

DOI:10.11918/202401020

冻融和高温作用下 CFRP 布粘贴页岩砖黏结性能变化

王作虎,王 博,陈振鹏,张雨彤,王春月

(北京建筑大学 土木与交通工程学院,北京 102627)

摘 要:为研究冻融和高温作用下碳纤维增强塑料布(carbon fiber reinforced plastic sheet,简称 CFRP 布)粘贴页岩砖黏结性能的变化规律,对冻融环境、高温(60 ℃)环境、冻融和高温环境循环作用下,页岩砖、CFRP 布和环氧树脂胶的材料性能进行测试,并对 CFRP 布粘贴页岩砖单面剪切性能的变化规律进行试验研究。结果表明:页岩砖、CFRP 布和环氧树脂在冻融和高温循环作用下的材料性能受到较大影响,经历 3 次大循环作用后,页岩砖的抗压强度降低了 31.62%,CFRP 布的抗拉强度和弹性模量分别下降了 44.38%和 42.28%,环氧树脂的抗拉强度和弹性模量分别下降了 32.45%和 35.36%;冻融和高温循环作用对 CFRP 布粘贴页岩砖的单面剪切性能影响最明显,其次是单独冻融循环作用的影响,单独高温的影响最小。给出不同侵蚀环境下 CFRP 布粘贴页岩砖的单面剪切承载力计算公式,可以准确地计算不同环境下 CFRP 布粘贴页岩砖的单面剪切承载力。

关键词:高温;冻融循环;界面剥离承载力;页岩砖;碳纤维增强塑料布

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)02-0164-07

Variation of freeze-thaw and high temperature on bonding performance of CFRP sheet bonded shale brick

WANG Zuohu, WANG Bo, CHEN Zhenpeng, ZHANG Yutong, WANG Chunyue

(School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102627, China)

Abstract: In order to study the variation in bonding performance of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) sheet bonded shale bricks under freeze-thaw and high-temperature conditions, the material properties of shale bricks, CFRP sheet, and epoxy resin adhesive were tested under individual freeze-thaw environments, high-temperature (60 ℃) environments, freeze-thaw and high-temperature cycling environments. The single shear experiment was also conducted to explore the effect of bonding performance of CFRP sheet bonded shale bricks under different conditions. The test results show that the material properties of shale bricks, CFRP sheet, and epoxy resin are significantly affected by the cycles of freeze-thaw and high-temperature conditions. After three major cycles, the compressive strength of shale bricks decreased by 31.62%, the tensile strength and elastic modulus of CFRP sheet decreased by 44.38% and 42.28%, respectively. The tensile strength and elastic modulus of epoxy resin decreased by 32.45% and 35.36%, respectively. The freeze-thaw and high-temperature cycling effects have the most significant effect on the single shear performance of CFRP sheet bonded shale bricks, followed by the effect of freeze-thaw, and the effect of high-temperature being the least. The proposed calculation formula can accurately calculate the single shear bearing capacity of CFRP sheet bonded shale bricks under different environments.

Keywords: high-temperature; freeze-thaw cycle; interface peeling bearing capacity; shale brick; CFRP sheet

碳纤维增强塑料布(carbon fiber reinforced plastic sheet,简称 CFRP 布)具有强度高、质量轻和耐久性好的特点,是目前广泛应用于实际加固工程的一种复合材料。CFRP 布的加固效果除了自身的材料特性和施工工艺外,还与加固工程所处的环境有很大关系,如中国北方地区的冻融和高温的恶劣环境会导致界面黏结性能的下降^[1-2]。CFRP 布加

固砌体结构作为 GB 50702《砌体结构加固设计规范》推荐的一种方法,有必要对 CFRP 布粘贴砌体结构界面黏结性能的耐久性开展研究。于峰等^[1]将 CFRP 布分别放在室温环境、碱溶液和盐溶液的环境中,对其材料性能进行了研究,发现碱溶液和盐溶液对 CFRP 布的抗拉性能影响较小。Cao 等^[2]将 CFRP 布放置在 16~200 ℃的高温中,随后进行材

收稿日期: 2024-01-08;录用日期: 2024-03-13;网络首发日期: 2024-07-03

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240702.1240.002>

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0701104);国家自然科学基金(51421005,51878028)

作者简介: 王作虎(1979—),博士,副教授

通信作者: 王 博, wangbo2000610@163.com

料性能试验,发现高温环境对 CFRP 布的抗拉性能有一定影响。郭春红等^[3]和 Kinloch 等^[4]发现潮湿环境能对环氧树脂的性能产生显著影响。任慧韬等^[5-6]对湿热条件下 CFRP 布与混凝土的界面黏结性能进行了试验,发现湿热环境会加速 CFRP 布与混凝土界面黏结性能的退化。Benzarti 等^[7]和 Mukhtar 等^[8]也对湿热环境下 CFRP 布粘贴混凝土的黏结强度进行了研究,发现水分子在界面孔隙中的扩散是导致黏结强度降低的重要因素。Karbhari 等^[9]、李趁趁等^[10]和任慧韬等^[11]都对纤维增强塑料(FRP)布与混凝土界面的抗冻融性能进行了研究,发现黏结强度随着冻融循环次数的增加而降低。

实际工程中,CFRP 片材的弹性模量相对加固结构较低,导致两者之间的协同工作性能相对较差。而且,粘贴层与加固结构的表面处理质量、施工工艺和使用环境等有很大关系,而关于 CFRP 片材加固结构耐久性方面的研究相对较少,限制了 CFRP 片材加固技术的应用。目前,针对 FRP 布与混凝土界面之间的耐久性已经开展了很多研究,但是对 FRP 布粘贴砌体耐久性的研究相对较少^[12-13],而且试验环境多为单一环境,考虑耦合工况的研究更少。室外加固结构会经历冬季的冰冻和夏季的高温交替作用,因此,开展冻融和高温作用对 CFRP 布粘贴砌块黏结性能影响的研究具有重要意义和工程参考价值。

1 试 验

根据课题组前期的研究成果^[12-13],发现使用环境中的高温(60℃)和冻融循环环境对 CFRP 布粘贴砖砌体黏结强度的影响较大,故进一步采用这两种环境交替作用对 CFRP 粘贴页岩砖的材料性能和黏结力学性能进行试验研究。

CFRP 布由北京丽都怡和复合材料有限公司生产,实测厚度 0.28 mm,实测弹性模量和抗拉强度分别为 178 869.00 MPa 和 1 713.45 MPa,粘贴胶采用配套的环氧树脂胶。试验环境采用先冻融 10 次,再高温(60℃)7 d 交替作用的方式,为 1 个大循环,如图 1 所示。再继续冻融 10 次,高温 7 d,为两个大循环。试验共进行 3 个大循环。

1.1 材料性能试验

CFRP 布、环氧树脂胶和页岩砖试件的制作分别按照对应规范^[14-16]进行,每种试验环境条件下,CFRP 布和环氧树脂胶的数量均为 5 个,页岩砖的数量为 3 个,试件尺寸如图 2 所示。

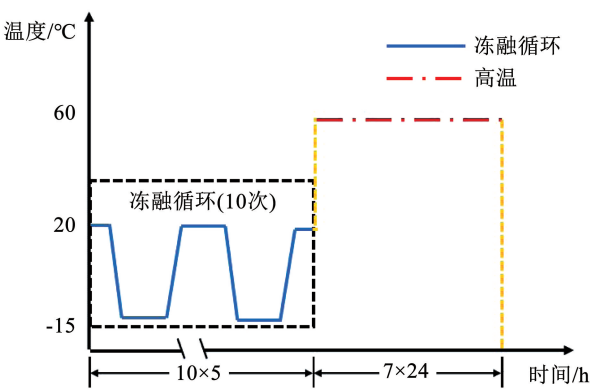


图 1 试验环境
Fig. 1 Test environment

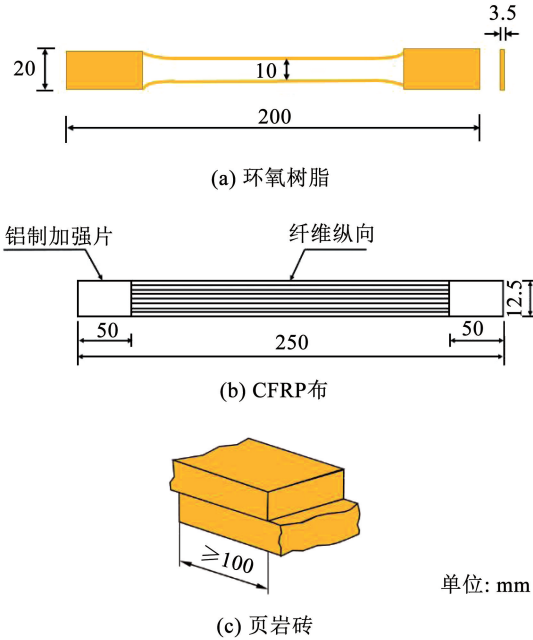


图 2 材料性能试件尺寸
Fig. 2 Specimen size of material test

1.2 单面剪切试验

单面剪切试验试件的尺寸如图 3 所示,试验装置如图 4 所示。试验采用位移加载控制,以 0.5 mm/min 恒定速率进行加载,直至试件被破坏。考虑到试验设备空间的大小,每种试验环境下 CFRP 布粘贴页岩砖的试件数量为 3 个。

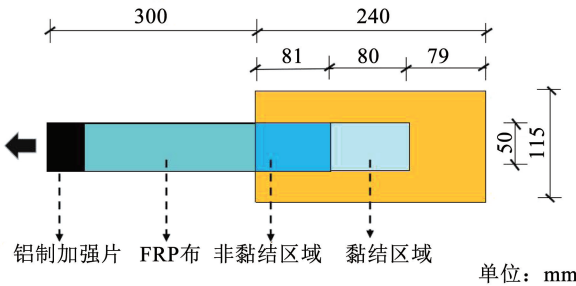


图 3 单面剪切试件尺寸
Fig. 3 Specimen size of single-lap shear bond



图 4 试验装置

Fig. 4 Test device

2 试验结果

2.1 试验环境对材料性能的影响

不同试验环境下页岩砖抗压强度的变化规律如图 5 所示。图中的工况 1、工况 2 和工况 3,在交替循环作用中依次对应大循环 1 次、2 次和 3 次;在高温环境中依次对应 60 ℃ 环境下的作用时间为 7、14、21 d;在冻融循环环境中依次对应冻融次数为 10、20、30,以下图中工况的含义同此。由图 5 可以看出,在高温环境下页岩砖抗压强度的变化较小,但是在另外两种环境作用下抗压强度降低 BU 较为明显,而且在交替循环作用下抗压强度的降低程度比冻融环境下的降低程度更明显。冻融循环 30 次和交替作用 3 次大循环后,页岩砖的抗压强度分别降低了 20.19% 和 31.62%。

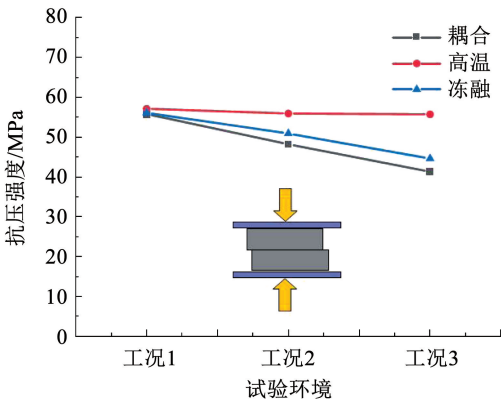


图 5 页岩砖的力学性能变化

Fig. 5 Changes of mechanical properties of shale brick

CFRP 布在不同环境条件下材料性能的变化如图 6 所示。可以看出,CFRP 布的弹性模量和抗拉强度均随着侵蚀时间的增加呈减小的趋势。在高温 (60 ℃) 21 d 后、冻融循环 30 次后以及 3 次大循环交替作用后,CFRP 布的抗拉强度分别降低了 20.13%、34.37% 和 44.38%,弹性模量分别降低了 20.64%、37.95% 和 42.28%。通过试验数据可知,交替循环作用对 CFRP 布材料性能的影响较大,冻融循环作用的影响次之,高温条件的影响最小。

环氧树脂胶在不同环境条件下材料性能的变化

如图 7 所示。

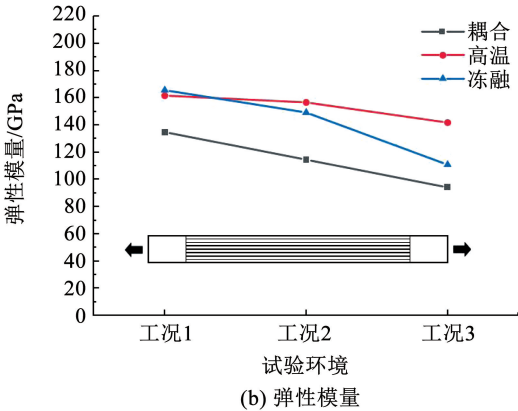
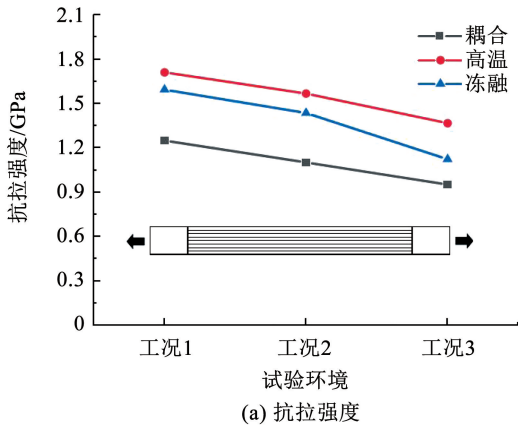


图 6 CFRP 布力学性能的变化

Fig. 6 Changes of mechanical properties CFRP sheet

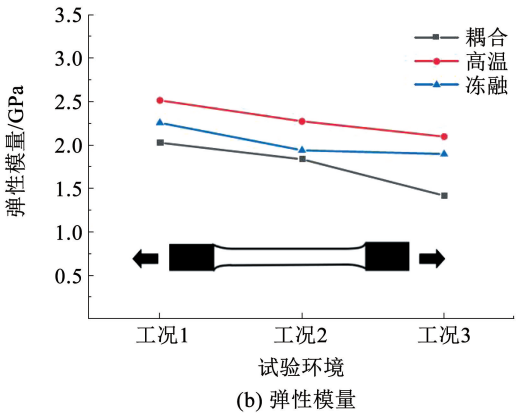
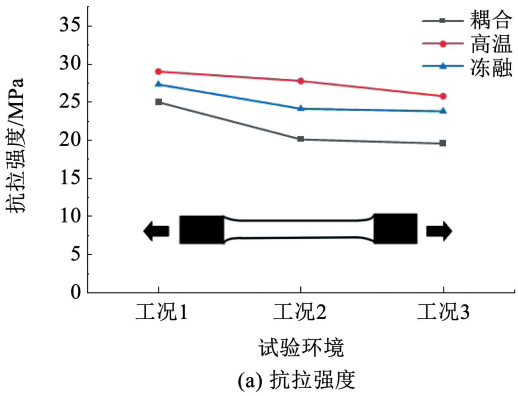


图 7 环氧树脂材料性能随侵蚀环境的变化

Fig. 7 Changes in properties of epoxy resin materials with erosion environment

由图7可以看出,高温条件对环氧树脂胶的影响相对较小,经过7 d 高温环境后,其抗拉强度和弹性模量仅下降 2.04% 和 0.96%,这是由于后固化效应的作用,在 60 ℃ 环境下环氧树脂胶可以继续固化。冻融环境和交替循环作用对环氧树脂胶材料性能的影响较大,而且,在交替循环作用下抗拉强度和弹性模量的下降值更大。在冻融循环 30 次后,环氧树脂胶的抗拉强度和弹性模量分别下降 21.00% 和 29.24%;交替 3 次大循环作用后,抗拉强度和弹性模量分别下降 32.45% 和 35.36%。

2.2 试验环境对单面剪切性能的影响

2.2.1 破坏过程和破坏形态

CFRP 布粘贴页岩砖试件的破坏形态如图8所示。可以看出,CFRP 布粘贴页岩砖的单面剪切破坏形式有界面剥离破坏(28 个)和 CFRP 布的断裂破坏(两个)。CFRP 布的断裂破坏属于个别现象,对照破坏试件分析其原因,一方面是后期固化 CFRP 布时局部刷胶不均匀导致,另一方面,在搬运过程中 CFRP 布边缘会产生部分滑丝现象,降低了 CFRP 布的宽度,从而导致了 CFRP 布的断裂。界面的剥离破坏属于正常设计的破坏形态,在加载初期,CFRP 布有轻微的响声,随着荷载不断增加,会持续发出“噼噼啪啪”的响声,直到突然“砰”的一声,CFRP 布被完全剥离。



(a) CFRP布断裂



(b) 剥离破坏

图8 典型破坏模式

Fig.8 Typical failure modes

2.2.2 荷载-滑移曲线

实测 CFRP 布粘贴页岩砖加载点端部的荷载-

滑移曲线如图9所示。荷载-滑移曲线在不同侵蚀环境下的形状基本都呈现二段式特征,在加载前期滑移值增长较快,荷载与滑移值基本呈抛物线关系;加载至 CFRP 布开始滑移后,滑移值快速增加,荷载增加缓慢,曲线呈水平直线形状。相对室温条件下的荷载-滑移曲线,在各种侵蚀环境下曲线的滑移值更大,极限荷载有不同程度的降低。尤其是冻融和高温循环作用的影响最明显,其次是冻融循环作用的影响,而高温的影响最小。在冻融和高温循环作用下,经历过 1 次、2 次和 3 次大循环作用后,剪切承载力分别降低了 17.11%、37.29% 和 43.81%,最大滑移值分别增加了 41.37%、50.94% 和 136.33%。

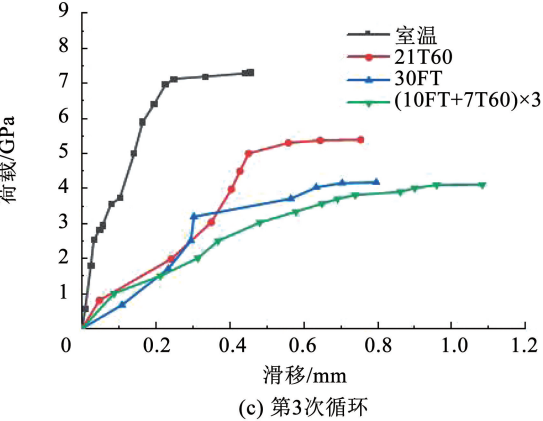
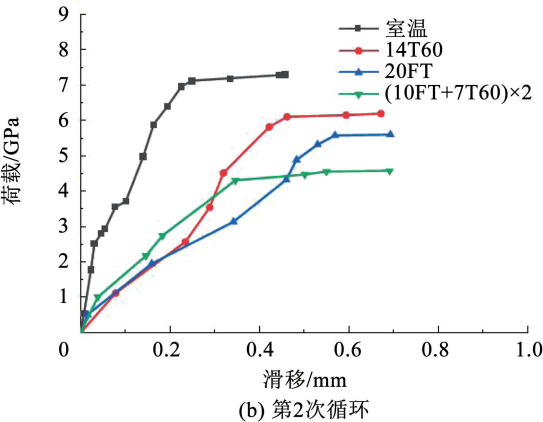
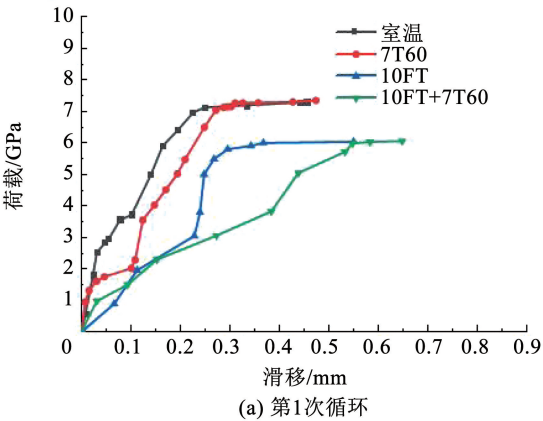


图9 荷载-滑移曲线

Fig.9 Loading-slip curve

2.2.3 剪应力-滑移曲线

试验得到距加载端 20 mm 处的剪应力-滑移曲线如图 10 所示。可以看出,CFRP 布粘贴页岩砖的界面剪应力-滑移曲线为两段式直线,加载开始阶段,剪应力随着滑移值的增加而增加,达到最大剪应力后,界面剪应力随着滑移值线性下降。在不同侵蚀环境下,剪应力的峰值不一样,其中,室温条件下的剪应力峰值最大,高温条件的剪应力峰值次之,而循环作用下的剪应力峰值最小。经历过 1 次、2 次和 3 次大循环作用后,CFRP 布粘贴页岩砖的剪应力峰值相对室温环境分别降低了 76.18%、63.28% 和 49.54%。

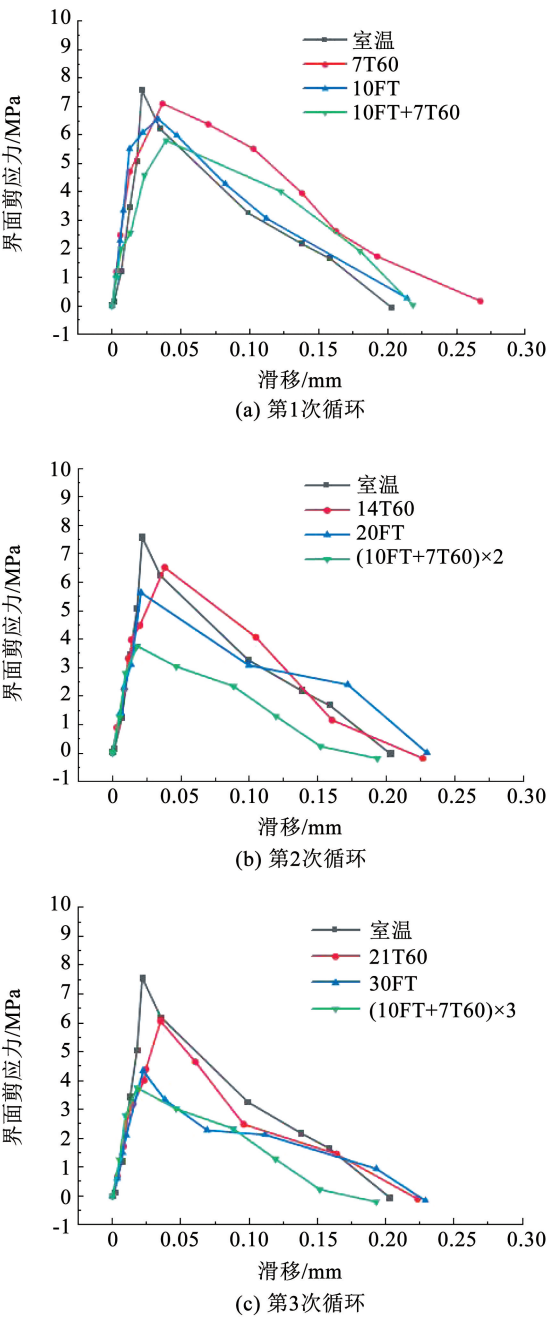


图 10 剪应力-滑移曲线

Fig. 10 Shear stress-slip curves

3 单面剪切承载力计算

不同侵蚀环境下材料的强度与侵蚀时间(或次数)一般符合一阶衰减指数函数^[17],假设冻融循环 N 次后 CFRP 布粘贴页岩砖的单面剪切承载力为 $P_u(N)$,经历过高温 T 时间后的单面剪切承载力为 $P_u(T)$,室温环境下的单面剪切承载力为 $P_u(0)$,根据一阶衰减指数函数有

$$\frac{P_u(N)}{P_u(0)} = a + be^{\frac{N}{k}} \quad (1)$$

$$\frac{P_u(T)}{P_u(0)} = c + de^{\frac{T}{k}} \quad (2)$$

式中 a, b, c, d 和 k 均为代求参数。根据试验数据进行拟合,结果如图 11 所示。

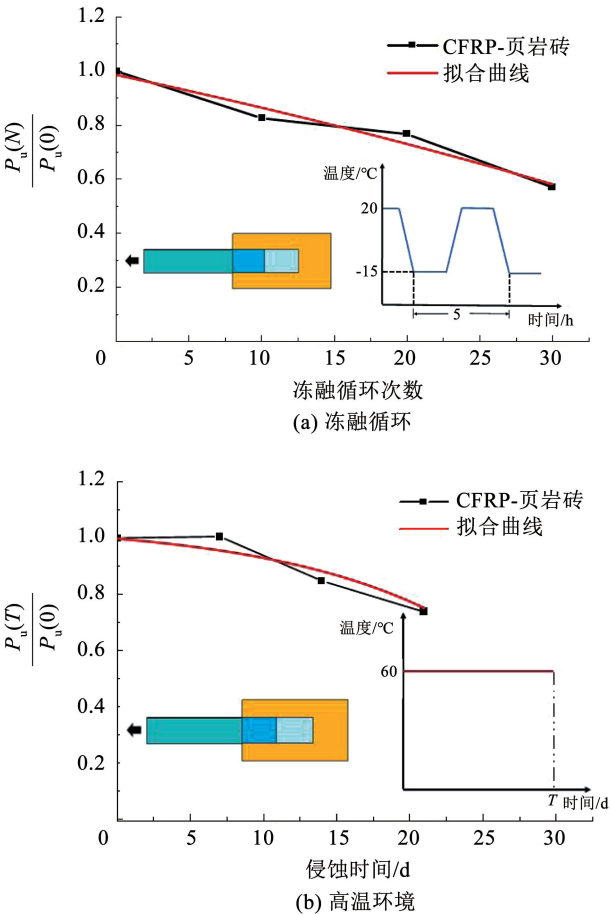


图 11 拟合分析

Fig. 11 Fit analysis

则可以分别得到冻融循环和高温环境下 CFRP 布粘贴页岩砖的单面剪切承载力公式:

$$\frac{P_u(N)}{P_u(0)} = 2.119 - 1.133e^{\frac{N}{98.269}} \quad (3)$$

$$\frac{P_u(T)}{P_u(0)} = 1.055 - 0.057e^{\frac{T}{12.235}} \quad (4)$$

单面剪切承载力计算公式是通过试验数据拟合

得到的,其适用条件为:1)环境温度为 CFRP 布的正常使用温度以内;2)冻融次数为 30 以内;3)为了保证界面破坏的模式,CFRP 布的粘贴长度应小于最小粘贴长度。

室温下 CFRP 粘贴页岩砖的单面剪切承载力 $P_u(0)$ 可参考规范 CNR-DT 200^[18] 进行计算。

参考耦合损伤演化方程^[19],可以根据冻融循环环境下的损伤变量 D_{FT} 和高温环境下的损伤变量 D_T ,得出两种环境循环作用下总的损伤变量 D :

$$D_{FT} = \frac{P_u(0) - P_u(N)}{P_u(0)}$$

(5)

$$D_T = \frac{P_u(0) - P_u(T)}{P_u(0)}$$

(6)

$$D = D_{FT} + D_T - D_{FT}D_T$$

(7)

代入可以得

$$D = 1 - \frac{P_u(N)P_u(T)}{P_u(0)^2}$$

(8)

根据损伤变量 D 的含义即可得

$$P_u = (1 - D)P_u(0) = \frac{P_u(N)P_u(T)}{P_u(0)}$$

(9)

利用式(3)、(4)和(9)可以计算出各种不同环境下 CFRP 布粘贴页岩砖的单面剪切承载力,计算结果与试验值的比较如表 1 所示。可以看出,计算值与试验值的误差基本都在 10% 左右,只有 3 个大循环后的计算误差为 17.82%,其原因可能是试验数据的离散性和材料的离散性。总体上计算值与试验值吻合较好,可以准确地计算不同环境下 CFRP 布粘贴页岩砖的单面剪切承载力。

表 1 单面剪切承载力计算

Tab. 1 Debonding bearing capacity of CFRP-shale brick

试验环境	单面剪切承载力试验值/N	单面剪切承载力计算值/N	误差/%
室温	7 309.95	7 741.50	5.90
10FT	6 038.61	6 788.60	12.42
20FT	5 605.49	5 733.63	2.29
30FT	4 170.15	4 565.65	9.48
7T60	7 351.53	7 400.14	0.66
14T60	6 198.13	6 795.25	9.63
21T60	5 389.21	5 723.35	6.20
10FT + 7T60	6 059.27	6 489.26	7.10
(10FT + 7T60) × 2	4 584.06	5 032.80	9.79
(10FT + 7T60) × 3	4 107.57	3 375.42	17.82

4 结 论

1)页岩砖在 60 ℃ 高温环境下,抗压强度降低

较小,但是在冻融、冻融和高温交替循环作用下降低较为明显,冻融循环 30 次和交替作用 3 次大循环后分别降低了 20.19% 和 31.62%;高温环境、冻融环境以及交替循环环境对 CFRP 布弹性模量和抗拉强度的影响程度逐渐增大,在高温 21 d、冻融循环 30 次以及 3 次大循环交替作用后,其抗拉强度分别降低了 20.13%、34.37% 和 44.38%;高温条件对环氧树脂胶的抗拉强度影响相对较小,而在冻融环境和交替循环作用下抗拉强度有明显的降低,冻融循环 30 次和交替 3 次大循环作用后,抗拉强度分别降低 21.00% 和 32.45%。

2)在各种侵蚀环境下,CFRP 布粘贴页岩砖的单面剪切破坏形式主要是界面剥离破坏;荷载-滑移曲线在不同侵蚀环境下的形状呈现出抛物线上升段加水平直线段的形状;界面剪应力-滑移曲线为两段式直线形状。

3)在各种侵蚀环境下,CFRP 布粘贴页岩砖的界面剪切强度有不同程度的降低,滑移值逐渐增大。冻融和高温循环作用下对界面剪切强度的影响最明显,剪切强度有着明显的降低,单独的冻融循环作用的影响较小,单独高温的影响最小。经历过 1 次、2 次和 3 次冻融和高温大循环作用后剪切承载力分别降低了 17.11%、37.29% 和 43.81%,最大滑移值分别增加了 41.37%、50.94% 和 136.33%。

4)给出的不同侵蚀环境下 CFRP 布粘贴页岩砖的单面剪切承载力计算公式,计算值与试验值吻合较好,可以准确地计算不同环境下 CFRP 布粘贴页岩砖的单面剪切承载力。

参考文献

[1]于峰,牛荻涛. FRP 材料耐久性试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2008(6): 22
YU Feng, NIU Ditao. Research on the durability test of FRP materials[J]. Glass Fiber Reinforced Plastics/Composite Material, 2008(6): 22

[2]CAO Shenghu, WU Zhishen, WANG Xin. Tensile properties of CFRP and hybrid FRP composites at elevated temperatures[J]. ASCE Journal of Composites in Construction, 2009, 43(4): 315. DOI: 10.1177/0021998308099224

[3]郭春红,杨勇新,岳清瑞,等. 浸渍树脂干湿交变试验[J]. 工业建筑, 2006(8): 16
GUO Chunhong, YANG Yongxin, YUE Qingrui, et al. Dry and wet mixing test of impregnated resin[J]. Industrial Architecture, 2006(8): 16. DOI: 10.3321/j. issn:1000-8993.2006.08.005

[4]KINLOCH A J, SHAW S J. Development in adhesives 2[M]. [S.l.]: Applied Science Publishing, 1989

[5]任慧娟,胡安妮,姚谦峰. 湿热环境对 FRP 加固混凝土结构耐久性的影响[J]. 哈尔滨工业大学报, 2006, 38(11): 1996
REN Huitao, HU Anni, YAO Qianfeng. Influence of humid

- environment on the durability of FRP[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(11): 1996. DOI: 10.3321/j.issn:0367-6234.2006.11.045
- [6] 任慧韬, 胡安妮, 姚谦峰. 纤维增强聚合物加固混凝土结构耐久性能研究[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(6): 847
REN Huitao, HU Anni, YAO Qianfeng. Study on durability of fiber reinforced polymer[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005, 45(6): 847. DOI: 10.3321/j.issn:1000-8608.2005.06.015
- [7] BENZARTI K, CHATAIGNER S, QUIERTANT M, et al. Accelerated ageing behaviour of the adhesive bond between concrete specimens and CFRP overlays[J]. Construction and Building Materials, 2010, 25(2): 523. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.08.003
- [8] MUKHTAR F M, PEIRIS A. FRP-concrete bond performance under accelerated hygrothermal conditions[J]. Construction and Building Materials, 2020, 270: 121403. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121403
- [9] KARBHARI V M, ENGINEER M, LI D A E. On the durability of composite rehabilitation schemes for concrete; use of a peel test[J]. Journal of Materials Science, 1997, 32(1): 147. DOI: 10.1023/A:1018591619404
- [10] 李趁趁, 黄承逵, 高丹盈. 特定环境下 FRP 与混凝土正拉粘结性能试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2006(增刊1): 77
LI Chenchen, HUANG Chengkui, GAO Danying. Experimental study on the bonding performance of FRP and concrete under specific environment[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2006(Sup. 1): 77. DOI: 10.3321/j.issn:1000-8608.2006.z1.014
- [11] 任慧韬, 胡安妮, 赵国藩. 纤维增强塑料与混凝土粘结抗冻融性能研究[J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(4): 495
REN Huitao, HU Anni, ZHAO Guofan. Research on the bonding properties of fiber reinforced plastic and concrete[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2003, 43(4): 495. DOI: 10.3321/j.issn:1000-8608.2003.04.025
- [12] 王作虎, 王江北, 申书洋, 等. 冻融循环对 FRP 片材-砌块界面粘结性能的影响[J]. 复合材料学报, 2022, 39(11): 5276
WANG Zuohu, WANG Jiangbei, SHEN Shuyang, et al. Effect of freeze-thaw cycles on bond properties of FRP sheet-brick[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(11): 5276. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclx.b.20220110.003
- [13] 王作虎, 高小亮, 王江北, 等. 温度对 FRP 布粘贴砖砌体力学性能的影响[J/OL]. 工程力学. (2023-08-10). <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.03.20230810.1710.008>
WANG Zuohu, GAO Xiaoliang, WANG Jiangbei, et al. Effect of temperature on mechanical properties of FRP cloth brick masonry[J/OL]. Engineering Mechanics. (2023-08-10). <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.03.20230810.1710.008>. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2023.03.0233
- [14] 中国国家标准化管理委员会. 纤维增强塑料拉伸性能试验方法: GB/T 1447—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005
Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method for the tensile properties of fiber-reinforced plastics: GB/T 1447—2005[S]. Beijing: China Standards Press, 2005
- [15] 中国国家标准化管理委员会. 纤维增强塑料性能试验方法总则: GB/T 1446—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005
Standardization Administration of the People's Republic of China. General principles of the performance test methods of fiber-reinforced plastics: GB/T 1446—2005[S]. Beijing: China Standards Press, 2005
- [16] 中国国家标准化管理委员会. 砌墙砖试验方法: GB/T 2542—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013
Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method for wall laying: GB/T 2542—2012[S]. Beijing: China Standards Press, 2013
- [17] GHIASSI B, LOURENCO P B, OLIVEIRA D V. Accelerated hygrothermal aging of bond in FRP-masonry systems[J]. Journal of Composites for Construction, 2015, 19(3): 04014051. DOI: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000506
- [18] ACI Committee 440. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures: CNR-DT 200 R1/2013[S]. Rome, Italy: CNF-Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, 2013
- [19] 张慧梅, 杨更社. 冻融与荷载耦合作用下岩石损伤模型的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 471
ZHANG Huimei, YANG Gengshe. Research on rock damage model between freezing-thawing and load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 471

(编辑 刘 彤)