

文章编号: 1674-599X(2022)02-0025-08

# 湿热对胶黏剂及CFRP-钢接头力学性能的影响

李传习<sup>1</sup>, 刘一鸣<sup>1</sup>, 李游<sup>2</sup>, 鄢亦斌<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学 桥梁与建筑绿色建造与维护湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114;

2.湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 为探索湿热耦合作用对胶粘CFRP加固钢结构界面耐久性的影响, 基于团队研制的纳米材料增韧环氧胶黏剂, 对胶黏剂胶体及CFRP-钢双搭接接头在20、55、70℃水环境下进行了30、60 d的加速老化试验, 测试胶黏剂胶体浸泡后的动态力学性能、拉伸性能和CFRP-钢双搭接试件浸泡后的力学性能, 并与未浸泡试件的试验结果进行比较, 分析湿热温度和浸泡时间对胶黏剂及CFRP-钢双搭接接头力学性能的影响规律。研究表明: 20℃的水浴浸泡下, 胶黏剂的拉伸强度与玻璃化转变温度随浸泡时间呈下降趋势, 浸泡60 d的拉伸强度与玻璃转化温度分别下降16.3%、7.6℃; 55、70℃水浴浸泡30 d, 胶体拉伸强度变化较小, 玻璃转化温度升高11.5℃; 70℃水浴浸泡60 d, 拉伸强度下降27.8%。经20、55、70℃水浴浸泡30 d后, CFRP-钢双搭接接头极限荷载较初始值分别下降了2.13%、8.13%、11.83%。接头强度的退化原因主要是湿热老化, 其降低了CFRP板/胶层界面及钢/胶层界面的黏结强度。

**关键词:** 湿热老化; 环氧胶黏剂; 玻璃化转变温度; CFRP-钢双搭接接头; 力学性能

中图分类号: TB332

文献标志码: A

## Effect of hygrothermal aging on mechanical properties of adhesive and CFRP-steel joints

LI Chuanxi<sup>1</sup>, LIU Yiming<sup>1</sup>, LI You<sup>2</sup>, YAN Yibin<sup>1</sup>

(1.Key Laboratory of Green Construction and Maintenance of Bridges and Buildings of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

**Abstract:** In order to explore the effect of hygrothermal coupling on the interfacial durability of steel structure strengthened with CFRP, the nano-material toughened epoxy adhesive developed by the team was used, the accelerated aging tests of adhesive colloid and CFRP-steel double lap joints were carried out for 30 days and 60 days under the water environment of 20℃, 55℃ and 70℃, respectively. The dynamic mechanical properties and tensile properties of adhesive colloid, and the shear properties of CFRP-steel double lap joints were tested after immersion. The test results were compared with those of non-immersed specimens. The influence of hygrothermal temperature and immersion time on the mechanical properties of adhesive and CFRP-steel double lap joints was revealed. The results show that the tensile strength and glass transition temperature of the adhesive decreased with the immersion time at the 20℃. After 60 days of immersion, the tensile strength and glass transition temperature decreased by 16.3% and 7.6℃ respectively. When the specimen is immersed at the 55℃ and 70℃ water for 30 days, tensile strength of the colloid changed little, glass transition temperature increased by 11.5℃. The tensile strength decreased by 27.8% after soaking in 70℃ water for 60 days. If the specimen is dipped in water at 20℃, 55℃ and 70℃ for 30 days, the ultimate load of CFRP-steel double-lap joints decreased by 2.13%, 8.13% and 11.83%, respectively. The strength degradation of the joint is caused

收稿日期: 2021-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(51778069)

作者简介: 李传习(1963—), 男, 长沙理工大学教授, 博士生导师。

by the hygrothermal aging. The bonding strength of interface is degraded.

**Key words:** hygrothermal aging; epoxy adhesive; glass transition temperature; CFRP-steel double lap joint; mechanical property

随着桥梁服役年限的增长, 疲劳开裂已成为钢结构桥梁的常见病害之一<sup>[1-2]</sup>。传统钢结构加固方法是将钢板焊接螺栓连接到原结构受损部位。这些方法因焊缝或钻孔等措施会对原结构造成新的损伤。采用胶黏剂将碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, 简称为CFRP)粘贴到疲劳开裂处进行加固与修复, 具有对原结构零损伤、施工简便和抗疲劳性能好等优点<sup>[3-5]</sup>。CFRP板与钢构件之间的黏接界面层可加固结构薄弱部位<sup>[6-7]</sup>。考虑加固结构常年处于恶劣环境中, 其耐久性显得尤为重要, 而温度和湿度被认为是影响黏接结构耐久性的主要环境因素<sup>[8-9]</sup>。国内外学者对胶黏剂及CFRP-钢黏接湿热耐久性进行了研究。NGUYEN等人<sup>[10]</sup>发现, 在50℃/90%RH下暴露1 000 h后, Araldite 420环氧胶黏剂的力学性能所受的影响较小。胶黏剂在50℃海水浸泡后暴露, 2个月内, 强度先显著下降, 随后下降速度变慢, 在第4个月时, 其拉伸强度和刚度分别保持在初始值的63%和45%。HESHMATI等人<sup>[11]</sup>对基于商用环氧结构胶黏接的CFRP-钢双搭接接头, 放入45℃蒸馏水环境中进行了一年的老化试验, 老化后试件的失效载荷较未老化试件的下降了约9%。罗南海<sup>[12]</sup>对基于胶膜连接的CFRP-钢双搭接接头进行了20 d的水浸泡老化, 发现在25℃的浸泡环境下试件极限承载力无明显变化, 在70℃浸泡环境下极限承载力下降15.3%。DAWOOD等人<sup>[13]</sup>在38℃和5%氯化钠溶液环境中对CFRP-钢双搭接试样进行了6个月的耐久性试验, 发现试样的界面黏结强度降低了60%。研究结果表明: 不同种类的胶黏剂和不同的湿热条件下, 胶黏剂与胶接界面黏结强度的下降程度不同。研制和探寻出一种耐湿热性能好, 适用于土木工程服役环境的胶黏剂具有重要意义。同时, 作为一种高分子材料, 在土木工程应用研究中, 关于纳米材料改性胶黏剂CFRP-钢胶接接头的湿热耐久性研究也较为鲜见。因此, 本研究拟对团队研制的一种纳米材料增韧环氧胶黏剂和基于该胶黏剂的CFRP-钢双搭接接头在不同水浴温度下进行加速老化试验, 分析老

化后胶黏剂胶体的动态力学性能、拉伸性能和CFRP-钢双搭接接头的界面黏接性能的影响规律。

1 试验部分

1.1 试验材料

胶黏剂为团队研制的纳米材料增韧环氧胶黏剂, 钢板为Q345qD钢, CFRP板采用南京海拓公司生产的拉挤成型CFRP单向板。钢板和CFRP板材料参数见表1。

表1 CFRP板及钢板材料参数

Table 1 Material parameter of CFRP plate and steel plate					
材料参数	厚度/ mm	宽度/ mm	弹性模量/ GPa	延伸率/ %	拉伸强度/ MPa
CFRP板	2	50	162.8	1.62	2 433
Q345qD钢	12	50	206.0	—	514

1.2 试件制备过程

胶黏剂为A、B双组分结构胶, 配比为100:31。将称量好的A、B组分混合, 人工搅拌10 min, 倒入模具制作好试件, 室温下养护14 d。

动态力学分析(dynamic mechanical analysis, 简称为DMA)试样尺寸为50 mm×12.5 mm×3.5 mm的长方体。

拉伸性能试件依据ASTM D638-10标准制作, 尺寸如图1所示。

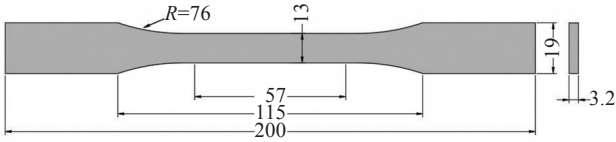


图1 胶黏剂拉伸试件尺寸(单位: mm)

Fig.1 Size of adhesive tensile specimen (unit: mm)

CFRP-钢双搭接试件设计和制作参考ASTM D3528-96(2008)及相关研究<sup>[9]</sup>, 尺寸如图2所示。钢板表面用打磨机进行打磨除锈, CFRP表面采用砂纸打磨, 除去表层树脂, 二者均采用丙酮擦拭干净。采用直径为1 mm的小钢珠控制胶层厚度, 待试件上层粘贴CFRP板后, 用压板压住试件, 挤出多余的胶, 室温下养护14 d。

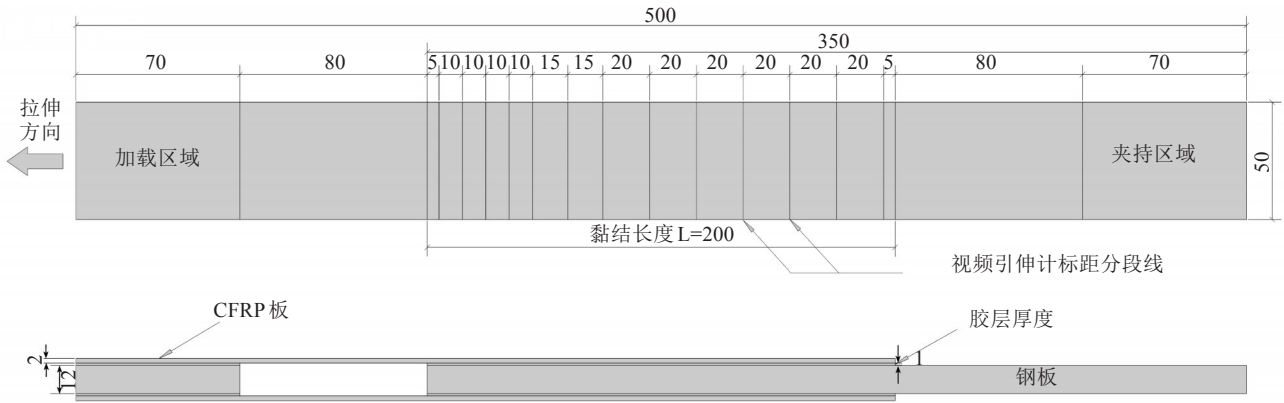


图2 CFRP-钢双搭接试件尺寸 (单位: mm)

Fig. 2 Size of CFRP-steel double lap specimen (unit:mm)

### 1.3 试验方法

养护好的试件分别放入温度为20、55、70℃的恒温水箱中浸泡。其中, 拉伸试样与DMA试样浸泡30、60 d后, 分别从每个恒温水箱中取出3个试样进行拉伸性能测试与DMA测试。CFRP-钢双搭接试件待浸泡30 d后, 从每个环境中取出2个试样进行拉伸剪切测试。

DMA测试采用美国TA公司DMA 850动态力学分析仪进行试验。测量材料在程序控制温度下, 研究振动负荷下动态模量、力学损耗与温度之间的关系。考察基于储能模量、损耗模量和损耗因子3个材料黏弹性能指标对应的玻璃化转变温度<sup>[14]</sup>。储能模量反映材料黏弹性中的弹性部分; 损耗模量反映黏性部分; 损耗因子为损耗模量与存储模量比值, 可表征材料的阻尼。玻璃化转变温度表示材料在玻璃态和高弹态之间相互转化的温度, 是胶黏剂性能随温度变化的一个重要参数。基于储能模量的玻璃化转变温度 $T_{g,s}$ 变化曲线, 采用切线法; 基于损耗因子的玻璃化转变温度 $T_{g,i}$ 变化曲线, 采用峰值法; 基于损耗模量的玻璃化转变温度 $T_{g,l}$ 变化曲线, 采用峰值法, 如图3所示。试验前, 先采用游标卡尺量取试件的精确宽度和厚度。再采用35 mm双悬臂夹具(试件及夹具如图4所示), 设置振荡模式, 幅值为10  $\mu\text{m}$ , 测试频率为1 Hz, 温度范围为室温至120℃, 升温速率为5℃/min。

胶黏剂准静态拉伸性能测试采用50 kN电子万能试验机, 加载速率为2 mm/min, 在室温下进行测试。试验装置如图5所示。

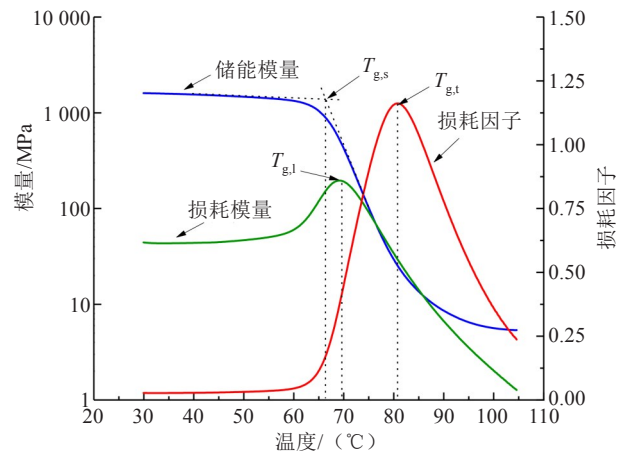


图3 DMA玻璃化转变温度定义

Fig. 3 Definition of glass transition temperature in DMA

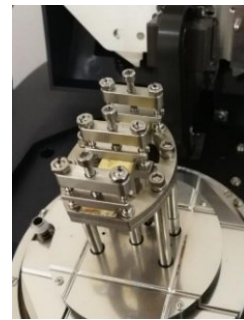


图4 动态力学分析

Fig. 4 Analysis of dynamic mechanical

CFRP-钢双搭接试件拉伸剪切试验采用300 kN微机控制电子万能试验机, 采用位移控制加载, 其加载速率为0.3 mm/min, 在室温下进行测试。采用视频引伸计获取CFRP板表面应变数据。试验前, 先将CFRP板表面均匀地喷上白色哑光漆, 用黑划分好标距分段线(分段线位置如图2所示)。试验装置和试件如图6所示。



图5 拉伸性能测试

Fig. 5 Test of tensile property



图6 CFRP-钢双搭接试件拉伸剪切性能试验

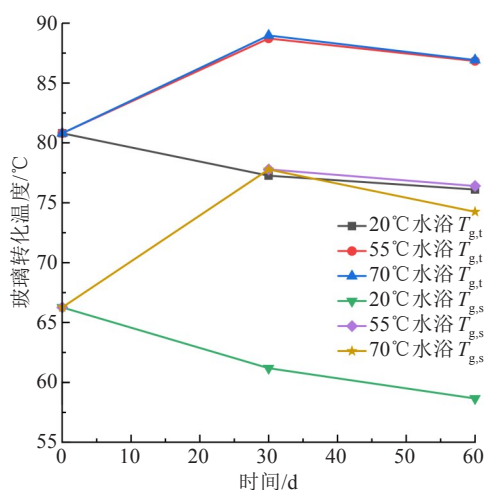
Fig. 6 Tensile-shear test of CFRP- steel double lap specimen

## 2 试验结果与分析

### 2.1 水浴对胶黏剂动态力学性能的影响

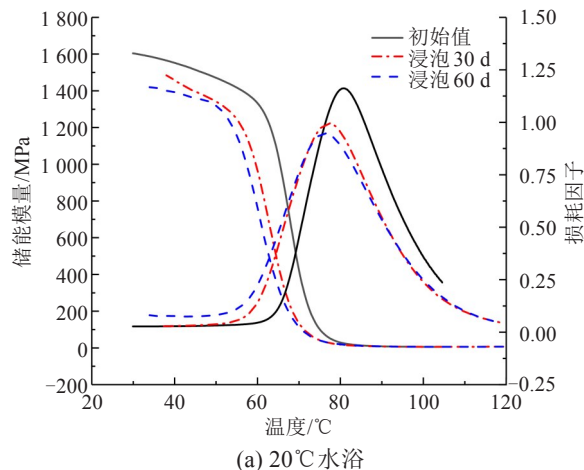
参照相关规范及文献[15-16]中的储能模量玻璃化转变温度  $T_{g,s}$  和损耗因子玻璃化转变温度  $T_{g,t}$  进行分析。

胶黏剂玻璃化转变温度演化规律如图7所示。从图7可以看出，在20℃水浴下，胶黏剂的玻璃化转变温度随浸泡时间的增加而下降。在55℃与70℃水浴下，胶黏剂玻璃化转变温度在浸泡30 d后出现较大幅上升。55℃水浴后， $T_{g,s}$ 、 $T_{g,t}$  分别提高11.5℃、7.9℃；70℃水浴后， $T_{g,s}$ 、 $T_{g,t}$  分别提高11.5℃、8.1℃。浸泡60 d的转变温度较浸泡30 d的小，这是由于胶黏剂采用室温固化，高温水浴使胶黏剂发生固化后，增加分子间的交联度，使胶黏剂的玻璃化转变温度升高。

图7 玻璃化转变温度  $T_{g,s}$ 、 $T_{g,t}$ Fig. 7 Glass transition temperature  $T_{g,s}$ 、 $T_{g,t}$ 

不同浸泡温度下，胶黏剂储能模量和损耗因子的演化如图8所示。从图8中可以看出，经20、55、70℃浸泡后，胶黏剂的储能模量值出现了不同程度的下降。在20、55、70℃水浴浸泡30 d后，35℃时对应的储能模量值较未浸泡试件分别下降了6.2%、12.3%、14.8%。在20、55、70℃水浴浸泡60 d后，35℃时对应的储能模量值较未浸泡试件分别下降了10.8%、9.9%、28.5%。70℃的水浴温度已超过胶黏剂的玻璃化转变温度  $T_{g,s}$ 。表明：超过胶黏剂初始  $T_{g,s}$  温度的使用环境，会加速胶黏剂老化。

损耗因子曲线的峰高和形状出现了不同的变化。在20℃水浴浸泡后，曲线峰高较对照值下降较小，形状也与对照试件的曲线类似。而在温度为55℃与70℃水浴浸泡后，随着时间的增加，曲线的峰值迅速降低，曲线在浸泡1个月后期趋于平稳，曲线形状出现了双峰。曲线双峰出现的最大可能原因是DMA试验过程中，随温度升高产生了烘干作用，导致试样中大量吸收水被释放<sup>[17]</sup>。



(a) 20℃水浴



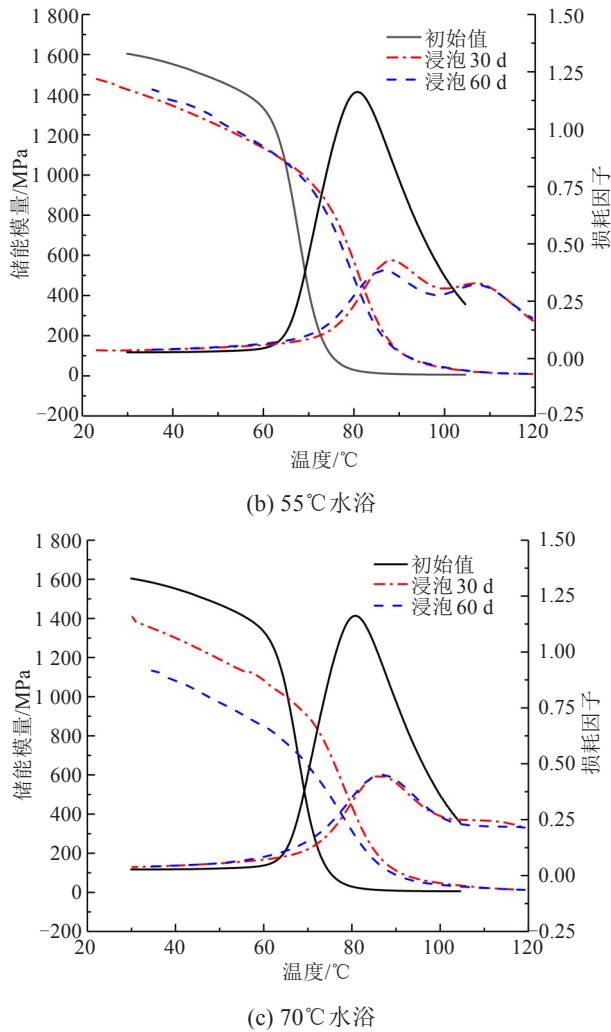


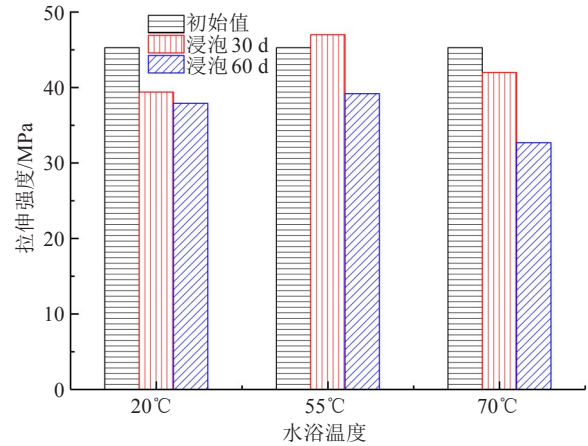
图8 胶黏剂储能模量与损耗因子的演化

Fig. 8 Evolution of storage modulus and loss factor of adhesive

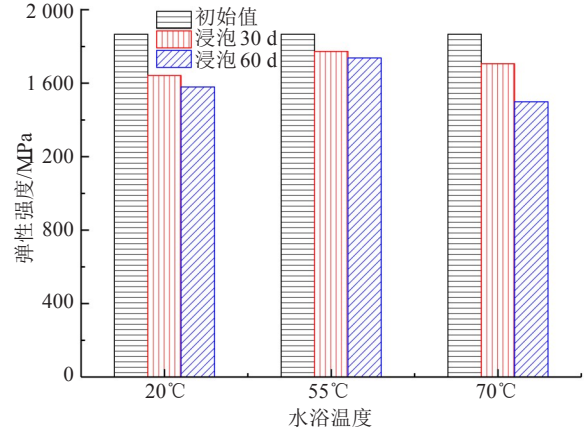
## 2.2 水浴对胶黏剂拉伸性能的影响

胶黏剂拉伸强度与模量的演化规律如图9所示。胶黏剂在20℃水浴环境下,浸泡30、60 d后拉伸强度分别下降12.98%、16.30%。胶黏剂在55℃水浴环境下,在浸泡30 d后拉伸强度出现小幅上升,浸泡60 d后下降13.4%。在70℃水浴环境下,胶黏剂拉伸强度在浸泡30、60 d后分别下降7.2%、27.8%。表明:浸泡1个月内,由于后固化作用,分子间的作用力增大,胶黏剂强度变化较小,但随着持续浸泡时间的增加,胶黏剂中水分子浓度达到一定值后,其分子间作用力下降程度大于后固化引起的分子间作用力增加程度,特别是在超过初始 $T_{gs}$ 浸泡温度时,强度下降较大。弹性模量随着浸泡时间增加,每种水浴温度下均呈下降趋势。在70℃水浴环境浸泡2个月后,下降率

为19.7%,与DMA测试中储存模量下降趋势吻合。



(a) 水浴浸泡后的拉伸强度变化



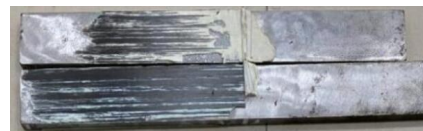
(b) 水浴浸泡后的弹性模量变化

图9 胶黏剂拉伸强度与弹模演化

Fig. 9 Evolution of tensile strength and elastic modulus of adhesive

## 2.3 水浴对CFRP-钢接头力学性能的影响

CFRP-钢接头破坏模式如图10所示。CFRP-钢胶接试件常见破坏有:①CFRP与胶层界面破坏;②钢板与胶层界面破坏;③CFRP板层离;④胶层内聚破坏<sup>[9]</sup>。经老化后,各试件的破坏形式如图10所示,经20℃水浴浸泡30 d后,破坏形式与对照组的破坏形式较为相似,均以CFRP层间剥离破坏为主。55℃与70℃水浴浸泡30 d后的破坏模式大都为CFRP板少量层离与钢/胶层界面的混合破坏形式。表明:水浴温度升高,会使胶层与CFRP板、胶层与钢板之间界面的黏结强度降低。



(a) 对照组

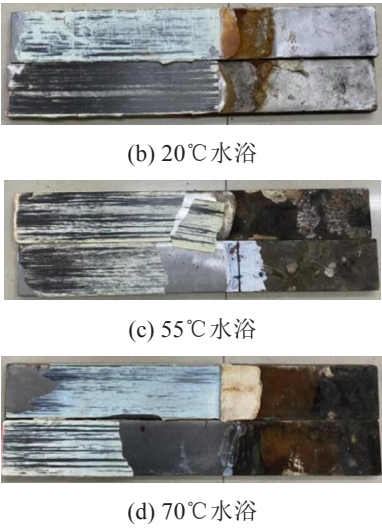


图 10 CFRP-钢接头破坏模式  
Fig. 10 Failure mode of CFRP- steel joint

经过 30 d 不同温度的水浴浸泡后, 试件在加载过程中的典型荷载-位移曲线如图 11 所示。与初始值相比, 经过浸泡老化后, 试件的荷载-位移曲线由非线性变为线性, 延性下降较大。

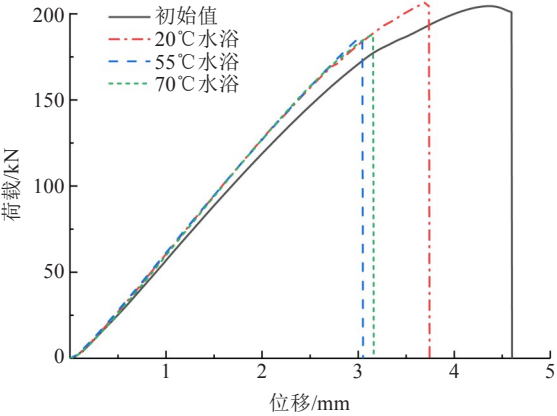


图 11 CFRP-钢接头荷载位移曲线  
Fig. 11 Load displacement curve of CFRP- steel joint

CFRP-钢双搭接接头拉伸剪切试验结果见表 2, 经 20、55、70 °C 水浴浸泡 30 d 的 CFRP-钢搭接试件的平均极限荷载较未浸泡的分别下降了 2.13%、8.13%、11.83%, 平均极限位移分别下降了 22.68%、31.28%、32.82%。表明: 经 20 °C 水浴浸泡后, 其极限承载能力变化较小, 主要降低了接头的延性。而在 55 °C 与 70 °C 水浴浸泡后, 接头的延性随极限承载力的降低进一步下降。

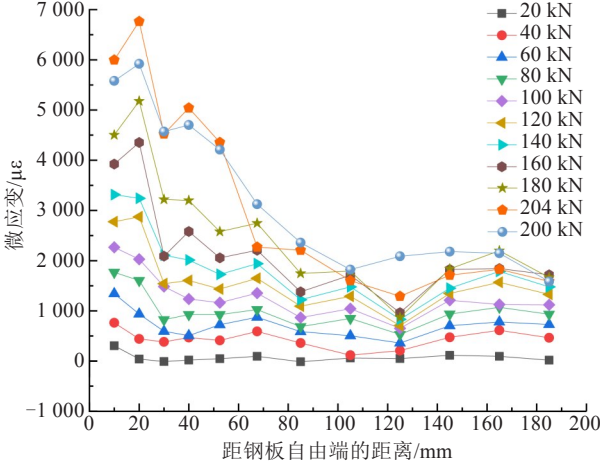
CFRP-钢接头强度的退化与胶黏剂的拉伸强度的退化规律存在较大区别。胶黏剂胶体在 20 °C 水浴老化 30 d 后, 拉伸强度下降程度较其他两种温度下下降的快, 而 CFRP-钢接头强度的下降规律与其相反, 水浴温度越高强度下降越快。表明:

CFRP-钢胶接接头强度的下降与胶黏剂胶体强度的退化关系较小, 主要归因于湿热老化降低了 CFRP 板/胶层界面与钢/胶层界面的强度。

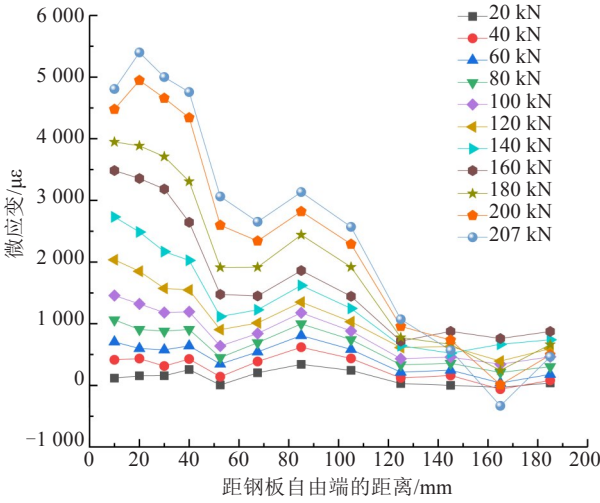
表 2 CFRP-钢双搭接试件试验结果  
Table 2 Test result of CFRP-steel double lap specimen

水浴 老化	平均极限荷载/ kN	平均极限位移/ mm	平均剪切强度/ MPa
初始值	204.70	4.54	10.24
20 °C 水浴 30 d	200.32	3.51	10.02
55 °C 水浴 30 d	188.04	3.12	9.40
70 °C 水浴 30 d	180.48	3.05	9.03

各级荷载下 CFRP 板表面应变分布如图 12 所示 (图中微应变值为视频引伸计每标距段平均微应变值, 取每标距段中点表示)。从图 12 可以看出, 在不同的老化环境下, 应变大致呈指数型分布, 靠近钢板自由端的应变值较大。对照组的微应变峰值为 6 750  $\mu\epsilon$ , 经过 20、55、70 °C 3 种不同温度水浴老化后微应变值峰值分别约为 5 400、4 200、4 750  $\mu\epsilon$ 。



(a) 初始值



(b) 20 °C 水浴

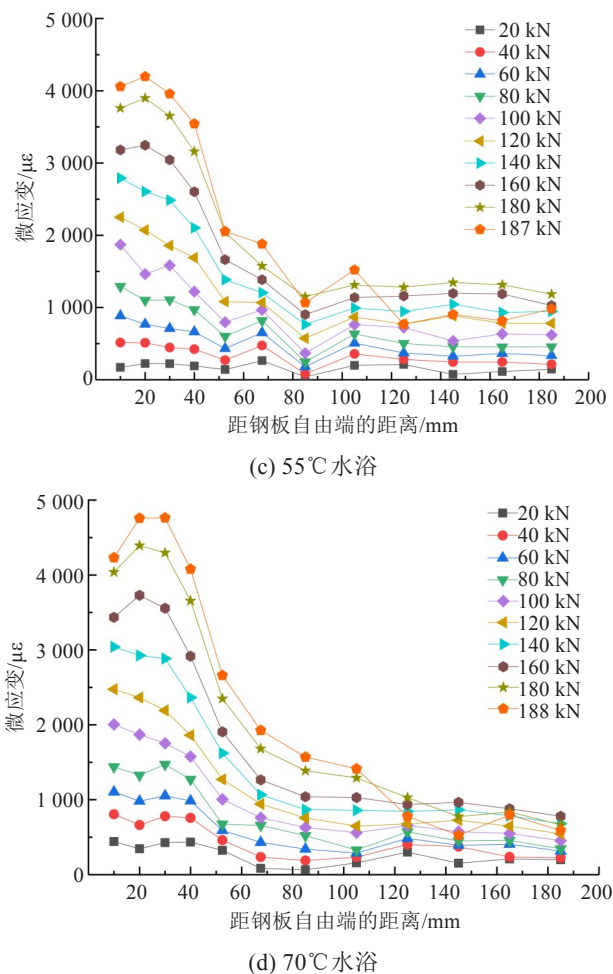


图12 CFRP板表面应变分布

Fig. 12 Surface strain distribution of CFRP plate

### 3 结论

1) 水浴温度对纳米材料增韧环氧胶黏剂的拉伸性能与动态力学性能影响较大。工程中, 根据初始玻璃化转变温度  $T_{g,s}$ , 合理确定使用环境。

2) 经 20、55、70 °C 水浴浸泡 30 d 后, CFRP-钢双搭接接头典型荷载-位移曲线由非线性变为线性, 其平均极限荷载较未浸泡试件的分别下降了 2.13%、8.13%、11.83%。CFRP 板表面应变均呈指数型分布, 靠近钢板自由端的应变值较大。随着浸泡温度升高, CFRP 板表面微应变峰值下降。

3) CFRP-钢双搭接接头在不同水浴温度老化后, 强度退化规律与胶黏剂胶体拉伸强度的退化规律存在较大区别。CFRP-钢双搭接接头强度的退化, 主要归因于湿热老化降低了 CFRP 板/胶层界面与钢/胶层界面的强度, 与胶黏剂自身强度退化的关系较小。

### 参考文献(References):

- [1] 张清华, 卜一之, 李乔. 正交异性钢桥面板疲劳问题的研究进展[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 14-30, 39. (ZHANG Qinghua, BU Yizhi, LI Qiao. Review on fatigue problems of orthotropic steel bridge deck[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 14-30, 39. (in Chinese))
- [2] 李游, 李传习, 陈卓异, 等. 基于监测数据的钢箱梁 U 肋细节疲劳可靠性分析[J]. 工程力学, 2020, 37(2): 111-123. (LI You, LI Chuanxi, CHEN Zhuoyi, et al. Fatigue reliability analysis of u-rib detail of steel box girder based on monitoring data[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(2): 111-123. (in Chinese))
- [3] KAMRUZZAMAN M, JUMAATM Z, RAMLI SULONG N H, et al. A review on strengthening steel beams using FRP under fatigue[J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014: 702537.
- [4] ZHAO X L, ZHANG L. State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures[J]. Engineering Structures, 2007, 29(8): 1808-1823.
- [5] 李传习, 柯璐, 陈卓异, 等. CFRP-钢界面黏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 study and numerical simulation for bond behavior of interface between CFRP and steel[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(12): 3534-3546. (in Chinese))
- [6] HESHMATI M, HAGHANI R, Al-Emrani M. Environmental durability of adhesively bonded FRP/steel joints in civil engineering applications: State of the art[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 81: 259-275.
- [7] 李传习, 李游, 高有为, 等. 纳米  $\text{SiO}_2$  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[J]. 复合材料学报, 2020, 37(10): 2619-2635. (LI Chuanxi, LI You, GAO Youwei, et al. Effect of nano- $\text{SiO}_2$  mass fraction on the interface performance of glued carbon fiber reinforced polymer composite-steel specimen[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(10): 2619-2635. (in Chinese))
- [8] SOUSA J M, CORREIA J R, CABRAL-FONSECA S. Some permanent effects of hygrothermal and outdoor ageing on a structural polyurethane adhesive used in civil engineering applications[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018, 84: 406-419.
- [9] 李传习, 罗南海. 高温对 CFRP 板/钢界面力学性能的影响



- 响[J]. 交通科学与工程, 2019,35(4):34-39. (LI Chuanxi, LUO Nanhai. Effect of high temperature on mechanical properties of the interface between CFRP laminate and steel[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019,35(4):34-39.(in Chinese))
- [10] NGUYEN T C, BAI Y, ZHAO X L, et al. Durability of steel/CFRP double strap joints exposed to sea water, cyclic temperature and humidity[J]. Composite Structures, 2012,94(5):1834-1845.
- [11] HESHMATI M, HAGHANI R, AI-EMRANI M. Effects of moisture on the long-term performance of adhesively bonded FRP/steel joints used in bridges[J]. Composites Part B: Engineering, 2016,92:447-462.
- [12] 罗南海. 胶膜连接CFRP板/钢界面力学性能试验研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2019. (LUO Nanhai. Study on mechanical performance of interface between CFRP laminate and steel connected by the film adhesive[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019. (in Chinese))
- [13] DAWOOD M, RIZKALLA S. Environmental durability of a CFRP system for strengthening steel structures[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(9): 1682-1689.
- [14] 过梅丽. 高聚物与复合材料的动态力学热分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002. (GUO Meili. Dynamic mechanical thermal analysis of high polymer and the composites [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002. (in Chinese))
- [15] TEMPERATURE G T. Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperature by[J]. Astm, 2011.
- [16] 洪斌. 聚氨酯基CFRP拉挤板材的耐水碱盐性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018. (HONG Bin. Study on the resistance to water, alkali and salt solutions of pultruded polyurethane-based CFRP plates[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese))
- [17] XIAN G J, KARBHARI V M. DMTA based investigation of hygrothermal ageing of an epoxy system used in rehabilitation[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2007,104(2):1084-1094.

(上接第24页)

- [7] 赵伟. 大厚度水泥碎石施工关键技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2007. (ZHAO Wei. A research on the key construction technique of large and thick cement stabilized aggregate[D]. Xi'an: Changan University, 2007. (in Chinese))
- [8] 李选文. 大厚度水泥稳定碎石基层施工标准化研究[D]. 西安: 长安大学, 2016. (LI Xuanwen. Research on the standard of construction of entirety large depth cement stabilized macadam[D]. Xi'an: Changan University, 2016. (in Chinese))
- [9] 田耀刚, 石帅锋, 李炜光. 整体大厚度水泥稳定碎石基层力学性能影响研究[J]. 公路, 2014, 59(6): 7-11. (TIAN Yaogang, SHI Shuaifeng, LI Weiguang. Study of the mechanical properties for entirety large thickness cement stabilized macadam base[J]. Highway, 2014, 59(6): 7-11. (in Chinese))
- [10] 田耀刚, 石帅锋, 刘芳, 等. 整体大厚度水泥稳定碎石基层耐久性研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2015, 34(3): 420-425. (TIAN Yaogang, SHI Shuaifeng, LIU Fang, et al. Study on durability of entirety large thickness cement stabilized macadam[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2015, 34(3): 420-425. (in Chinese))
- [11] 孟勇军, 蒋允田, 陆宏新, 等. 水泥稳定碎石基层全厚式摊铺碾压施工工艺研究[J]. 四川建材, 2015, 41(6): 185-187. (MENG Yongjun, JIANG Yuntian, LU Hongxin, et al. Construction technology research on paving compaction of cement stabilized macadam in large thickness[J]. Sichuan Building Materials, 2015, 41(6): 185-187. (in Chinese))
- [12] 蒋允田. 全厚式高性能水泥稳定碎石基层技术研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016. (JIANG Yuntian. Technology research of full-depth and high performance cement stabilized gravel base[D]. Nanning: Guangxi University, 2016. (in Chinese))