the steel structure strengthened with adhesive CFRP.

Keywords: bridge reinforcement; interface performance; high performance adhesive; ambient temperature; bond-slip relationship

胶粘碳纤维增强复合材料 (Carbon fiber reinforced polymer, CFRP) 是钢结构疲劳裂纹处治 (即钢结构加固) 最具前景的方法^[1-5]。胶粘 CFRP 的钢结构, 粘结界面是其薄弱环节, 胶粘剂的性能很大程度上决定了 CFRP 加固钢结构的效果^[6-8]。胶粘剂属于高分子聚合物, 具有较高的温度敏感性。

大多数商品胶粘剂在室温下均具有良好性能, 但当温度低于或高于室温时, 胶粘剂的性能会发生显著变化^[9-11], 胶粘 CFRP-钢界面性能势必也会随之改变^[12-15]。

李传习等^[16]测试了 4 种商品胶粘剂 (Araldite 2014、Araldite420、Sika30、C1) 在 25~70℃ 内的力学性能, 结果表明 4 种胶粘剂的强度和刚度均随温度升高呈线性下降。Biscaia 等^[17]、陈卓异等^[18]基于 Sika30 胶 (玻璃转化温度 $T_g=62^{\circ}\text{C}$) 对 20~95℃ 内 CFRP-钢界面性能进行了试验研究。结果均表明, 当温度接近或超过胶粘剂 T_g 时, 试件的极限承载力显著降低。但当温度低于 T_g 一定值时, 试件的极限承载力随温度升高的变化规律不一, 前者研究表明极限承载力随温度升高而下降, 后者则正好相反。He 等^[19]研究了 4 种胶粘剂 (T1、Sika30、Tc、Araldite2014) 分别在各自 $T_g\pm 15^{\circ}\text{C}$ 下 CFRP-钢界面性能, 结果表明, 温度为 $T_g+15^{\circ}\text{C}$ 时, 试件的极限承载力仅为室温下的 24%~36%; 非线性胶粘剂试件的界面承载力要高于线性胶粘剂, 同种胶粘剂 (线性或非线性) 拉伸强度大的试件界面性能优于拉伸强度小的试件。Al-Shawaf 等^[20]基于 3 种胶粘剂 (Araldite420、Sika30、Mbrace Saturant) 研究了不同温度下 CFRP-钢界面的破坏模式。结果表面, 采用 Araldite420 和 Sika30 胶粘的试件在 20℃ 和 40℃ 温度下破坏模式均为 CFRP 层离, 但当温度高于胶粘剂的 T_g 时, 失效模式变为钢-胶界面破坏。Nguyen 等^[21]也得出相同结论。

上述研究均基于典型商品胶粘剂, 其 T_g 普遍低于 60℃, 而夏季钢桥内部温度可超 60℃, 显然难以满足加固需求。尽管航天航空特供胶粘剂的 T_g 能超过 200℃, 但其固化条件苛刻 (需经 200℃ 以上高温固化), 尚无法广泛应用于钢桥加固^[22-23]。

此外多数学者仅单独研究了不同温度下胶粘剂的性能或 CFRP-钢界面性能, 对两者性能均研究且建立联系的较少。低温环境下胶粘剂的脆性变大, 抵抗裂纹扩展能力变差, 关于低温环境下 CFRP-钢界面研究较溃泛。因此, 基于高性能胶粘剂胶粘 CFRP-钢界面性能的温度影响机制仍需进一步探讨。

本团队已研配出一种耐高温高性能非线性环氧胶粘剂 G3^[6, 24-25], 其固化工艺简单, 拉伸强度大于 50 MPa (商品胶粘剂拉伸强度在 30 MPa 左右^[16, 19, 26]), T_g 高于 90℃, 且在 -20℃ 和 70℃ 下均能保持较高的拉伸强度和断裂韧性。为此本文基于 G3 胶和 T_g 较高的商品胶粘剂 Sika30 制作了 28 个 CFRP-钢双搭接试件, 开展了两种胶粘剂在 7 种环境温度 (-20℃、-5℃、10℃、25℃、40℃、55℃ 和 70℃) 下的拉伸剪切试验, 并通过分析接头试件的破坏模式、极限承载力、荷载-位移曲线、界面剪应力及粘结-滑移曲线等, 揭示基于自研高性能胶 G3 的 CFRP-钢界面优异的动态热力学性能。

1 试验

1.1 原材料

胶粘剂采用自主研配的环氧胶粘剂 G3 和商品胶粘剂 Sika30, 后者由德国西卡公司生产; 搭接试件的钢采用桥梁结构钢 Q345 D, 宽 50 mm, 厚 12 mm; CFRP 由上海悍马公司生产, 宽 50 mm, 厚 1.4 mm。材料参数如表 1 所示。其中 G3 胶和 Sika30 胶参数由自测得到, 测试温度为 25℃。CFRP 和 Q345 D 数据由商家提供。

表 1 材料参数
Table 1 Material parameters

Material	Tensile strength/ MPa	Elasticity modulus/ GPa	Elongation at break/ %	Glass conversion temperature $T_g/^{\circ}\text{C}$
G3	64.4	2.7	9.73	95
Sika30	30.3	11.4	1.62	62
CFRP	2 657.0	180.0	1.70	—
Q345 D	514.0	206.0	—	—

Notes: CFRP—Carbon fiber reinforced polymer; G3, Sika30—Adhesive type.

1.2 试件设计与制备

胶粘剂胶体拉伸试件和剪切试件分别参照 GB/T 2567—2021^[27] 和 GB/T 7124—2008^[28] 制作，试件尺寸如图 1 所示，其中圆弧段半径 R 为 76 mm，中间段宽度 b 为 10 mm，测试段标距 L_0 为 50 mm，直线段长度 L_1 为 60 mm，试件总长度 L 为 200 mm，试件厚度 h 为 4 mm。常温常湿静置 4 h 后，将胶粘剂拉伸试件和剪切试件放入高低温试验箱中进行 90℃ 固化 2.5 h (试验箱温度从室温升至 90℃，升温速率 10℃/min，温度达到 90℃ 后开始固化计时)。Sika30 胶则在室温下固化 7 天。两者均在养护完成后立即开始拉伸测试。

胶粘 CFRP-钢双搭接接头试件的设计与制作参考 ASTM D3528—96(2016)^[29] 及相关研究^[18, 30]。试验开展了由两种胶粘剂 (G3 和 Sika30) 分别在 7 种工作温度 (-20℃、-5℃、10℃、25℃、40℃、55℃、70℃) 下的双搭接拉伸剪切试验。本次试验共制作 28 个试件，分为 G3 试件组和 Sika30 试件组，每组均在上述 7 种工作温度下进行拉伸剪切

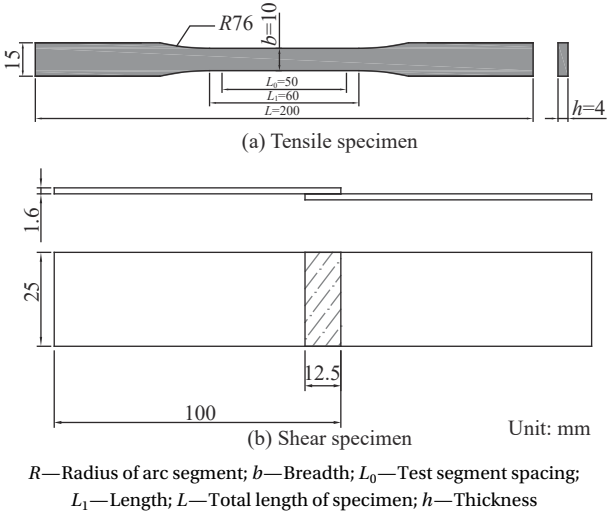


图 1 胶粘剂试件尺寸
Fig. 1 Size of adhesive specimen

试验，同组每种温度进行 2 个试件测试。考虑到试验的离散性，试验过程中对部分结果相差较大的试件进行了补做和替换。双搭接试件的几何尺寸及应变片布置如图 2 所示。

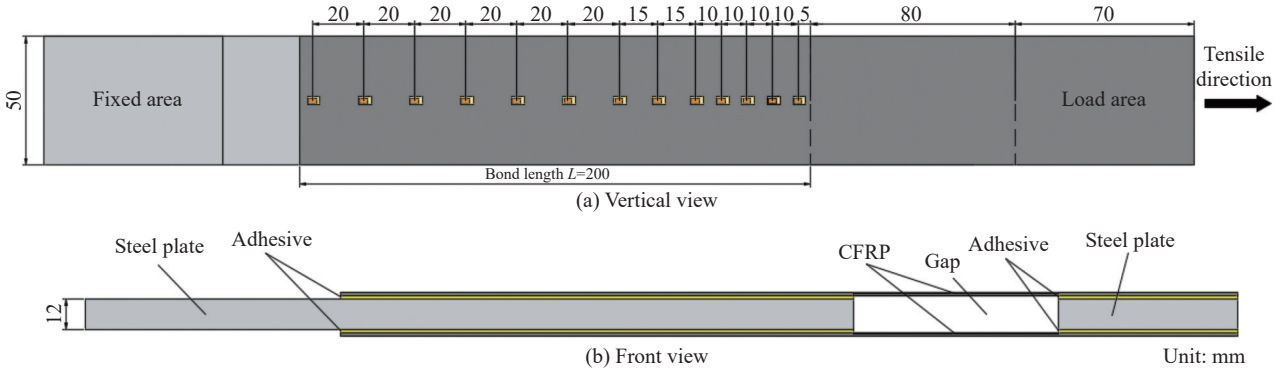


图 2 几何尺寸及应变片布置
Fig. 2 Geometric dimensions and strain gauge arrangement

试件制作具体流程：钢板表面采用带百页轮的打磨机进行打磨除锈，用酒精清洗后待用；CFRP 采用水切割机按设计长度切割，并用砂纸对 CFRP 表面进行打磨，以去除表面树脂和杂质，用酒精清洗后待用；按组分制备胶粘剂；在 CFRP 上的指定区域涂抹胶粘剂，并撒 8~10 颗 1 mm 小钢珠控制胶层厚度，将钢板指定区域涂抹一层胶粘剂后盖于 CFRP 上，完成单面粘贴；在钢板另一面继续涂抹胶粘剂并撒钢珠，将涂有胶粘剂的 CFRP 盖上，完成双面粘贴；最后采用钢板进行压重。固化条件同上。两组试件均在养护完成后立即开始拉伸剪切试验。

1.3 试验方法

胶粘剂胶体测试在上海华龙测试仪器有限公司提供的带高低温箱的 50 kN 电子万能试验机上进行。试件拉伸前，将高低温箱调至指定温度，夹好试件后关闭温度箱，待温度稳定在指定温度 30 min 后开始测试。试件采用位移加载控制，加载速率为 2 mm/min。每组有效试件不少于 5 个。加载装置见图 3。

搭接试件测试在上海华龙测试仪器有限公司提供的带高低温箱的 300 kN 准静态拉伸试验机上完成。试件拉伸前，将高低温箱调至指定温度，试件与夹具进行对中，夹紧加载端后将试件调至合适高度。考虑温度对试件的线膨胀影响，固定端暂不夹紧。

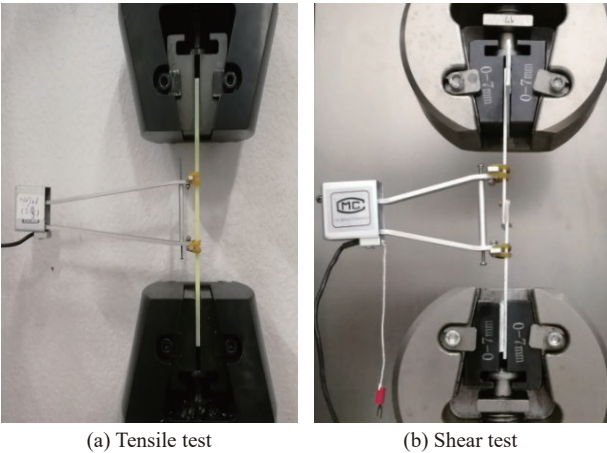


图 3 胶粘剂试验
Fig. 3 Adhesive test

关闭高低温箱门，高低温箱达到指定温度 30 min 后夹紧固定端开始进行加载测试。试验通过位移控制加载，加载速率为 2 mm/min，采用静态应变测试系统进行应变数据的采集。加载装置见图 4。

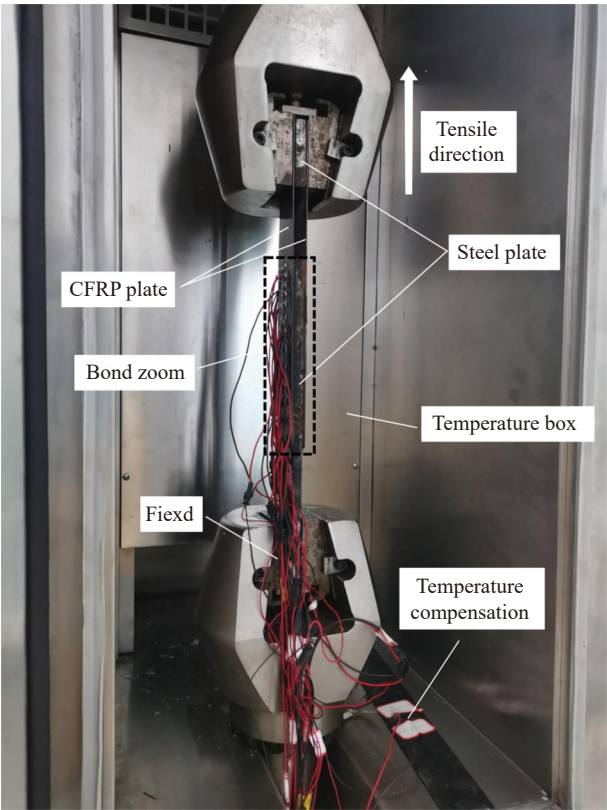


图 4 双搭接试件试验
Fig. 4 Double lap test

2 试验结果与分析

2.1 温度对胶粘剂性能的影响

2.1.1 拉伸性能

图 5 为两种胶粘剂在不同工作温度下拉伸应

力-应变曲线。Sika30 胶在 55℃ 已基本失去结构强度，故其在 55℃ 及以上的应力-应变曲线未示出；可知，当测试温度低于 25℃ 时，大部分分子链均处“冻结”状态，胶粘剂的应力-应变曲线呈线性变化；当测试温度升高，分子链逐渐“解冻”，应力开始减小，应变增加，应力-应变曲线存在明显的屈服点。

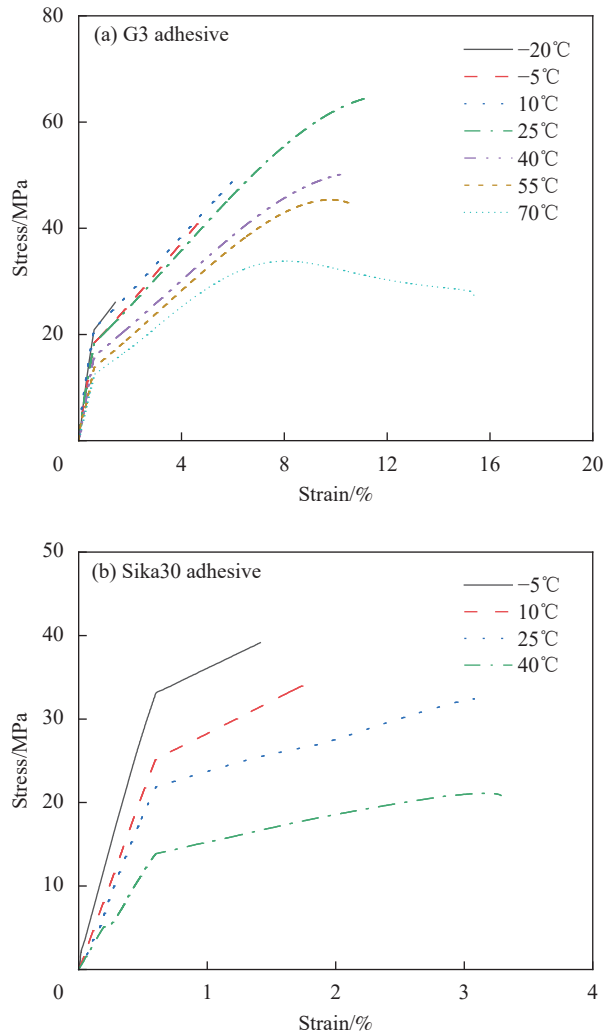


图 5 不同工作温度下胶粘剂的拉伸应力-应变曲线
Fig. 5 Tensile stress-strain curves of adhesives at different working temperatures

由图 5(a) 的 G3 胶的拉伸应力-应变曲线可知，G3 胶在 -20~70℃ 下均具有良好的拉伸性能，其在 70℃ 时强度仍保持 36.1 MPa，比 Sika30 胶在 25℃ 时的强度还要高。

2.1.2 剪切性能

图 6 为两种胶粘剂在不同工作温度下的剪切荷载-位移曲线。由图 6(a) 的 G3 胶的剪切荷载-位

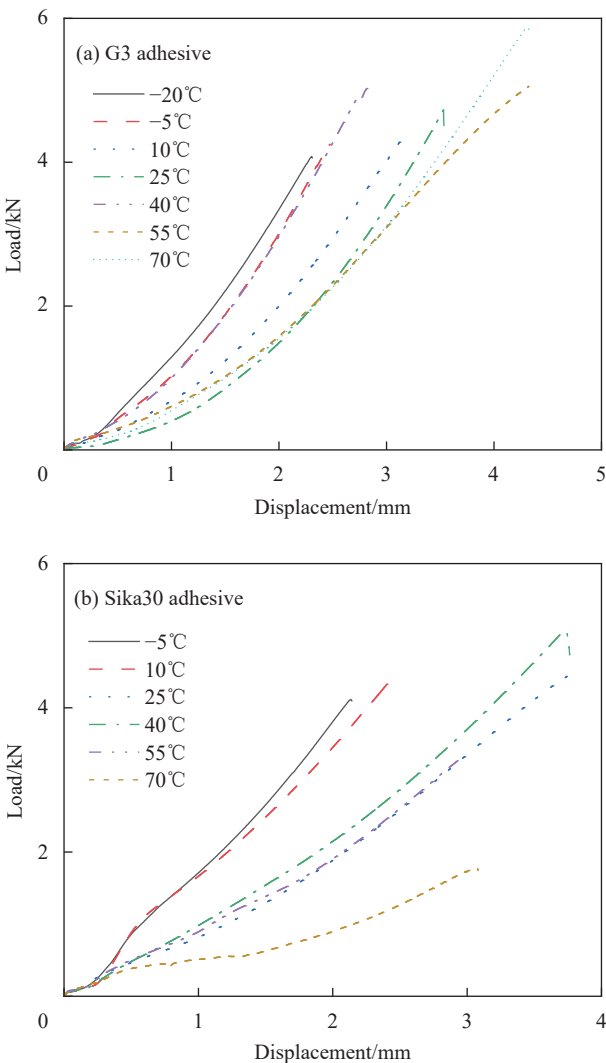


图6 不同工作温度下胶粘剂的剪切荷载-位移曲线
Fig. 6 Shear load-displacement curves of adhesives at different operating temperatures

移曲线可知，在-20~70℃内，G3胶的剪切强度随温度升高而升高。由图6(b)的Sika30胶的剪切荷载-位移曲线可知，在-20~40℃内。Sika30胶的剪切强度随温度升高而升高，但当温度为55℃(接近胶粘剂 T_g)和70℃(超过胶粘剂 T_g)时，剪切强度急剧下降。

2.2 温度对CFRP-钢界面性能的影响

本次试验每组两个试件破坏时的主要破坏模式、最大位移、极限承载力及其平均值均汇总于表2。

2.2.1 破坏模式

CFRP-钢双搭接试件的主要破坏形态可分为5种：(a) CFRP材料破坏；(b) CFRP-胶界面破坏；(c) 胶粘剂内聚破坏；(d) 钢-胶界面破坏；(e) 钢材

破坏，其中钢材破坏的可能性较小。表2统计显示：基于G3胶试件约72%的试件发生a型破坏；约14%的试件发生a+d型破坏；约14%的试件发生d型破坏；基于Sika30胶试件约72%的试件发生a型破坏；约28%的试件发生d型破坏。两种胶粘剂试件的破坏模式均以a型破坏为主，说明两种胶粘剂均具有良好的粘结性能。结合表2中试件的极限承载力可知，发生a型破坏试件的极限承载力较发生d型破坏试件的极限承载力高。由于钢材的线膨胀系数和导热系数分别是CFRP的10倍和30倍，因此当环境温度发生改变时，钢-胶界面相对于CFRP-胶界面更易发生破坏。

试件在不同工作温度下的破坏形态如图7所示(从上到下温度逐渐升高)。由G3试件组的破坏形态(图7(a))可知，温度为-20℃时，试件的破坏形态为钢-胶界面破坏；温度稍许升高(-5℃)，试件的破坏形态为CFRP材料破坏和钢-胶界面破坏的混合破坏；温度高于25℃时，试件的破坏形态表现为CFRP材料破坏。由Sika30试件组的破坏形态(图7(b))可知，温度在-20~40℃区域内，试件的主导破坏形态为CFRP材料破坏，靠近间隙端存在局部的钢-胶界面破坏；当温度达到55℃(接近胶粘剂 T_g)，试件的主要破坏形态为钢-胶界面破坏，伴随有局部胶粘剂内聚破坏和CFRP撕裂；当温度达到70℃(超过胶粘剂 T_g)，试件的破坏形态为钢-胶粘剂界面破坏。

由上可知，不同胶粘剂类型试件的破坏形态受温度影响存在差异。原因之一可能是由于不同胶粘剂受温度的影响程度不同，即胶粘剂 T_g 存在差异，当温度接近或超过胶粘剂 T_g 时，胶粘剂的性能急剧下降。本文涉及的胶粘剂有3种，即结构胶G3胶、Sika30胶和制作CFRP板时所用的浸渍胶(下文简称J胶)，其中J胶的粘结性能决定了CFRP板的层间强度。当结构胶的强度高于CFRP板中J胶的强度时，破坏形态表现为CFRP材料破坏，相反则为结构胶内聚破坏或界面破坏。两者强度接近时，破坏形态表现为上述几种破坏形态的混合破坏。由此可推测：低温环境下(-20~-5℃)，胶粘剂性能从大到小依次为Sika30胶>J胶>G3胶；中温环境下(10~40℃)，胶粘剂性能为G3胶>Sika30胶>J胶；高温环境下(55~70℃)，胶粘剂性能为G3胶>J胶>Sika30胶。

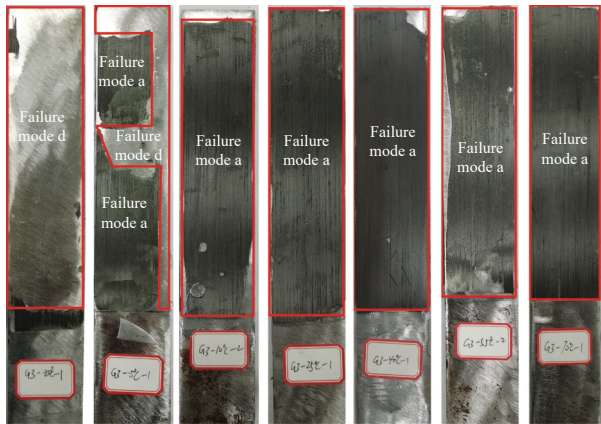
2.2.2 最大位移与极限承载力

CFRP-钢双搭接试件的最大位移与极限承载

表 2 CFRP-钢双搭接试件的拉伸剪切试验结果
Table 2 Tensile shear test results of CFRP-steel double lap specimens

Specimen	Measuring temperature/℃	Maximum displacement/mm		Ultimate load/kN		Failure mode
		Test value	Mean value	Test value	Mean value	
G3	-20	8.0/7.3	7.7	68.5/69.3	68.9	d
	-5	7.1/7.5	7.3	78.9/78.7	78.8	a+d
	10	8.0/7.1	7.6	94.6/95.5	95.1	a
	25	7.9/8.0	8.0	97.9/98.4	98.2	a
	40	8.2/9.3	8.8	119.1/120.4	119.8	a
	55	8.3/10.2	9.3	128.3/128.2	128.3	a
	70	9.6/11.5	10.6	144.9/147.4	146.2	a
Sika30	-20	6.4/5.9	6.1	76.5/72.5	74.5	a
	-5	7.8/7.4	7.6	83.6/83.7	83.7	a
	10	7.0/7.2	7.1	88.5/85.7	87.1	a
	25	7.4/7.0	7.2	106.3/102.1	104.2	a
	40	11.2/10.9	11.1	160.2/162.9	161.6	a
	55	9.7/9.7	9.7	81.6/76.1	78.9	d
	70	7.6/7.2	7.4	65.5/62.9	64.2	d

Notes: Failure mode: a—CFRP material damage; d—Failure of steel-adhesive interface.



(a) G3 specimen group



(b) Sika30 specimen group

图 7 CFRP-钢双搭接试件的界面破坏形态

Fig. 7 Interface failure mode of the CFRP-steel double lap specimens

力随温度升高的变化规律如图 8 所示。可知，在 -20~70℃ 温度范围内，G3 试件的最大位移和极限承载力随温度升高而增大，而 Sika30 试件的最大

位移与极限承载力则随温度升高呈先上升后下降的趋势，与胶粘剂剪切强度随温度的变化趋势一致；温度小于或等于 25℃ 时，G3 试件与 Sika30 试件的极限承载力相当；温度超过 55℃ 时，G3 试件的极限承载力显著高于 Sika30 试件。

结合表 2 中的最大位移与极限承载力数据可知，当温度为 -20℃ 时，G3 试件和 Sika30 试件的极限承载力分别为 68.9 kN 和 74.5 kN，相较于 25℃ 下的 98.2 kN 和 104.2 kN 分别下降了 29.8% 和 28.5%；当温度为 40℃ 时，Sika30 试件的最大位移和极限承载力均达到最大值，分别为 11.1 mm 和 161.6 kN，较室温下的最大位移和极限承载力分别提高了 54.2% 和 55.1%；当温度达到 55℃(接近 Sika30 胶粘剂 T_g) 时，Sika30 试件的极限承载力骤降至 78.9 kN，较 25℃ 时下降了 24.3%，但其最大位移 9.7 mm 仍高于 25℃ 时的 7.2 mm；当温度为 70℃ 时，Sika30 试件的极限承载力为 64.2 kN，仅为室温下极限承载力的 0.6 倍，但其最大位移与室温时的最大位移接近。

由 Sika30 试件的极限承载力随温度的变化趋势可知，当温度低于胶粘剂 T_g 且 22℃ 以上时，试件的极限承载力随温度升高而升高，而当温度接近或高于胶粘剂 T_g 时，试件的极限承载力急剧下降。由于本次最高试验温度为 70℃，远低于 G3 胶 T_g (95℃)，故 G3 试件的极限承载力随温度的变化规律是否与也存在相同规律还有待进一步验证。

由上可知，低温环境下，试件的极限承载力

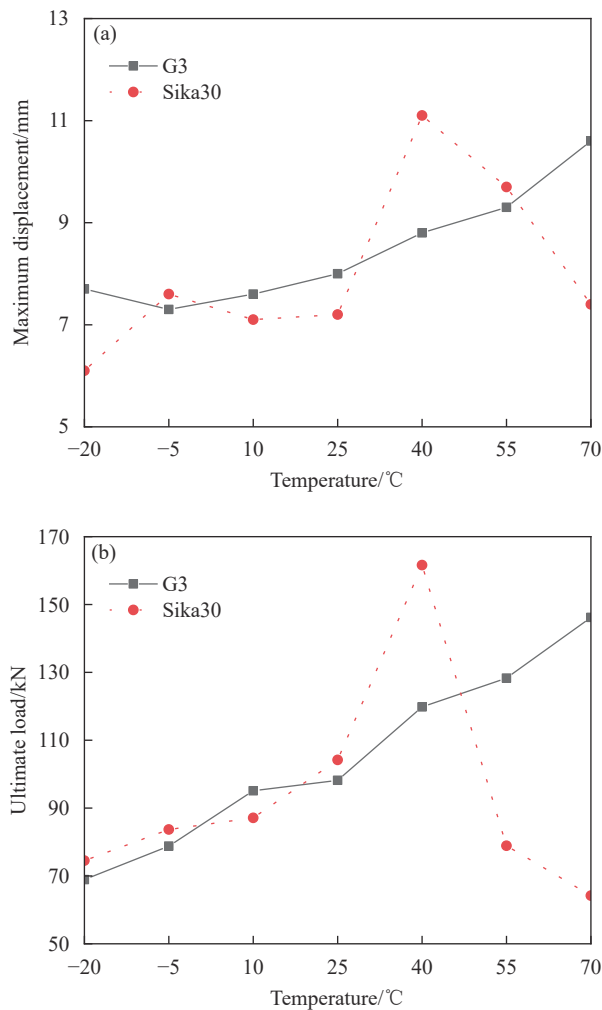


图 8 CFRP-钢双搭接试件最大位移 (a) 与极限荷载 (b) 随温度升高的变化趋势

Fig. 8 Variation trend of maximum displacement (a) and ultimate load (b) of CFRP-steel double lap specimens with increasing temperature

较 25℃ 显著降低；在服役温度可能超过 40℃ 的钢桥加固中，采用 G3 胶的效果要显著优于 Sika30 胶。

试件的荷载-位移曲线如图 9 所示。可知，在加载初期，荷载增长速度较慢；随荷载持续增加，荷载与位移呈线性变化；当荷载增加到某值时，G3 试件在 -20℃ 和 -5℃ 温度下出现“V”字形波动，Sika30 试件在 -20℃、-5℃、10℃ 和 25℃ 温度下均出现“V”字形波动，相应在实验过程中也能听到“噼”的声音。以上说明，当温度低于 25℃ 时，试件的脆性较大，易出现局部脱粘；当温度高于 25℃ 时，试件的延性增加；G3 试件的温度稳定性高于 Sika30 试件。

2.2.3 CFRP 表面轴向应变分布

图 10 示出了 -20℃、25℃ 和 70℃ 下的 CFRP

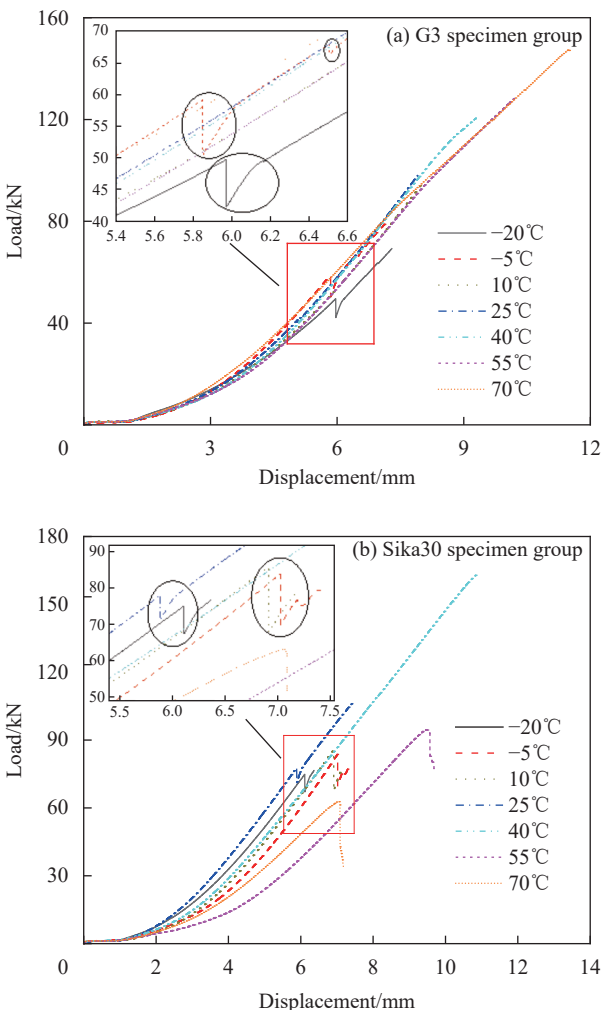


图 9 CFRP-钢双搭接试件荷载-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curves of CFRP-steel double lap specimens

表面轴向应变分布。可知，CFRP 表面轴向应变集中分布于近间隙端，且离间隙端越近，应变越大。由图 10(a) 的 G3 试件的 CFRP 表面轴向应变分布可知，升温使试件的最大应变值增大。由图 10(b) 的 Sika30 试件的 CFRP 表面轴向应变分布可知，当荷载接近或等于极限荷载时，各位置应变均显著增加；当温度为 70℃ 时，同荷载值下应变与距间隙端距离线性相关，靠近间隙端应变大；最大应变随温度升高呈先增加后减小的趋势。

2.2.4 剪应力分布与有效粘结长度

界面剪应力反映了 CFRP-钢界面应力的传递规律。当剪应力接近于 0 时，认为该处无剪应力传递，从间隙端到该处的距离即为有效粘结长度。通过 CFRP 表面轴向应变分布可求得相邻测点 i 和 $i-1$ 测点之间中点处的界面剪应力，下式常用来计算粘结界面剪应力 [8, 18]：

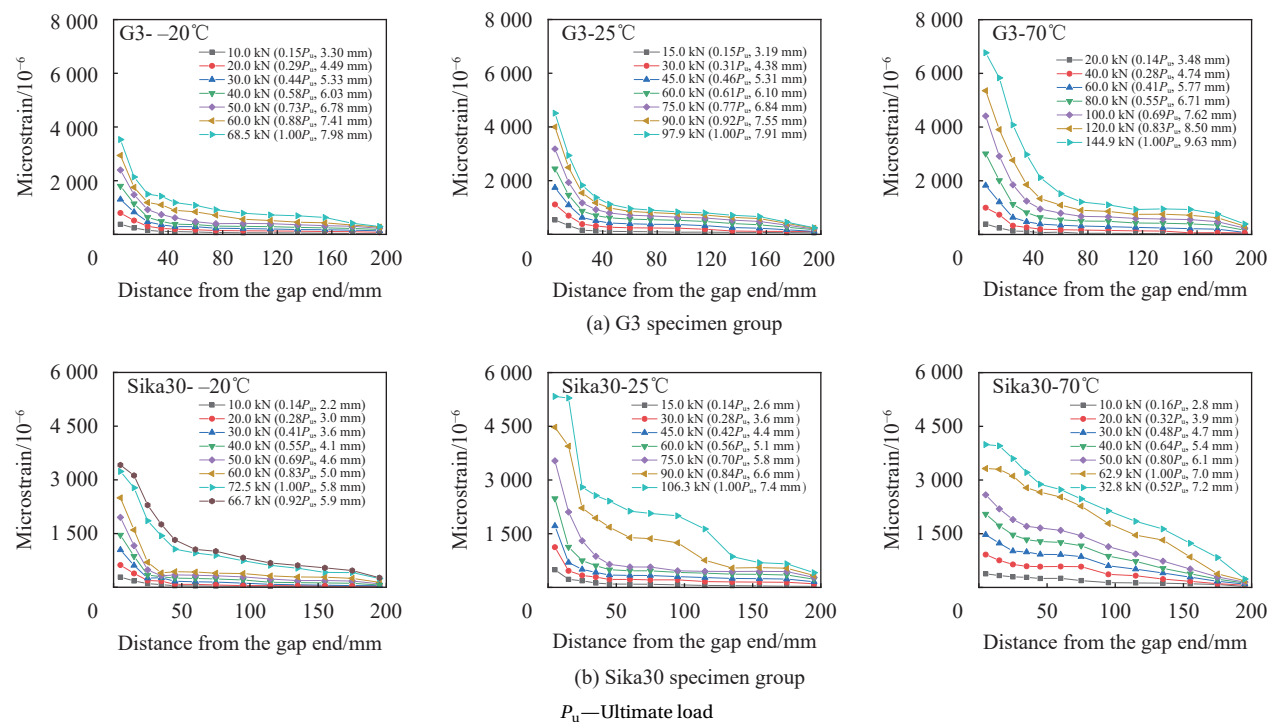


图 10 CFRP 表面轴向应变分布
Fig. 10 Axial strain distribution on CFRP surface

$$\tau_{i-1/2} = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}}{l_i - l_{i-1}} E_p t_p \quad (1)$$

式中： $\tau_{i-1/2}$ 为测点 i 和测点 $i-1$ 之间中点处的界面剪应力； ε_i 为测点 i 处 CFRP 表面应变； l_i 为测点 i 到 CFRP 自由端的距离； E_p 、 t_p 分别为 CFRP 的弹性模量和厚度。

剪应力分布和有效粘结长度如图 11 所示。可知，G3 试件在 -20°C 、 25°C 和 70°C 时的有效粘结长度分别为 52.5 mm、67.5 mm 和 85 mm，说明温度升高，G3 试件的有效粘结长度增加；Sika30 胶试件在 -20°C 和 25°C 时的有效粘结长度均为 67.5 mm，但当温度达到 70°C 时（超过 Sika30 胶粘剂 T_g ），胶粘剂由玻璃态转变为高弹态，试件的有效粘结长度超过 200 mm 或不存在有效粘结长度；剪应力主要分布在靠间隙端，初始剥离始于该区域，远离该区域的界面剪应力迅速降低，超过有效粘结长度后基本无变化。

2.2.5 粘结-滑移本构

粘结-滑移本构即剪应力和滑移的关系，称为 τ - s 曲线。它能够描述界面受力情况和失效过程。针对 CFRP-钢搭接试件作如下假定：(1) 忽略钢的轴向变形；(2) CFRP 自由端滑移为 0。从自由端对测得的 CFRP 表面应变进行积分，可得测点 $i-1$ 与测点 i 之间中点处的界面局部滑移 $S_{i-1/2}$ [26]：

$$S_{i-1/2} = \frac{\varepsilon_i + \varepsilon_{i-1}}{4} (l_i - l_{i-1}) + \frac{\varepsilon_{i-1} + \varepsilon_{i-2}}{2} (l_{i-1} - l_{i-2}) + \sum_{j=3}^i \frac{\varepsilon_{i-2} + \varepsilon_{i-3}}{2} (l_{i-2} - l_{i-3}) \quad (2)$$

联立式 (1) 和式 (2) 可得试件在加载过程中不同位置处的粘结-滑移关系。由上文分析可知，剪应力主要分布在近间隙端，且大部分试件的破坏形态均存在间隙端局部混合破坏，认为该处胶层经历了整个失效过程，因此选取离间隙端 10 mm 位置的粘结-滑移关系进行分析。

粘结-滑移曲线上升阶段的斜率定义为刚度 K ， τ - s 曲线与 s 轴围成的面积定义为界面断裂能 G_f 。界面刚度反映试件抵抗变形的能力，刚度越大，试件抵抗变形能力越强；断裂能 G_f 反映抵抗裂纹扩展的能力， G_f 越小，试件抵抗裂纹扩展能力越低，试件越易发生破坏。试件在不同工作温度下的界面刚度 K 、断裂能 G_f 、峰值剪应力 $\tau_{\max}$ 、极限滑移量 S_f 及峰值剪应力所对应的荷载 P_1 、滑移量 S_1 、滑移量 S_2 列于表 3。可知，在 $-20\sim 70^\circ\text{C}$ 温度范围内，随温度升高，G3 试件的极限滑移量 S_f 和断裂能 G_f 增加，峰值剪应力和界面刚度 K 先增大后减小，滑移量 S_1 变化不大；Sika30 试件的所有本构参数均随温度升高呈先上升后下降的趋势。由 Sika30 试件的本构参数还可知，当温度为 55°C

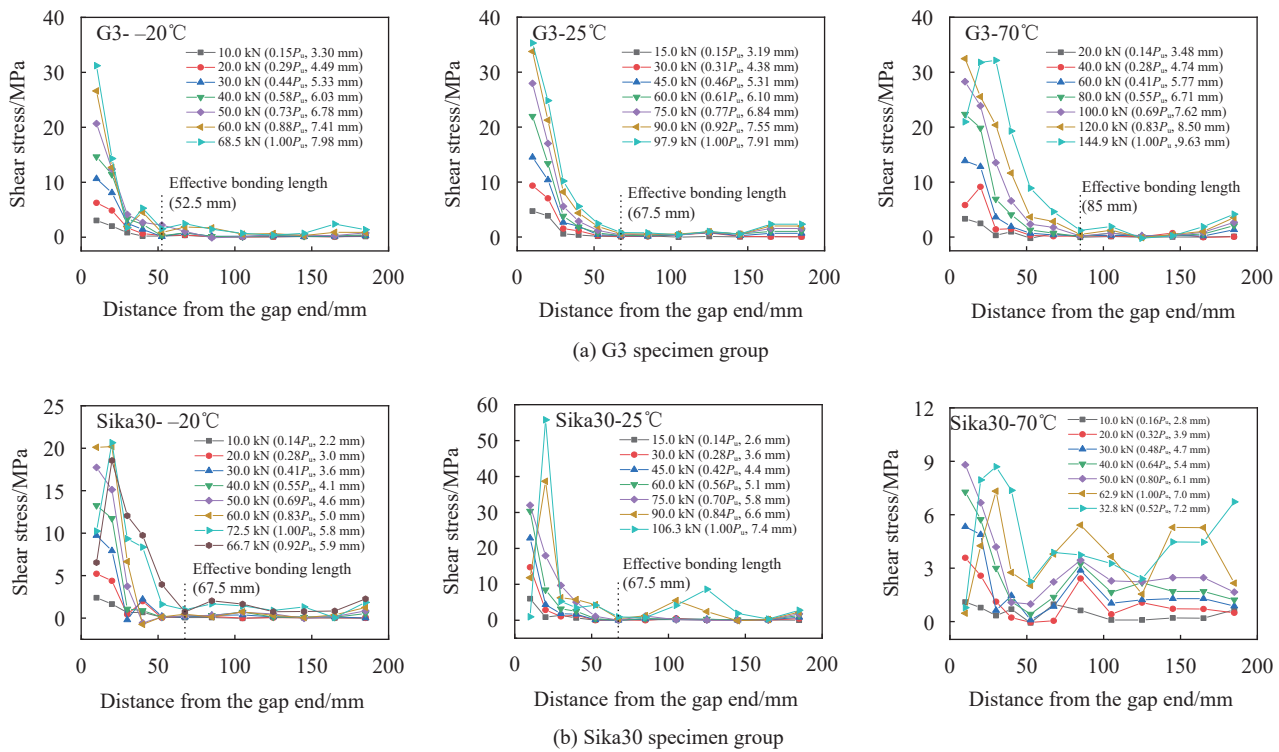


图 11 CFRP-钢双搭接试件剪应力分布

Fig. 11 Shear stress distribution of CFRP-steel double lap specimens

表 3 CFRP-钢双搭接试件本构参数

Table 3 Constitutive parameters of CFRP-steel double lap specimens

Specimen	$T/^{\circ}\text{C}$	P_1/kN	$\tau_{\max}/\text{MPa}$	S_1/mm	S_2/mm	S_f/mm	$K/(\text{MPa}\cdot\text{mm}^{-1})$	$G_f/(\text{MPa}\cdot\text{mm})$
G3	-20	68.5 (P_u)	34.7	0.17	—	0.17	204.2	2.9
	-5	78.7 (P_u)	36.6	0.17	—	0.17	215.1	3.1
	10	95.5 (P_u)	38.1	0.17	—	0.17	223.9	3.2
	25	97.9 (P_u)	38.1	0.18	—	0.18	211.8	3.4
	40	105.0 (0.88 P_u)	33.3	0.17	0.22	0.22	200.5	4.5
	55	97.9 (0.73 P_u)	32.8	0.17	0.25	0.33	198.4	6.7
	70	114.1 (0.79 P_u)	32.6	0.18	0.27	0.39	184.7	7.8
	70	114.1 (0.79 P_u)	32.6	0.18	0.27	0.39	184.7	7.8
Sika30	-20	65.2 (0.9 P_u)	21.0	0.10	—	0.23	208.5	2.4
	-5	60.0 (0.72 P_u)	24.3	0.08	—	0.21	289.6	2.6
	10	68.2 (0.77 P_u)	31.2	0.10	—	0.17	316.9	2.7
	25	65.1 (0.61 P_u)	35.4	0.10	—	0.29	343.8	5.1
	40	85.7 (0.72 P_u)	23.9	0.24	—	0.48	169.0	5.7
	55	43.7 (0.54 P_u)	9.7	0.16	0.22	0.35	59.0	2.0
	70	46.6 (0.74 P_u)	8.6	0.19	0.22	0.29	46.1	1.4
	70	46.6 (0.74 P_u)	8.6	0.19	0.22	0.29	46.1	1.4

Notes: T —Test temperature; P_1 —Load corresponding to the peak shear stress; $\tau_{\max}$ —Peak shear stress; S_1 —Slip amount corresponding to the peak shear stress; S_2 —Corresponding slip when the shear stress begins to decrease; S_f —Limit slip; K —Interface stiffness; G_f —Interfacial fracture energy.

(接近 Sika30 胶 T_g) 时，试件的峰值剪应力、界面刚度和断裂能都显著降低，较 25℃ 分别降低了 72.6%、82.8% 和 60.8%。

试件的粘结-滑移曲线如图 12 所示。由图 12(a) 可知，当温度不超过 25℃ 时，粘结-滑移曲线形状近似为直角三角形，即当剪应力达到峰值后试件马上发生破坏，破坏前无明显征兆，为脆性破

坏；当温度达到 40℃ 时，粘结-滑移曲线形状近似为直角梯形，即存在一个“屈服平台”，但无明显下降段；当温度高于 40℃ 时，粘结-滑移曲线形状近似为梯形，即存在一个显著的屈服平台和下降段，属于延性破坏。由图 12(b) 可知，当温度不超过 25℃ 时，粘结-滑移曲线形状近似为三角形，即存在上升段和下降段；当温度为 40℃ 时，

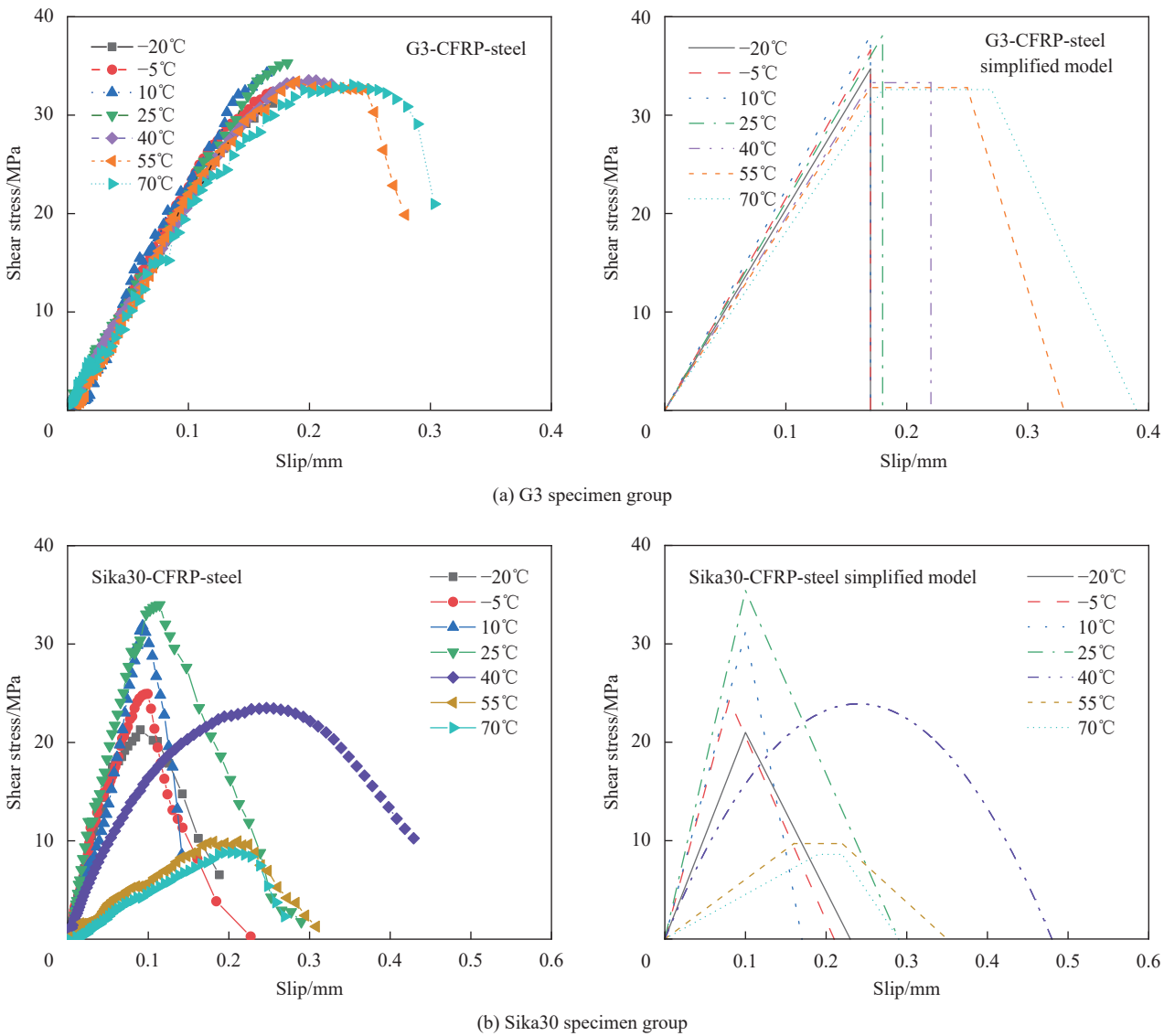


图 12 CFRP-钢双搭接试件粘结-滑移关系

Fig. 12 Bond-slip relationship of CFRP-steel double lap specimens

粘结-滑移曲线形状近似为二次抛物线；当温度为 55℃ 和 70℃ 时，粘结-滑移曲线形状近似为梯形。胶粘剂随温度升高韧性增强，故试件的界面韧性也随之增加。界面劣化减缓，其粘结-滑移曲线形状逐渐由三角形转变为梯形。

3 结论

- (1) 随温度升高，胶粘剂强度下降，韧性增加。当温度接近或超过胶粘剂玻璃转化温度 T_g 时，胶粘剂性能急剧下降，甚至直接失去结构强度；碳纤维增强复合材料 (CFRP)-钢搭接试件的破坏模式也由 CFRP 层离破坏转变为钢-胶界面破坏。
- (2) 在 -20~70℃ 温度范围内，G3 试件的极限承载力随温度升高而增大，而 Sika30 试件的极限

- 承载力则随温度升高呈先上升后下降的趋势；当温度为 -20℃ 时，G3 试件和 Sika30 试件的极限承载力较 25℃ 下分别下降了 29.8% 和 28.5%，说明低温环境使界面性能退化；当温度达到 55℃ (接近 Sika30 胶粘剂玻璃转化温度 T_g) 时，Sika30 试件的极限承载力较 25℃ 时下降了 24.3%；当温度为 70℃ 时，Sika30 试件的极限承载力仅为室温下极限承载力的 0.6 倍，而此时 G3 试件的极限承载力是 Sika30 试件 2.3 倍。
- (3) 试件的有效粘结长度随温度升高而增长。G3 试件在 -20℃、25℃ 和 70℃ 时的有效粘结长度分别为 52.5 mm、67.5 mm 和 85 mm；Sika30 胶在 -20℃ 和 25℃ 时的有效粘结长度均为 67.5 mm，

但当温度为 70℃ 时, 胶粘剂已软化, 有效粘结长度超过 200 mm 或不存在有效粘结长度; 剪应力主要分布在靠间隙端, 初始剥离始于该区域, 远离该区域的界面剪应力迅速降低, 超过有效粘结长度后基本无变化。

(4) 温度升高, 界面延性增加, 粘结-滑移曲线形状逐渐由三角形转变为梯形。

参考文献:

- [1] 王海涛, 卞致宁, 熊浩, 等. 粘结层和预应力对CFRP板加固损伤钢梁抗弯性能的影响[J]. 复合材料学报, 2013, 40(3): 1718-1728.
- WANG Haitao, BIAN Zhining, XIONG Hao, et al. Effects of the adhesive layer and prestress on the flexural behavior of damaged steel beams strengthened with CFRP plates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 40(3): 1718-1728(in Chinese).
- [2] 郑元鹏, 陈涛, 黄诚. CFRP加固紧凑拉伸钢试件的疲劳试验研究[J]. 复合材料学报, 2022, 39(11): 5192-5205.
- ZHENG Yuanpeng, CHEN Tao, HUANG Cheng. Experimental study on fatigue behavior of compact-tension specimens strengthened by CFRP[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(11): 5192-5205(in Chinese).
- [3] 李传习, 柯璐, 陈卓昇, 等. 正交异性钢桥面板弧形切口及其CFRP补强的疲劳性能[J]. 中国公路学报, 2021, 34(5): 63-75.
- LI Chuanxi, KE Lu, CHEN Zhuoyi, et al. Fatigue behavior and CFRP reinforcement of diaphragm cutouts in orthotropic steel bridge decks[J]. China Journal Highway and Transport, 2021, 34(5): 63-75(in Chinese).
- [4] 李安邦, 徐善华, 吴成, 等. 外贴CFRP板加固锈蚀钢板疲劳性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(7): 62-72.
- LI Anbang, XU Shanhua, WU Cheng, et al. Experimental study on the fatigue performance of corroded steel plate strengthened with externally bonded CFRP plates[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(7): 62-72(in Chinese).
- [5] KOWAL M, ROZYLO P. Effect of bond end shape on CFRP/steel joint strength[J]. Composite Structures, 2022, 284(3): 115186.
- [6] LI Y, LI C X, HE J, et al. Effect of functionalized nano-SiO₂ addition on bond behavior of adhesively bonded CFRP-steel double-lap joint[J]. Construction and Building Materials, 2020, 244(3): 118400.
- [7] BORRIE D, AL-SAAD S, ZHAO X L, et al. Effects of CNT modified adhesives and silane chemical pre-treatment on CFRP/steel bond behaviour and durability[J]. Construction and Building Materials, 2021, 273: 121803.
- [8] 李传习, 柯璐, 陈卓昇, 等. CFRP-钢界面粘结性能试验与数值模拟[J]. 复合材料学报, 2018, 35(12): 3534-3546.
- LI Chuanxi, KE Lu, CHEN Zhuoyi, et al. Experimental and numerical simulation of interfacial bonding properties of CFRP-steel[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(12): 3534-3546(in Chinese).
- [9] JAHANI Y, BAENA M, BARRIS C, et al. Influence of curing, post-curing and testing temperatures on mechanical properties of a structural adhesive[J]. Construction and Building Materials, 2022, 324: 126698.
- [10] FIRMO J P, ROQUETTE M G, CORREIA J R, et al. Influence of elevated temperatures on epoxy adhesive used in CFRP strengthening systems for civil engineering applications[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2019, 93: 102333.
- [11] BANE A M D, SILVA L F M D, CAMPILHO R D S G. Effect of temperature on tensile strength and mode I fracture toughness of a high temperature epoxy adhesive[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012, 26(7): 939-953.
- [12] LI C X, KE L, HE J, et al. Effects of mechanical properties of adhesive and CFRP on the bond behavior in CFRP-strengthened steel structures[J]. Composite Structures, 2019, 211(3): 163-174.
- [13] 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.
- [14] GUO D, LIU Y L, GAO W Y, et al. Bond behavior of CFRP-to-steel bonded joints at different service temperatures: Experimental study and FE modeling[J]. Construction and Building Materials, 2023, 326: 129836.
- [15] CHANDRATHILAKA E R K, GAMAGE J C P H, FAWZIA S. Mechanical characterization of CFRP/steel bond cured and tested at elevated temperature[J]. Composite Structures, 2019, 207: 471-477.
- [16] 李传习, 曹先慧, 柯璐, 等. 高温对结构加固用环氧粘结剂力学性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(3): 642-649.
- LI Chuanxi, CAO Xianhui, KE Lu, et al. Effects of high temperatures on mechanical properties of epoxy adhesives for structural strengthening[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(3): 642-649(in Chinese).
- [17] BISCAIA H C, RIBEIRO P. A temperature-dependent bond-slip model for CFRP-to-steel joints[J]. Composite Structures, 2019, 217: 186-205.
- [18] 陈卓昇, 彭彦泽, 李传习, 等. 高温下双搭接钢-CFRP板胶界面力学性能试验[J]. 复合材料学报, 2021, 38(2): 449-460.
- CHEN Zhuoyi, PENG Yanze, LI Chuanxi, et al. Experimental study for the adhesive interface mechanical properties of double lapped steel-CFRP plate at high temperature[J].

- Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(2): 449-460(in Chinese).
- [19] HE J, XIAN G, ZHANG Y X. Effect of moderately elevated temperatures on bond behaviour of CFRP-to-steel bonded joints using different adhesives[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 241: 118057.
- [20] AL-SHAWAF A, AL-MAHAIDI R, ZHAO X L, et al. Effect of elevated temperature on bond behaviour of high modulus CFRP/steel double-strap joints[J]. *Australian Journal of Structural Engineering*, 2009, 10(1): 63-74.
- [21] NGUYEN T C, YU B, ZHAO X L, et al. Mechanical characterization of steel/CFRP double strap joints at elevated temperatures[J]. *Composite Structures*, 2011, 93(6): 1604-1612.
- [22] 李栓, 张宝艳, 张思, 等. 酚醛环氧树脂改性环氧胶粘剂的耐热性能研究[J]. *化工新型材料*, 2023, 51(1): 272-275, 280.
LI Shuan, ZHANG Baoyan, ZHANG Si, et al. Study on heat resistance of epoxy adhesive modified by phenolic epoxy resin[J]. *New Chemical Materials*, 2023, 51(1): 272-275, 280(in Chinese).
- [23] 李伟捷, 光善仪, 徐洪耀. 不同固化剂复配的耐高温环氧树脂体系性能[J]. *高分子材料科学与工程*, 2022, 38(5): 69-80.
LI Weijie, GUANG Shanyi, XU Hongyao. Properties of epoxy resin system with different curing agents[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2022, 38(5): 69-80(in Chinese).
- [24] 李传习, 李游, 贺君, 等. 固化剂对室温胶黏CFRP板/钢板界面性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(2): 339-347.
LI Chuanxi, LI You, HE Jun, et al. Effect of curing agent on interfacial performance of adhesively bonded CFRP laminate/steel plate cured at room temperature[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(2): 339-347(in Chinese).
- [25] 李游, 李传习, 郑辉, 等. 固化剂混掺对高温下CFRP板-钢板界面粘结性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(12): 4073-4089.
- LI You, LI Chuanxi, ZHENG Hui, et al. Effect of curing agent mixing on interfacial bond behavior of glued CFRP plate-steel plate at elevated temperature[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(12): 4073-4089(in Chinese).
- [26] YU T, FERNANDO D, TENG J G, et al. Experimental study on CFRP-to-steel bonded interfaces[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(5): 2279-2289.
- [27] 中国国家标准化管理委员会. 树脂浇铸体性能试验方法: GB/T 2567—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Test methods for properties of resin casting body: GB/T 2567—2021[S]. Beijing: China Standards Press, 2021(in Chinese).
- [28] 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. Adhesives—Determination of tensile lap-shear strength of rigid-to-rigid bonded assemblies: GB/T 7124—2008[S]. Beijing: China Standards Press, 2008(in Chinese).
- [29] American Society for Testing and Materials. Standard test method for strength properties of double lap shear adhesive joints by tension loading: ASTM D3528-96[S]. West Conshohocken: ASTM, 2008.
- [30] 李腾, 宁志华, 吴嘉瑜. CFRP加固钢板的粘结界面剥离破坏[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(12): 4090-4105.
LI Teng, NING Zhihua, WU Jiayu. Interfacial debonding failure of CFRP-strengthened steel structures[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(12): 4090-4105(in Chinese).