复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
Engineering Village

冻融循环对FRP片材-砌块界面粘结性能的影响

王作虎 王江北 申书洋 陈礼

Effect of freeze-thaw cycles on bond properties of FRP sheet-brick

WANG Zuohu, WANG Jiangbei, SHEN Shuyang, CHEN Li

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220110.003

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冻融循环对CFRP-烧结粘土砖界面粘结性能影响
Effects of freeze-thaw cycles on interfacial bonding property of CFRP-sintered clay brick
复合材料学报. 2020, 37(9): 2294-2302 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200111.002

盐冻条件下水泥砂浆受风沙冲蚀磨损性能及损伤机制
Erosion-wear performance and mechanism of cement mortar subjected to freeze-thaw cycles in salts solution
复合材料学报. 2018, 35(1): 192-199 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170417.002

盐溶液干湿循环对CFRP-混凝土界面粘结性能的影响
Effect of wet and dry cycles in salt solution on the interfacial bonding property of CFRP-concrete
复合材料学报. 2018, 35(8): 2055-2064 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170829.003

海水浸泡对FRP筋-珊瑚混凝土粘结性能的影响
Effects of sea water soaking on the bonding properties of FRP bars-coral concrete
复合材料学报. 2018, 35(12): 3458-3465 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180211.001

恶劣环境下纤维增强聚合物片材拉伸性能
Tensile properties of fiber reinforced polymer sheet exposed to severe environment
复合材料学报. 2017, 34(7): 1496-1504 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161024.003

纳米碳纤维增强混凝土抗冻性能试验
Anti-freeze performance test of nano carbon fiber reinforced concrete
复合材料学报. 2019, 36(10): 2458-2468 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190510.002

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

第 39 卷 第 11 期 11 月 2022 年
Vol. 39 No. 11 Nov 2022

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20220110.003

冻融循环对 FRP 片材-砌块界面粘结性能的影响

分享本文

王作虎*[1]，王江北[1]，申书洋[2]，陈礼[1]

（1. 北京建筑大学 土木与交通工程学院，北京 100044；2. 宁波工程学院 机器人学院，宁波 315000）

摘 要：研究了冻融循环对纤维增强树脂复合材料 (FRP) 加固砌块界面粘结性能的影响，分别采用碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP) 片材和玻璃纤维增强树脂复合材料 (GFRP) 片材对烧结黏土砖和页岩砖进行了加固，通过试验研究了不同冻融次数条件下砖、砂浆、FRP 片材和树脂各种材料性能的变化及 FRP 片材与砌体间的正拉粘结强度和单面剪切强度的变化规律。研究结果表明，冻融循环对黏土砖、页岩砖、砂浆块、CFRP 片材、GFRP 片材和粘贴环氧树脂的力学性能产生了显著的影响，均随着冻融次数的增加而明显降低；FRP 片材与砖砌块界面间的正拉粘结强度和单面剪切强度随着冻融循环次数的增加而逐渐降低，经过 30 次冻融循环后 FRP 片材加固单砖的正拉粘结强度最大会降低 45.49%，单面剪切强度最大可降低 42.26%；FRP 片材的种类对不同冻融次数条件下 FRP 片材-砌体的正拉粘结强度几乎没有影响，但对单面剪切强度有一定的影响。

关键词：FRP 片材；砖块；冻融循环；粘结界面；耐久性

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2022)11-5275-12

Effect of freeze-thaw cycles on bond properties of FRP sheet-brick

WANG Zuohu*[1], WANG Jiangbei[1], SHEN Shuyang[2], CHEN Li[1]

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Institute of Robotics, Ningbo University of Technology, Ningbo 315000, China)

Abstract: The effect of freeze-thaw cycles on the interfacial bonding properties of fiber reinforced polymer (FRP) sheet reinforced blocks was studied. Two kinds of fiber sheets, carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheet and glass fiber reinforced polymer (GFRP) sheet, were used to strengthen clay brick and shale brick respectively. The tests of various material properties, pull-off bond and single-lap shear bond were carried out to study the effect of freeze-thaw times. The results show that the mechanical properties of clay brick, shale brick, mortar block, CFRP sheet, GFRP sheet and epoxy resin are seriously affected by freeze-thaw cycles, and all decrease significantly with the increase of freeze-thaw times. The pull-off bond strength and single-lap shear bond strength of FRP sheet and brick gradually decrease with the increase of freeze-thaw times. After 30 freeze-thaw cycles, the pull-off debonding force of FRP sheet and brick block is reduced by 45.49%, and the single-lap shear bond strength of FRP sheet and brick block is reduced by 42.26%. The type of FRP sheet has little effect on the pull-off bond strength under different freeze-thaw times, but has a certain effect on the single-lap shear bond strength.

Keywords: FRP sheet; brick; freeze-thaw cycle; bonding performance; durability

砌体结构由于取材方便、造价低，在我国村镇房屋建设中大量使用。但是由于孔隙率大、脆性强、抗震性能差，砌体结构更容易收到侵蚀环境的影响，因而砌体结构的维修与加固是政府“十四五”的工作目标之一。纤维增强树脂复合材料 (Fiber reinforced polymer，FRP) 片材在砌体结构

收稿日期：2021-11-15; **修回日期**：2021-12-31；**录用日期**：2022-01-01；**网络首发时间**：2022-01-11 08:55:47
网络首发地址：https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220110.003
基金项目：国家重点研发计划 (2016YFC0701104); 国家自然科学基金 (51421005; 51878028)
通信作者：王作虎, 博士, 副教授, 研究方向为钢筋混凝土结构及砌体结构加固 E-mail: wangzuohu@bucea.edu.cn
引用格式：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): 5275-5286.
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): 5275-5286(in Chinese).

加固中，具有施工方便和高强高效的优势，因而FRP与加固砌体间的粘贴性能和耐久性能一直是国内外研究的热点[1-4]。

相对于FRP片材与砌体界面粘结性能的丰富研究成果而言[3-4]，FRP片材-砌体界面耐久性的研究相对较少。Ghiassi等[5-6]、Sciolti等[7]、Tedeschi等[8]、Cardani等[9]、Maljaee等[10]研究学者对FRP片材-砌体在温湿条件、浸水条件、热老化条件下的界面粘结性能进行了研究，研究发现侵蚀环境对FRP片材加固砌块的正拉粘结强度和单面剪切强度都有一定的降低作用，尤其在浸水24周后正拉粘结强度最大可降低60%左右。勒文强等[11]和郭乐乐等[12]通过单面剪切试验研究了冻融循环对碳纤维增强树脂复合材料(CFRP)片材和黏土砖粘结性能的影响，并建立了粘结-滑移模型。别治明[13]通过冻融循环后的材性试验、核磁共振和电镜扫描等手段，对砌体的冻融损伤机制进行了分析。

目前国内外关于冻融循环条件下FRP片材与混凝土界面粘结性能的研究相对较多[14-19]，而关于冻融环境对FRP片材-砌体粘结性能影响的研究相对较少，尤其是对不同砌体种类和FRP片材种类的影响未见相关公开文献。FRP片材-砌体的粘结界面涉及到砌体、环氧树脂胶、砂浆和FRP片材四种材料及界面的相互作用，作用机制异常复杂。尤其是在侵蚀环境下会导致FRP片材容易产生脱粘破坏，影响加固效果。由于目前对于FRP片材与砌体结构界面的耐久性，诸多内容没有研究清楚，国内外规范对FRP片材和砌块界面的耐久性也都尚未有完善的技术条款，而冻融侵蚀是我国北方地区经常所处的环境条件，对FRP片材-砌体的界面粘结性能有着重要的影响，开展冻融循环对FRP片材加固砌体界面粘结性能影响的研究显得尤为迫切和重要。

本文利用正拉粘结强度试验和单面剪切试验对冻融条件下FRP片材-砌块的界面粘结性能进行了研究，并提出了界面粘结强度的劣化规律。

1 试验概况

为了研究FRP片材加固砌体在冻融循环作用下界面粘结性能的变化，分别进行了不同冻融循环次数条件下的材性试验、正拉粘结强度试验和单面剪切试验。砌块采用烧结黏土砖和页岩砖两种，FRP片材采用CFRP片材和玻璃纤维增强树脂复合材料(GFRP)片材。除FRP片材材性试验、树脂材性试验、CFRP片材-黏土单砖、GFRP片材-黏土单砖的正拉粘结强度试验和单面剪切试验的冻融循环次数为5次、10次和30次外，其他试验的冻融次数均为10次、20次和30次，快速冻融设备如图1所示。

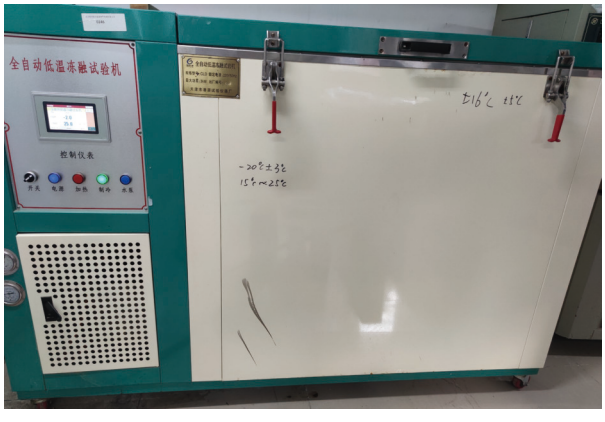


图1 快速冻融设备

Fig. 1 Rapid freezing and thawing equipment

砌筑砂浆采用金隅干混普通砌筑砂浆DM7.5，FRP片材和粘贴树脂采用北京丽都怡和复合材料有限公司生产的产品。CFRP片材和GFRP片材的厚度均为0.167 mm，常温下GFRP片材的实测抗拉强度为1 454.24 MPa，实测弹性模量为72 711.82 MPa；CFRP片材的实测抗拉强度为2 977.57 MPa，实测弹性模量为186 097.98 MPa。

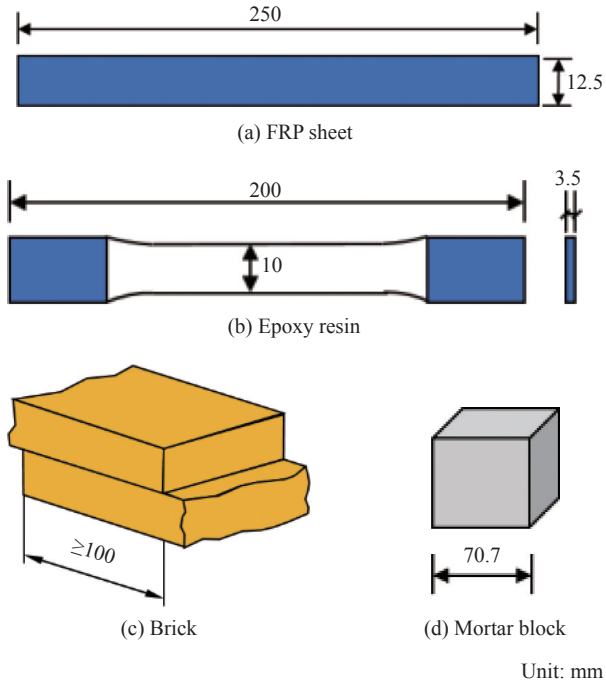
1.1 材性试验

环氧树脂和FRP片材试件的设计与制作参照《纤维增强塑料性能试验方法总则》(GB/T 1446—2005)[20]和《纤维增强塑料拉伸性能试验方法》(GB/T 1447—2005)[21]进行，砖试块和砂浆试块分别参考《砌墙砖试验方法》(GB/T 2542—2012)[22]和《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009)[23]，用来研究冻融循环对各种材料性能的影响。每种工况下除砂浆试块数量为3个外，其他试件的数量均为5个，各试件尺寸如图2所示。

测试材料抗拉性能的加载速率为2 mm/min，抗压性能的加载速度为5 kN/s，材性试验装置如图3所示。

1.2 正拉粘结强度试验

正拉粘结强度试验中FRP片材粘贴单砖和砖墙的面积均为40 mm×40 mm，砖墙的砂浆缝为10 mm，试件尺寸如图4所示。试验变化的主要参数包括冻融次数、砖的种类、FRP片材的种类和砂浆缝的影响。正拉粘结强度试验每种工况下



FRP—Fiber reinforced polymer

图 2 试件尺寸详图

Fig. 2 Specimens size details

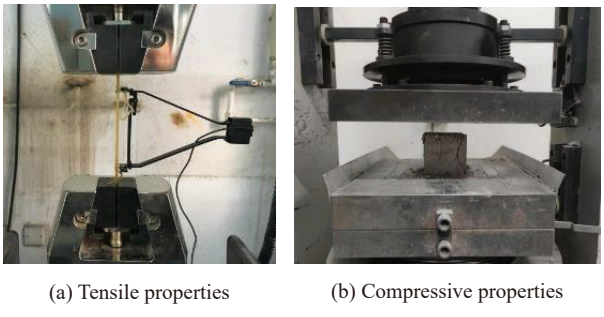


图 3 材性试验装置

Fig. 3 Test devices of material mechanical properties

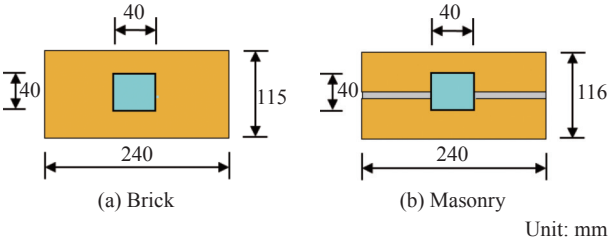


图 4 正拉粘结强度试验构件尺寸

Fig. 4 Specimen size details of pull-off strength

试件的数量均为 5 个。正拉粘结强度试验利用万能试验机进行加载，试验设备是美特斯工业系统(中国) 有限公司生产的 CMT4304 电子万能试验机，试验加载速度为 0.3 mm/min，试验装置如图 5 所示。

图 5 正拉试验装置

Fig. 5 Test device of pull-off strength

1.3 单面剪切试验

单面剪切试验 FRP 片材的粘贴面积均为 50 mm×80 mm(为了确保产生粘结界面破坏，粘接长度是根据预实验结果确定的)，加载端有未粘贴区域，尺寸如图 6 所示。

由于单层 GFRP 片材加固砌体都是发生了 GFRP 片材被拉断的破坏模式，未发生界面破坏模式，因此 GFRP 片材加固砌体单向剪切试件都采用了 2 层 GFRP 片材进行粘贴。试验的变化参数主要包括冻融次数、砖的种类、FRP 片材的种类和砂浆缝的影响。单砖单面剪切试验每种工况下试件数量均为 5 个，由于砖墙构件的尺寸较大，冻融箱空间有限，每种工况下砖墙试件只进行了 3 次试验。

单面剪切试验设备如图 7 所示。试验过程中要保证 FRP 片材的中心线始终与拉力机夹具中心轴线重合，在界面上部和下部各布置一个位移计，界面中心每隔 2 cm 布置一个应变片，加载速率为 0.5 mm/min。

2 试验结果与分析

2.1 原材料性能

不同冻融循环条件下砖砌体和砂浆试块的抗

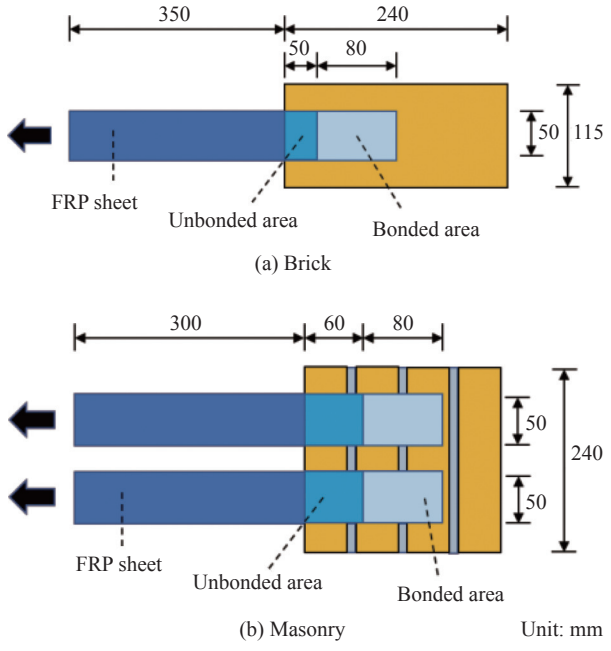


图 6　单面剪切试验试件尺寸详图

Fig. 6　Specimen size details of single-lap shear bond

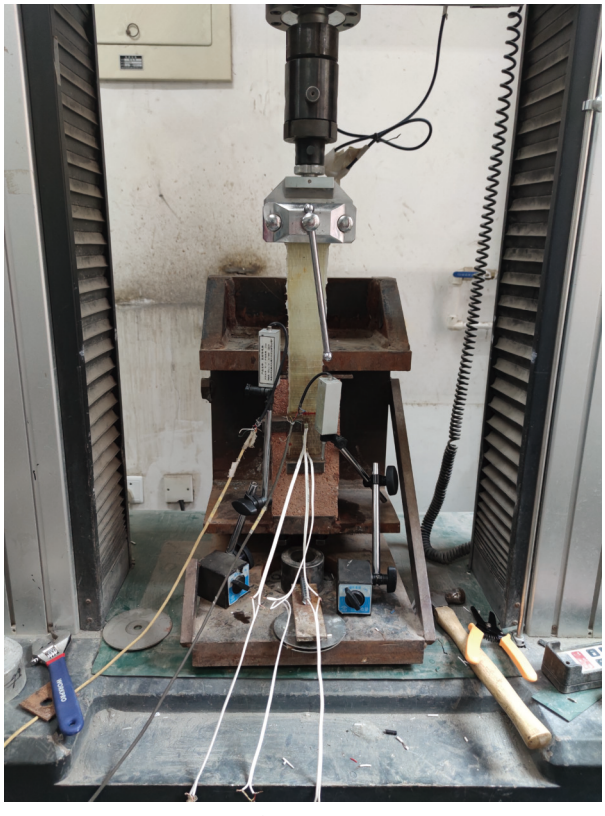


图 7　单面剪切试验装置

Fig. 7　Test device of single-lap shear bond

压强度变化规律如图 8 所示。可以看出，砖试块和砂浆试块的抗压强度受冻融循环次数的影响较大，随冻融次数增加，两者的抗压强度均逐渐降低。冻融循环 30 次后，黏土砖、页岩砖和砂浆试块的抗压强度的降低幅度分别为 23.94%、15.05% 和 27.03%。

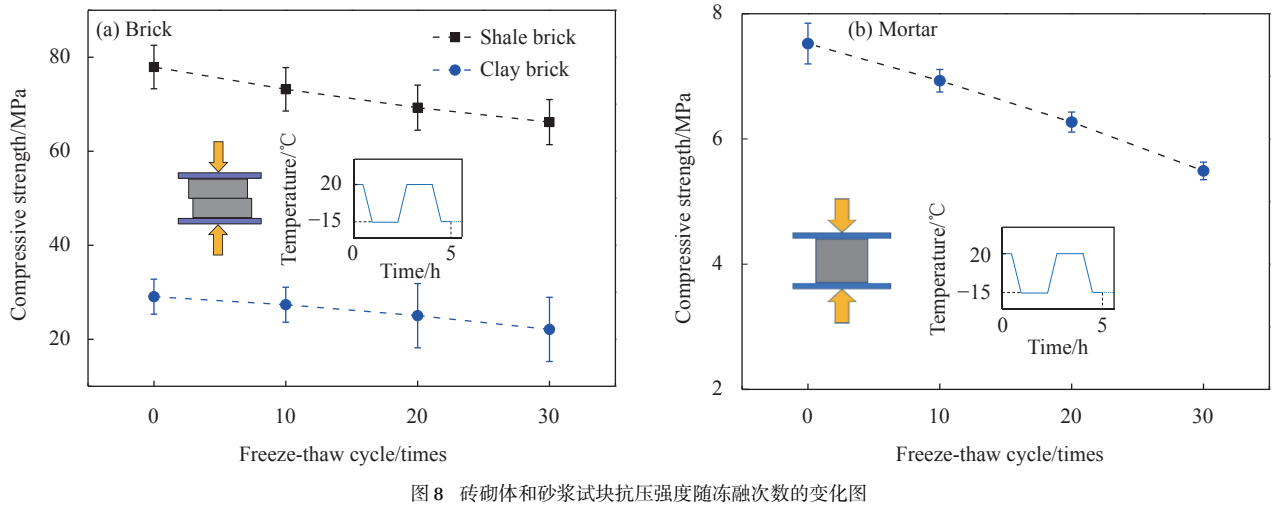
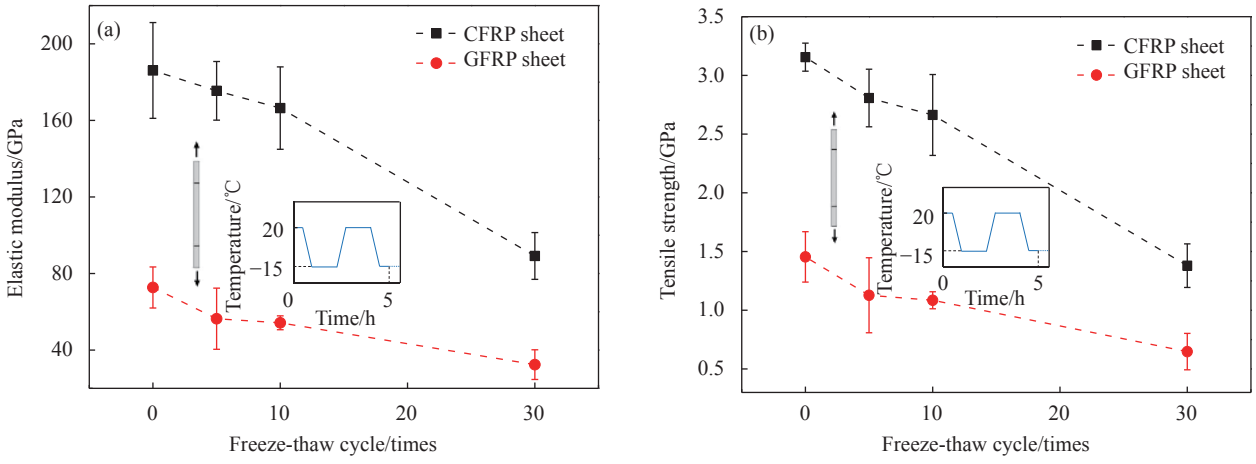


图 8　砖砌体和砂浆试块抗压强度随冻融次数的变化图

Fig. 8　Variation of compressive strength of brick and mortar with freeze-thaw times

FRP 片材和抗拉强度随冻融次数变化的结果如图 9 所示。可以看出，随冻融次数增加，CFRP 片材和 GFRP 片材的抗拉强度逐渐降低，经过 5 次、10 次和 30 次的冻融循环后，CFRP 片材的抗拉强度分别降低 5.71%、10.56% 和 48.94%，GFRP 片材的抗拉强度分别降低 18.59%、22.47% 和 49.31%。两种片材的力学性能都受到冻融循环的严重影响，而且 GFRP 片材的退化要比 CFRP 片材更严重，这是由于水中的氢氧负离子 (OH^-) 对玻璃纤维中的硅氧键 (Si—O) 有一定的侵蚀作用，



CFRP—Carbon fiber reinforced polymer; GFRP—Glass fiber reinforced polymer

图 9 冻融循环次数对纤维增强树脂复合材料 (FRP) 片材性能的影响

Fig. 9 Effect of freeze-thaw cycle times on properties of fiber reinforced polymer (FRP) sheet

对 GFRP 片材的影响更明显[24]，力学性能降低幅度也更大。

用于粘贴 FRP 片材的环氧树脂，其弹性模量和抗拉强度随冻融次数的变化如图 10 所示。可以看出，环氧树脂力学性能的降低主要发生在前 10 次冻融循环中，超过 10 次冻融循环后，性能降低程度较小。循环 5 次、10 次和 30 次，环氧树脂弹性模量的降低幅度分别为 15.07%、23.82% 和 25.73%，抗拉强度的降低幅度分别为 4.72%、14.53% 和 16.67%。

2.2 FRP 片材-砌块界面正拉粘结强度

2.2.1 破坏形态

FRP 片材-砌块正拉粘结强度试验典型的破坏模式如图 11 所示，均为拉拔金属块粘贴着砖屑被剥离下来，试验结果见表 1。可以看出，经过 30

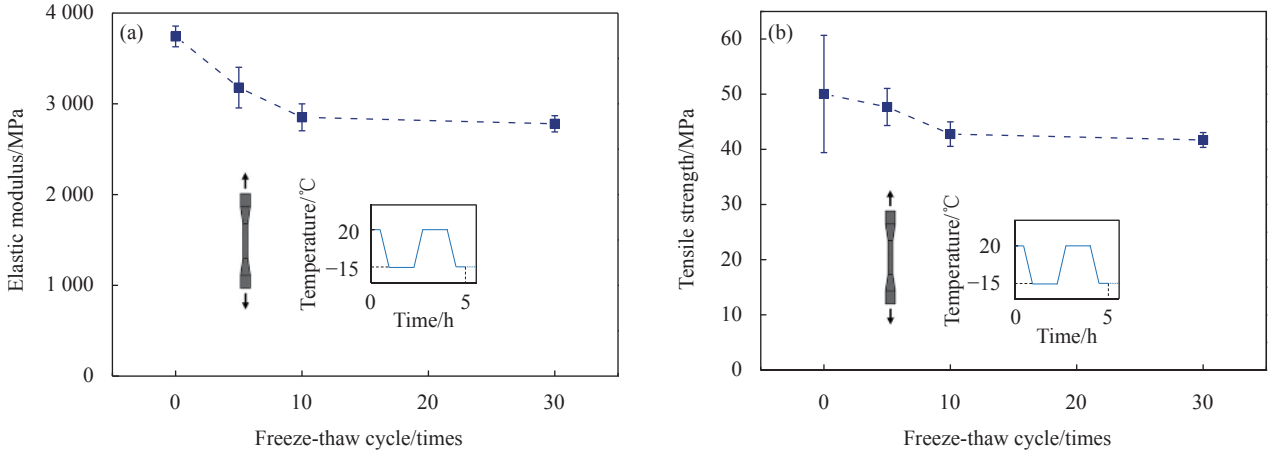


图 10 冻融循环次数对环氧树脂性能的影响

Fig. 10 Effect of freeze-thaw cycle times on properties of epoxy resin

(a) Clay brick (b) Shale brick (c) Clay masonry (d) Shale masonry

图 11 FRP 片材-砌块正拉粘结强度试验典型破坏模式

Fig. 11 Typical failure modes of FRP sheet-brick in pull-off test

表 1　FRP 片材-砌块正拉粘结强度试验结果

Table 1　Test results of pull-off strength of FRP sheet-brick and masory

Freeze-thaw time	FRP type	Block type	F_{pull}/N	Changing range/%	Block type	F_{pull}/N	Changing range/%
0	CFRP sheet	Clay brick	3 300.09	–	Clay masonry	2 954.31	–
5	CFRP sheet	Clay brick	2 834.76	14.10	–	–	–
10	CFRP sheet	Clay brick	2 609.42	20.93	Clay masonry	2 376.59	19.56
20	–	–	–	–	Clay masonry	2 305.46	21.96
30	CFRP sheet	Clay brick	2 362.86	28.40	Clay masonry	2 147.92	27.30
0	GFRP sheet	Clay brick	3 404.27	–	–	–	–
5	GFRP sheet	Clay brick	2 867.27	15.77	–	–	–
10	GFRP sheet	Clay brick	2 569.79	24.51	–	–	–
30	GFRP sheet	Clay brick	2 535.82	25.51	–	–	–
0	CFRP sheet	Shale brick	6 111.55	–	Shale masonry	5 674.67	–
10	CFRP sheet	Shale brick	6 089.77	0.36	Shale masonry	5 432.18	4.27
20	CFRP sheet	Shale brick	5 645.22	7.63	Shale masonry	5 321.77	6.22
30	CFRP sheet	Shale brick	4 180.50	31.60	Shale masonry	4 025.76	29.06
0	GFRP sheet	Shale brick	6 446.76	–	–	–	–
10	GFRP sheet	Shale brick	6 269.08	2.76	–	–	–
20	GFRP sheet	Shale brick	5 093.38	20.99	–	–	–
30	GFRP sheet	Shale brick	3 513.97	45.49	–	–	–

Note: F_{pull}—Pull-off strength of FRP sheet-brick and masonry.

次冻融循环后 FRP 片材加固单砖的正拉粘结强度最大会降低 45.49%。

2.2.2　影响因素分析

(1) 冻融次数的影响

CFRP 片材加固单砖正拉粘结强度 F_{pull} 随冻融次数的变化如图 12 所示。在冻融循环的作用下，CFRP 片材-黏土单砖和 CFRP 片材-页岩单砖正拉粘结强度逐渐减小，经过 30 次冻融循环后，CFRP 片材-黏土单砖和 CFRP 片材-页岩单砖正拉粘结强度分别减低 28.40% 和 31.60%。CFRP 片材-黏土单砖和 CFRP 片材-页岩单砖正拉粘结强度随着冻融次数的降低程度也有所不同，主要与砖的抗拉强度降低程度相关。在相同条件下，随着冻融次数的增加，页岩砖抗压强度的降低程度要大于黏土砖。

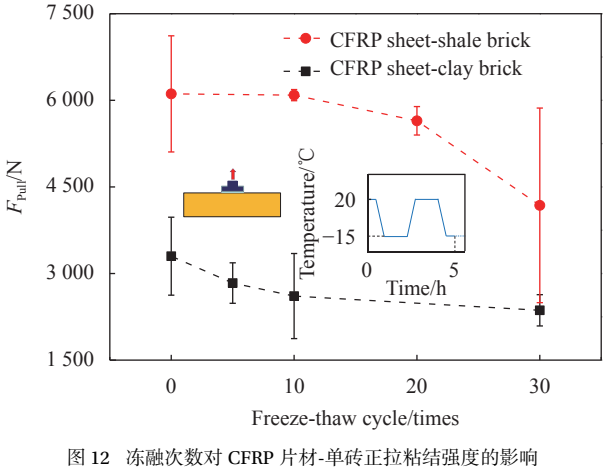


图 12　冻融次数对 CFRP 片材-单砖正拉粘结强度的影响

Fig. 12　Variation of pull-off debonding strength of CFRP sheet-brick owing to freeze-thaw times

(2) FRP 片材种类的影响

CFRP 片材和 GFRP 片材加固单砖的正拉粘结强度随冻融次数的变化规律如图 13 所示。可以看出，CFRP 片材和 GFRP 片材加固黏土单砖和页岩单砖的正拉粘结强度比较接近，变化规律也基本相同。可见 FRP 片材的种类对不同冻融次数条件下的正拉粘结强度几乎没有影响，这主要是由于正拉粘结强度的破坏模式都是砖的拉拔破坏，主要跟砌体的抗拉强度有关。

(3) 砂浆缝的影响

CFRP 片材加固页岩单砖和页岩砖墙正拉粘结强度随冻融次数的影响如图 14 所示。可以看出，在相同冻融次数条件下，由于砂浆的强度较低，CFRP 片材-砖墙的正拉粘结强度均低于 CFRP 片材-单砖的正拉粘结强度，并且都随着冻融次数的增加而降低。经过 30 次冻融循环后，CFRP 片材-单砖和 CFRP 片材-砖墙的正拉粘结强度分别降低 31.06% 和 29.06%。

2.3　FRP 片材-砌块单面剪切性能

2.3.1　破坏过程和破坏形态

加载过程中，当荷载增加到脱粘力的 50% 左右，纤维片材会有轻微断裂的声响，随着不断的加载，最后一声巨响，纤维片材被拉下，荷载迅速下降，试件破坏。黏土单砖和砖墙的破坏模式是粘结界面的砌体层剥离破坏，而页岩单砖和砖墙的破坏模式是界面处的胶层发生剥离破坏。另

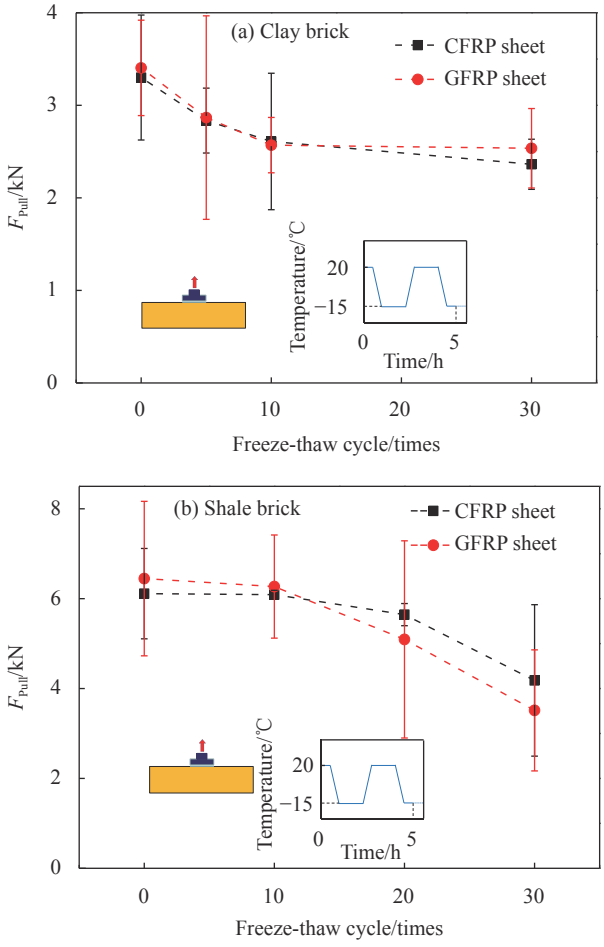


图 13　不同种类 FRP 片材加固单砖的正拉粘结强度

Fig. 13　Effect of FRP types on pull-off debonding strength of FRP sheet-brick

有少部分试件会介于这两种破坏模式之间，剥离层有部分砌体碎渣和部分环氧树脂胶，破坏模式如图 15 所示。单面剪切试验的结果见表 2。

2.3.2　影响因素分析

(1) 冻融次数的影响

不同冻融次数条件下 FRP 片材加固单砖和砖墙的单面剪切强度 F_{shear} 变化规律如图 16 所示。可以看出，FRP 片材加固单砖和砖墙的单面剪切

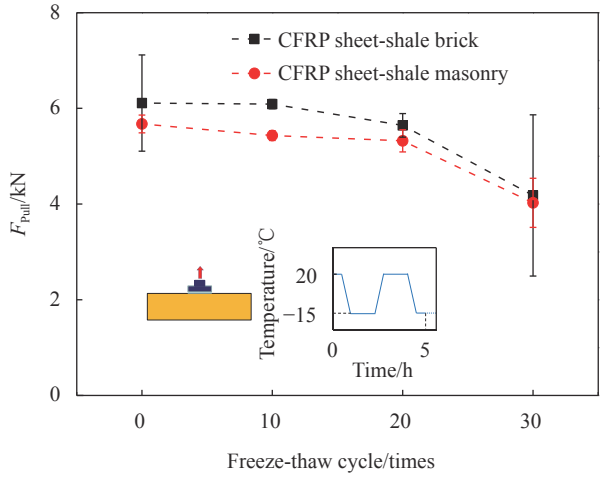


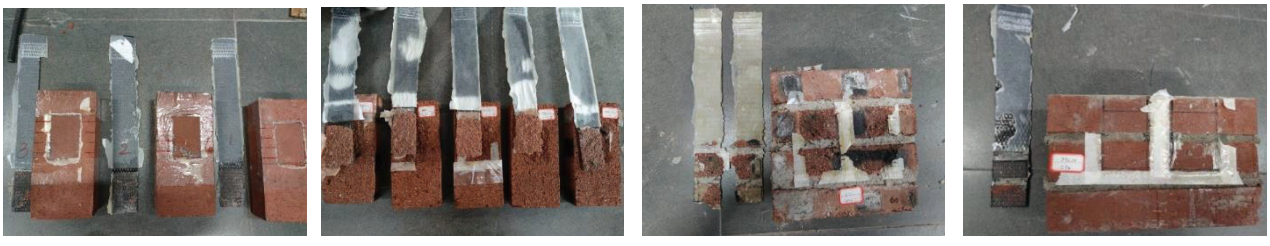
图 14　砂浆缝对 CFRP 片材加固页岩单砖和页岩砖墙正拉粘结强度的影响

Fig. 14　Effect of mortar on pull-off debonding strength of CFRP sheet-shale brick and masonry

强度随冻融次数的变化规律基本一致，随着冻融次数的增加，FRP 片材加固单砖和砖墙试件的单面剪切强度都逐渐降低。主要原因是在冻融循环的作用下，砖、砂浆、环氧树脂胶和 FRP 片材材料的性能都有不同程度的下降。冻融 30 次后，对于 CFRP 片材加固黏土单砖和黏土砖墙试件的单面剪切强度分别降低 21.68% 和 42.26%，CFRP 片材加固页岩单砖和页岩砖墙试件的单面剪切强度分别降低 36.70% 和 38.94%，降低程度都比较明显。

(2) FRP 片材种类的影响

GFRP 片材和 CFRP 片材加固单砖的单面剪切强度随冻融次数的变化如图 17 所示。对比可知，由于黏土砖和页岩砖的强度和密实度不同，导致了不同的单面剪切破坏模式，其界面间的剪切强度随冻融次数的变化规律也不相同。FRP 片材加固黏土单砖，发生的是砖层剥离破坏，GFRP 片材-黏土单砖剪切强度的变化规律与 CFRP 片材-黏



(a) CFRP sheet-shale brick　(b) CFRP sheet-clay brick　(c) GFRP sheet-shale masonry　(d) CFRP sheet-clay masonry

图 15　FRP 片材加固单砖和砖墙典型破坏模式

Fig. 15　Typical failure modes of FRP sheet-brick and masonry in single-lap shear bond test

表 2　FRP 片材加固单砖和砖墙的单面剪切试验结果

Table 2　Test results of FRP sheet-brick and masonry in single-lap shear bond test

Freeze-thaw time	FRP type	Block type	F_{shear}/N	Changing range/%	Block type	F_{shear}/N	Changing range/%
0	CFRP sheet	Clay brick	9 860.57	–	Clay masonry	8 239.11	–
5	CFRP sheet	Clay brick	9 145.31	7.25	–	–	–
10	CFRP sheet	Clay brick	8 510.16	13.70	Clay masonry	8 010.50	2.77
20	–	–	–	–	Clay masonry	5 280.50	35.91
30	CFRP sheet	Clay brick	7 722.36	21.68	Clay masonry	4 757.33	42.26
0	GFRP sheet	Clay brick	9 268.90	–	Clay masonry	9 506.48	–
5	GFRP sheet	Clay brick	8 444.32	8.90	–	–	–
10	GFRP sheet	Clay brick	7 909.60	14.67	Clay masonry	8 375.50	11.90
20	–	–	–	–	Clay masonry	7 795.00	18.00
30	GFRP sheet	Clay brick	6 707.17	27.64	Clay masonry	6 153.67	35.27
0	CFRP sheet	Shale brick	11 080.98	–	Shale masonry	10 984.59	–
10	CFRP sheet	Shale brick	10 483.91	5.39	Shale masonry	10 112.00	7.94
20	CFRP sheet	Shale brick	9 032.16	18.49	Shale masonry	8 675.50	21.02
30	CFRP sheet	Shale brick	7 013.81	36.70	Shale masonry	6 707.33	38.94
0	GFRP sheet	Shale brick	11 358.93	–	Shale masonry	9 967.78	–
10	GFRP sheet	Shale brick	10 372.80	8.68	Shale masonry	9 690.50	2.78
20	GFRP sheet	Shale brick	9 274.13	18.35	Shale masonry	8 051.67	19.22
30	GFRP sheet	Shale brick	8 250.59	27.36	Shale masonry	7 211.00	27.66

Note: F_{shear}—Single-lap shear strength of FRP sheet-brick and masonry.

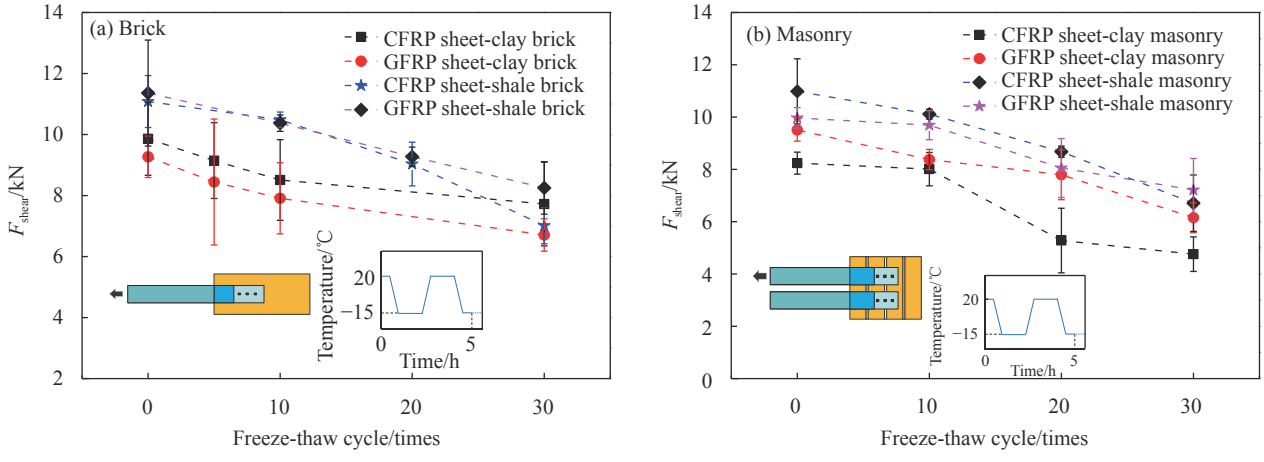


图 16　冻融次数对 FRP 片材加固单砖和砖墙单面剪切强度的影响

Fig. 16　Variation of single-lap shear debonding strength of FRP sheet-brick and masonry owing to freeze-thaw times

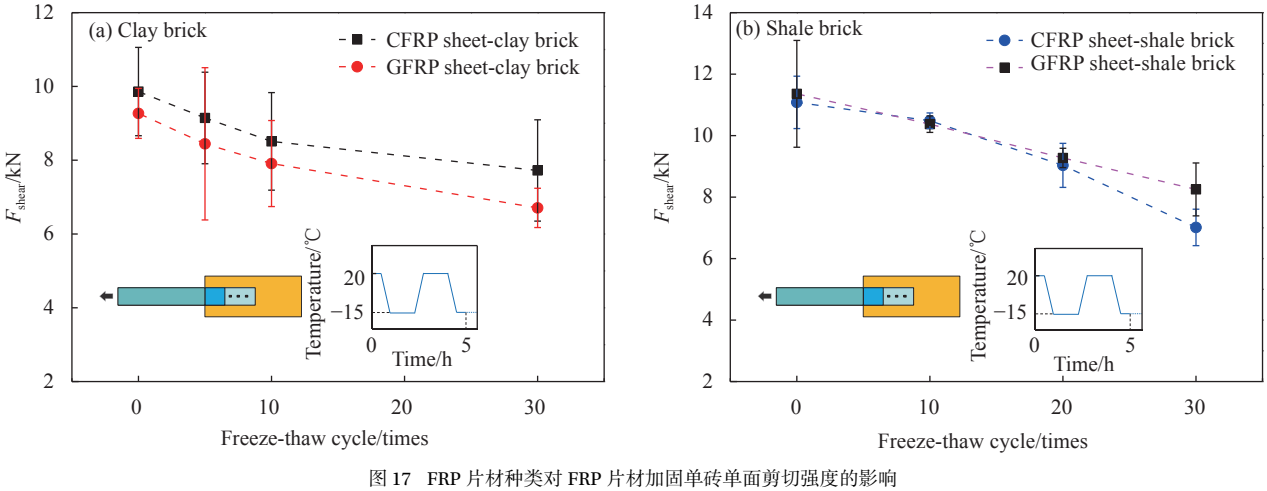


图 17　FRP 片材种类对 FRP 片材加固单砖单面剪切强度的影响

Fig. 17　Effect of FRP sheet types on single-lap shear debonding strength of FRP sheet-brick

土单砖的基本一致。FRP 片材加固页岩单砖，发生的是胶层剥离破坏，更容易受到冻融次数的影响，随着冻融次数的增加，GFRP 片材-页岩单砖剪切强度与 CFRP 片材-页岩单砖的降低趋势逐渐增大。在冻融次数为 0 次和 30 次条件下，GFRP 片材-页岩单砖剪切强度与 CFRP 片材-页岩单砖的剪切强度分别相差 2.51% 和 17.63%。

(3) 砂浆缝的影响

砂浆缝对 FRP 片材加固砌体单面剪切强度的影响如图 18 所示。可知，在相同条件下，由于砂浆的强度较低，砂浆缝的存在会降低 FRP 片材加固砌体的单面剪切强度。而且随着冻融次数的增加，砂浆的力学性能也下降很多，会导致 FRP 片材-砖墙的界面粘结强度受冻融循环条件影响更加严重。随着冻融循环次数的增加，黏土砖墙的单面剪切强度降低程度相对单砖的更明显。经过 30 次冻融后，CFRP 片材加固黏土砖墙试件相对于单砖试件的单面剪切强度降低了 38.40%，CFRP 片材加固页岩砖墙试件相对于单砖试件的单面剪切强度降低了 4.37%。

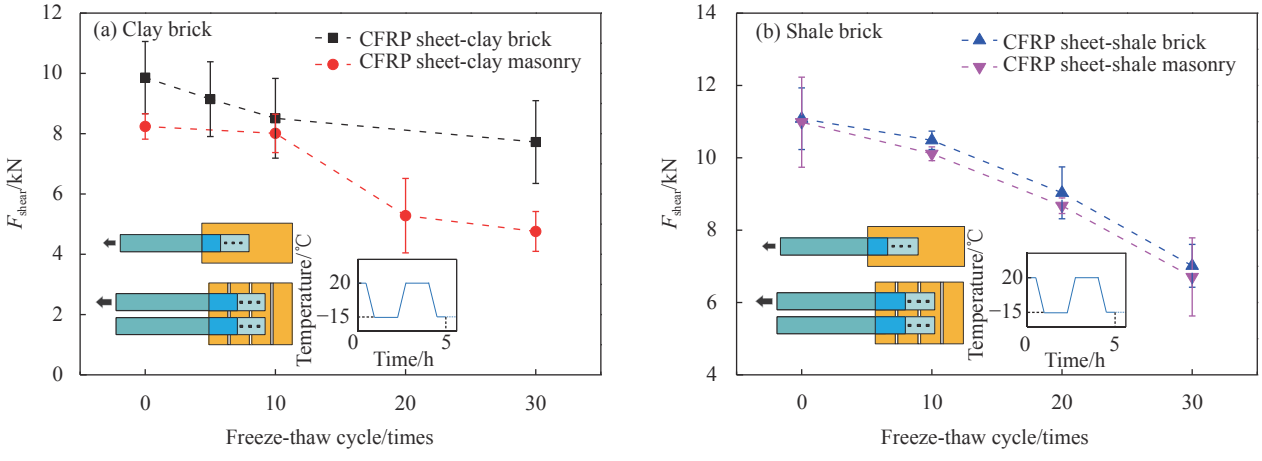


图 18 砂浆缝对 FRP 片材加固砌体单面剪切强度的影响

Fig. 18 Effect of mortar on single-lap shear debonding strength of FRP sheet-masonry

3 FRP 片材-砌块界面强度劣化曲线

由于 FRP 片材与砌体间的单面剪切作用与实际工程的受力更接近，以界面单剪抗拉强度作为判定其粘结性能的指标更具有代表性。Phani 等[25]提出了一个指数函数的强度劣化模型，并且被广泛用来预测不同侵蚀环境条件下的强度劣化性能[5]。

根据 FRP 片材-砌体单面剪切试验的结果进行拟合，得出的相关曲线如图 19 所示。可以看出，FRP 片材加固单砖的强度劣化模型拟合曲线的相关系数都在 0.99 以上，与试验数据吻合较好，可以比较准确地计算冻融条件下的 FRP 片材加固单砖的界面单面剪切强度。

FRP 片材加固砖墙的强度劣化模型，可以在单砖的强度劣化曲线的基础上，考虑砂浆缝的不利影响系数来计算。砂浆试块的强度劣化拟合曲线如图 20 所示。

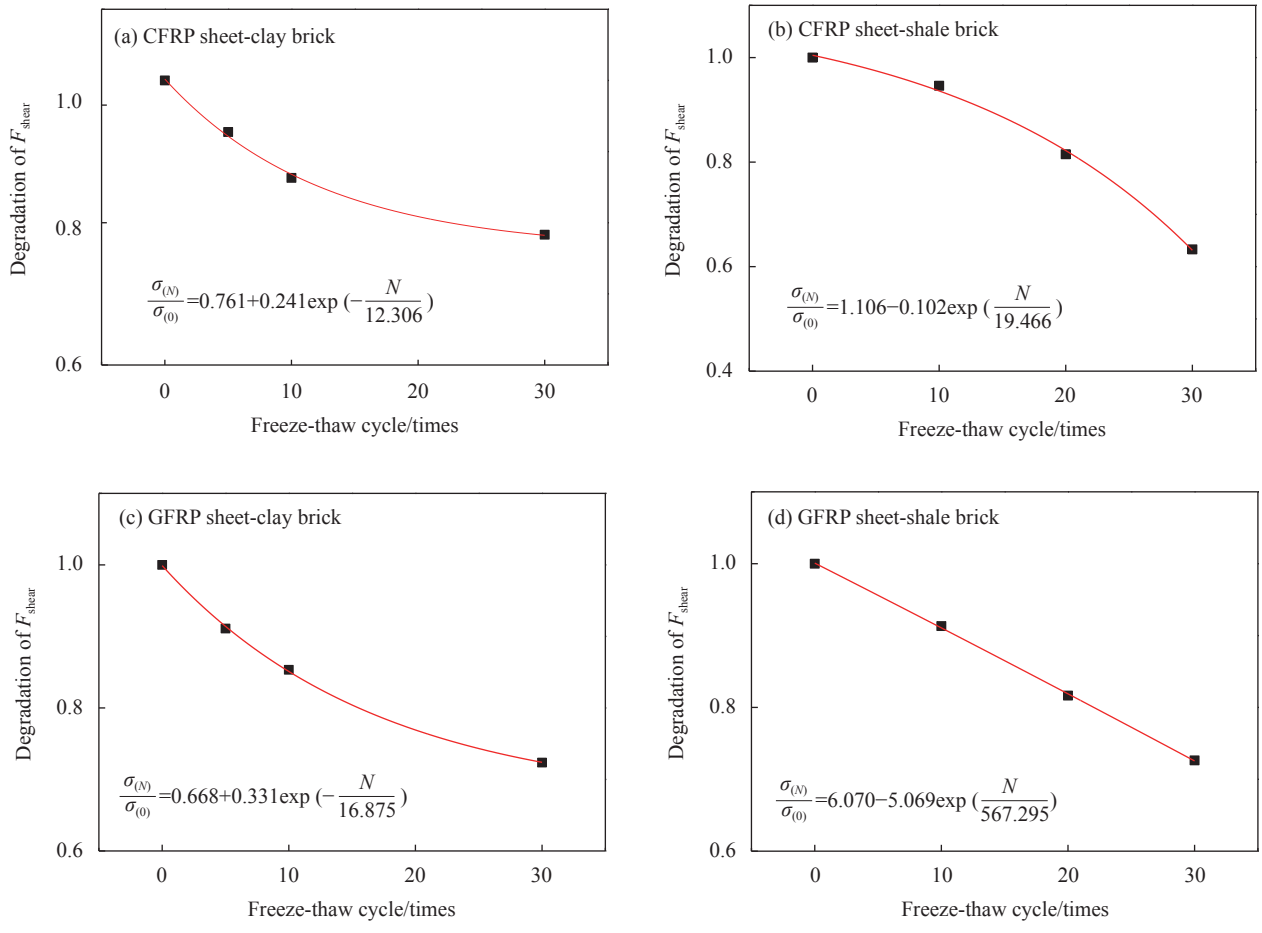
根据砂浆的强度劣化曲线，再考虑砂浆层的厚度 h_m 和总的粘贴长度 h 的比值，则 FRP 片材加固砖墙单面剪切强度的计算公式：

$$\frac{\sigma_{\mathrm{Masonry}(N)}}{\sigma_{\mathrm{Brick}(N)}}=\frac{h_{\mathrm{m}}}{h}\frac{\sigma_{\mathrm{Mortar}(N)}}{\sigma_{\mathrm{Mortar}(0)}}+\left(1-\frac{h_{\mathrm{m}}}{h}\right) \tag{1}$$

式中：$\sigma_{\mathrm{Masonry}(N)}$、$\sigma_{\mathrm{Mortar}(N)}$ 和 $\sigma_{\mathrm{Brick}(N)}$ 分别表示冻融循环 N 次后砖墙的单面剪切强度、砂浆块的抗压强度和单砖的单面剪切强度；$\sigma_{\mathrm{Mortar}(0)}$ 表示未经过冻融循环砂浆快的抗压强度。根据式 (1) 得出的计算结果如图 21 所示。可以看出，除个别点外所有的误差均在 15% 以内，计算结果 F_{cal} 与试验结果 F_{test} 比较吻合。

4 结 论

(1) 针对试验所采用的材料，黏土砖、页岩砖、砂浆块、碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP) 片材、玻璃纤维增强树脂复合材料 (GFRP) 片材和粘贴环氧树脂的力学性能都受到冻融循环的影响严重，均随着冻融次数的增加而明显降低，经过 30 次冻融循环后，强度分别降低 23.94%、15.05%、27.03%、48.94%、49.31% 和 16.67%。



$\sigma_{(N)}$—Single-lap shear debonding strength of FRP sheet-brick after exposure to N times freeze-thaw cycle; $\sigma_{(0)}$—Single-lap shear debonding strength of FRP sheet-brick without freeze-thaw cycle

图 19　FRP 片材-砌块单面剪切强度的劣化曲线

Fig. 19　Modeled degradation curves of single-lap shear debonding strength of FRP sheet-brick

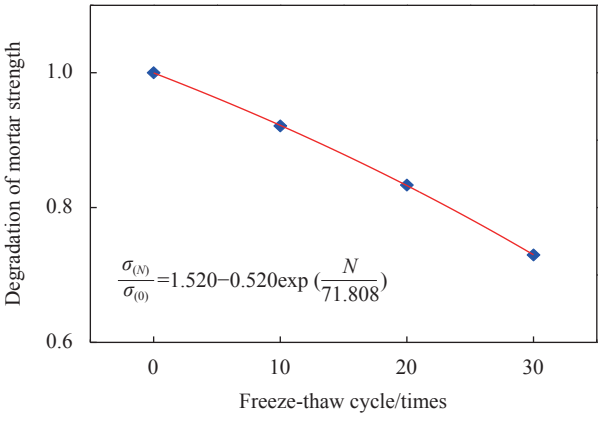
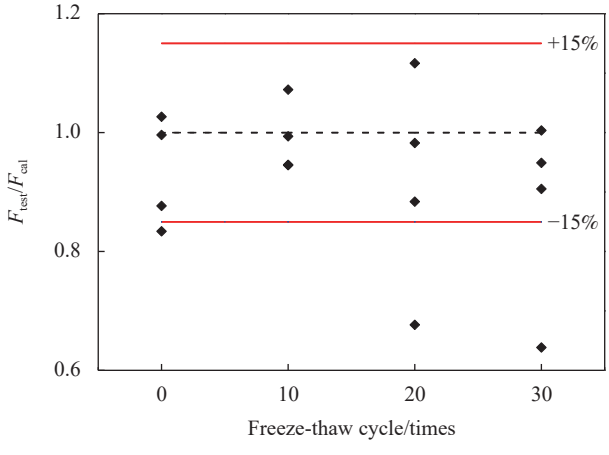


图 20　砂浆抗压强度的劣化曲线

Fig. 20　Modeled degradation curve of mortar



F_{cal}—Calculation results of shear strength; F_{test}—Experimental result of shear strength

图 21　FRP 片材-砖墙单面剪切强度计算结果的误差分析

Fig. 21　Error in single-lap shear strength calculation results of FRP sheet-masonry

(2) 随着冻融循环次数的增加，纤维增强树脂复合材料 (FRP) 片材与砖砌块界面间的正拉粘结强度逐渐减低，经过 30 次冻融循环后 GFRP 片材-页岩单砖的正拉粘结强度会降低 45.49%；FRP 片材的种类对不同冻融次数条件下的正拉粘结强度几乎没有影响；砂浆缝的存在会降低 FRP 片材与砖砌块界面间的正拉粘结强度。

(3) 随着冻融循环次数的增加，FRP 片材与砖砌块界面间的单面剪切强度逐渐减低，冻融循环 30 次后 FRP 片材与单砖的单面剪切强度最大可降低 42.26%；FRP 片材的种类对不同冻融次数条件下的单面剪切强度有一定的影响；砂浆缝的存在会导致砖墙的单面剪切强度降低程度更明显。

参考文献：

[1] 王作虎, 杨文雄, 刘杜. FRP布加固砌体结构界面粘结性能的研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018, 288(1)：103-107.
WANG Zuohu, YANG Wenxiong, LIU Du. Research progress on interfacial adhesion of FRP-strengthened masonry structures[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites，2018，288(1)：103-107(in Chinese).

[2] 王作虎, 申书洋, 杨菊, 等. FRP布加固结构粘结界面耐久性的研究进展[J]. 复合材料科学与工程, 2020, 318(7)：117-122.
WANG Zuohu, SHEN Shuyang, YANG Ju, et al. Research progress on durability of bond interface of FRP sheet reinforced structures[J]. Composites Science and Engineering，2020，318(7)：117-122(in Chinese).

[3] BABATUNDE S A. Review of strengthening techniques for masonry using fiber reinforced polymers[J]. Composite Structures，2017，161：246-255.

[4] VACULIK J, VISINTIN P, BURTON N G, et al. State-of-the-art review and future research directions for FRP-to-masonry bond research: Test methods and techniques for extraction of bond-slip behavior[J]. Construction and Building Materials，2018，183：325-345.

[5] 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.

[6] GHIASSI B, LOURENCO P B, OLIVEIRA D V. Effect of environmental aging on the numerical response of FRP-strengthened masonry walls[J]. Journal of Structural Engineering，2016，142(1)：04015087.

[7] SCIOLTI M S, AIELLO M A, FRIGIONE M. Influence of water on bond behavior between CFRP sheet and natural calcareous stones[J]. Composites Part B: Engineering，2012，43(8)：3239-3250.

[8] TEDESCHI C, KWIECIEN A, VALLUZZI M R, et al. Effect of thermal ageing and salt decay on bond between FRP and masonry[J]. Materials and Structures，2014，47(12)：2051-2065.

[9] CARDANI G, VALLUZZI M R, PANIZZA M, et al. Influence of salt crystallization on composites-to-masonry bond evaluated on site by pull-off tests[J]. Key Engineering Materials，2014，624：338-345.

[10] MALJAEE H, BAHMAN G, LOURENCO P B, et al. Moisture-induced degradation of interfacial bond in FRP-strengthened masonry[J]. Composites Part B: Engineering，2016，87：47-58.

[11] 勒文强, 赵建昌, 王琦, 等. 冻融循环对CFRP-烧结粘土砖界面粘结性能影响[J]. 复合材料学报, 2020, 37(9)：2294-2302.
JIN Wenqiang, ZHAO Jianchang, WANG Qi, et al. Effects of freeze-thaw cycles on interfacial bonding property of CFRP-sintered clay brick[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2020，37(9)：2294-2302(in Chinese).

[12] 郭乐乐, 靳文强, 张家玮, 等. 冻融环境下CFRP-粘土砖抗剪性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(3)：798-803, 818.
GUO Lele, JIN Wenqiang, ZHANG Jiawei, et al. Experimental study on shear behavior of CFRP-clay brick in freeze-thaw environment[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society，2020，39(3)：798-803, 818(in Chinese).

[13] 别治明. 冻融循环下青砖砌体结构性损伤的演化规律[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2020, 51(4)：668-672.
BIE Zhiming. The evolution law of structural damage of blue brick masonry under a freeze-thaw cycle[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)，2020，51(4)：668-672(in Chinese).

[14] 李趁趁. FRP加固混凝土结构耐久性试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
LI Chenchen. Experimental investigation on durability of FRP strengthened concrete structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006(in Chinese).

[15] 胡安妮. 荷载和恶劣环境下FRP增强结构耐久性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
HU Anni. Experimental study on durability of FRP strengthening civil engineering structures under load and aggressive environments[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007(in Chinese).

[16] QIAO P Z, XU Y W. Mode-I fracture and durability of FRP-concrete bonded interfaces[J]. Water Science and Engineering，2008，1(4)：47-60.

[17] YUN Y C, WU Y F. Durability of CFRP-concrete joints under freeze-thaw cycling[J]. Cold Regions Science and Technology，2011，65(3)：401-412.

[18] SHI J W, ZHU H, WU Z S, et al. Bond behavior between basalt fiber-reinforced polymer sheet and concrete substrate under the coupled effects of freeze-thaw cycling and sustained load[J]. Composite Construct，2013，17(4)：530-542.

[19] 王苏岩, 姚因杰, 洪雷. 恶劣环境与荷载共同作用下FRP-高强混凝土的粘结耐久性[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(1)：127-133.
WANG Suyan, YAO Yinjie, HONG Lei. Durability of FRP-high strength concrete adhesive joints under aggressive

exposure conditions and loads[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(1): 127-133(in Chinese).

[20] 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. Fiber-reinforced plastics composites-The generals for determination of properties: GB/T 1446—2005[S]. Beijing: China Standards Press, 2005(in Chinese).

[21] 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. Fiber-reinforced plastics composites-Determination of tensile properties: GB/T 1447—2005[S]. Beijing: China Standards Press, 2005(in Chinese).

[22] 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 methods for wall bricks: GB/T 2542—2012[S]. Beijing: China Standards Press, 2013(in Chinese).

[23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑砂浆基本性能试验方法标准: JGJ/T 70—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test method of basic properties of construction mortar: JGJ/T 70—2009[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009(in Chinese).

[24] 任慧韬, 姚谦峰, 胡安妮. 纤维增强复合材料的耐久性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(5): 520-526.
REN Huitao, YAO Qianfeng, HU Anni. Experimental study on durability of fiber reinforced polymer[J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(5): 520-526(in Chinese).

[25] PHANI K K, BOSE N R. Hygrothermal ageing of CSM-laminate during water immersion-An acoustic-ultrasonic study[J]. Journal Material Science, 1986, 21(10): 3633-3637.