

文章编号:1007-9629(2022)04-0395-06

BFRP 和 GFRP 筋剪切性能的温度效应

蔡启明¹, 陆春华^{1,*}, 延永东¹, 张菊连²

(1. 江苏大学 土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013;

2. 上海宏信建筑科技有限公司, 上海 201800)

摘要:对温度作用后的玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)筋和玻璃纤维增强复合材料(GFRP)筋进行了短梁剪切试验,研究了高温后筋材的剪切性能,并提出了温度作用后 BFRP、GFRP 筋剪切强度的预测计算模型.结果表明:BFRP、GFRP 筋的剪切强度均随着温度的升高而逐渐降低;直径为 12 mm 的 BFRP、GFRP 筋的剪切强度退化速率比直径为 16 mm 的更快;270 °C 高温下,筋材的剪切强度保留率均随着恒温时间的延长呈下降趋势,但 BFRP 筋的退化速率明显低于 GFRP 筋;BFRP、GFRP 筋剪切强度的退化都主要源于纤维与树脂基体交联度的降低及基体的热降解;与 GFRP 筋相比,BFRP 筋具有更优的耐高温性能.

关键词:玄武岩纤维增强复合材料;玻璃纤维增强复合材料;温度效应;剪切性能;预测模型

中图分类号:TU502⁺.6

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.04.010

Temperature Effect on Shear Properties of BFRP and GFRP Bar

CAI Qiming¹, LU Chunhua^{1,*}, YAN Yongdong¹, ZHANG Julian²

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Shanghai Hongxin Construction Technology Co., Ltd., Shanghai 201800, China)

Abstract: Short beam shear tests of basalt fiber reinforced composite (BFRP) bars and glass fiber reinforced composite (GFRP) bars at different temperatures were carried out, and the shear properties of the bars at high temperature were studied. The prediction and calculation models of the temperature effect on shear strength of BFRP and GFRP bars after temperature were put forward. The results show that the shear strength of BFRP and GFRP bars decreases gradually with the increase of temperature. The shear strength degradation rate of the BFRP and GFRP bars with a diameter of 12 mm is faster than that of bas with a diameter of 16 mm. At 270 °C, the shear strength retention of the bars decreases with the extension of the constant temperature time, but the degradation rate of BFRP bars is significantly lower than that of GFRP bars. The shear strength degradation of BFRP and GFRP bars is mainly due to the reduction of the cross-linking degree between the fiber and resin matrix and the thermal degradation of the matrix. Compared to GFRP bars, BFRP bars have better high temperature resistance.

Key words: basalt fiber reinforced composite; glass fiber reinforced composite; temperature effect; shear property; prediction model

纤维增强复合材料(FRP)在工程应用中经常会面临高温环境作用^[1],而高温后 FRP 筋的性能退化会给结构的后续服役埋下安全隐患,甚至引发结构

破坏^[2-3].为此,国内外学者对此开展了一定的研究.但相关研究^[3-6]多以 FRP 筋拉伸性能为分析对象,关于其高温剪切性能的研究相对较少.FRP 筋作为一

收稿日期:2020-12-10; 修订日期:2021-02-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878319, 51578267)

第一作者:蔡启明(1996—),男,江苏东台人,江苏大学硕士生.E-mail: 3426694112@qq.com

通讯作者:陆春华(1979—),男,江苏昆山人,江苏大学教授,博士生导师,博士.E-mail: lch79@ujs.edu.cn

种各项异性材料,一方面其横向性能远远弱于纵向性能,故剪切性能往往决定其使用寿命^[7];另一方面剪切性能作为材料的基本力学性能,可揭示高温下纤维与树脂间的工作机理,从而可对FRP筋进行较全面的性能评价^[8-9]。因此,有必要进一步对FRP筋剪切性能的温度效应展开研究。

目前,对FRP筋剪切性能的相关研究^[9-12]均采用“先环境作用后加载测试”的方法。该方法虽然不能完全反映高温下FRP筋剪切性能的退化规律,但考虑到试验的易操作性,同时也能在高温后FRP筋剪切性能的损伤评估提供有效参考。基于上述试验方法,本文以筋材直径 d 、温度 T 以及恒温时长为参数,研究了高温后玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)筋和玻璃纤维增强复合材料(GFRP)筋剪切性能的退化特性,并利用扫描电子显微镜(SEM)观测了其微观结构,分析试件高温后剪切性能的损伤机理,最后提出了BFRP、GFRP筋随温度变化的剪切强度预测计算模型,以期FRP混凝土结构的抗火设计提供一定的理论依据。

1 试验

1.1 原材料

选取直径为12、16 mm的BFRP、GFRP筋,分别记为B12、B16、G12、G16,其基体均为双酚A型环氧树脂,纤维体积分数 φ 均为64%,其力学性能见表1。采用差示扫描量热法(DSC)测试了2类筋材的玻璃化转变温度 T_g ,由于采用相同的基体材料,两者的 T_g 相差不大,其均值为111.3℃。

表1 BFRP、GFRP筋的力学性能

Table 1 Mechanical properties of BFRP and GFRP bars

| Property | B12 | B16 | G12 | G16 |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Tensile strength/MPa | 821.97 | 916.75 | 868.22 | 958.20 |
| Tensile elastic modulus/GPa | 42.75 | 48.61 | 40.06 | 45.69 |

1.2 试验方法

1.2.1 高温试验

取 $T=20、70、120、170、220、270、350、420、500℃$,共9种工况,在某炉业公司生产的高温试验箱内进行高温试验,达到设定温度后恒温处理0.5 h。由于BFRP、GFRP筋的基体热分解温度 T_d 一般在300℃左右^[4-5],故其使用温度建议不超过300℃^[3]。因此,为满足工程应用要求,同时又能观测到明显的试验效果,进而有效地评价FRP筋的高温剪切性能,对270℃的高温试验,增设恒温时长1.0、3.0、6.0 h,用于考察恒温时长对BFRP、

GFRP筋剪切性能的影响。

1.2.2 短梁剪切试验

用UTM5305型电子万能试验机进行短梁剪切试验。为避免剪切试验中的弯曲效应,移动设备底部支座,调节其跨径比为5,加载头作用于试件的跨中位置。短梁剪切试验示意图见图1。每组工况3个试件,结果取平均值。

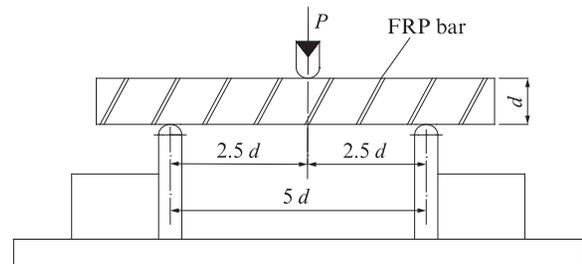


图1 短梁剪切试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of short-beam shear test

1.2.3 SEM分析

用S-3400N型扫描电子显微镜评估经20、120、350℃温度作用后BFRP、GFRP筋的微观结构及完整性,分析FRP筋性能退化的“短板效应”。

2 结果与分析

2.1 试件外观与破坏形态

BFRP、GFRP筋的高温试验中,筋材外观与温度息息相关,不同温度下试件的表现变化见图2。由图2可见:室温条件下,GFRP筋呈浅黄色,BFRP筋呈亮黑色;当温度升至350℃时,树脂基体发生碳化反应,试件全身呈炭黑色,其横截面均呈龟裂状;当温度上升至500℃时,树脂基体基本热解消失,2类试件的纤维丝呈松散状。

剪切试验中,经不同温度作用后的BFRP、GFRP筋的受力变形过程基本相同:室温条件下,伴随着加载的进行,树脂剥落和纤维丝断裂的“噼啪”声逐渐增大和密集,最终试件形成水平剪切破坏;350℃高温后,纤维丝断裂的声音减少,但最终破坏模式与室温下相同。G16筋在20、350℃下的剪切破坏形态见图3。由图3可见,20、350℃下,G16筋均从端口断面形成水平裂缝后逐步导致试件破坏,由此可见,温度的变化并没有改变筋材的剪切破坏模式,该结论与文献[10-12]相同。

2.2 剪切载荷-位移曲线

不同温度下B16和G16筋的剪切载荷-位移曲线见图4。由图4可见:B16和G16筋的剪切载荷-位移曲线整体变化趋势基本类似,均在加载前

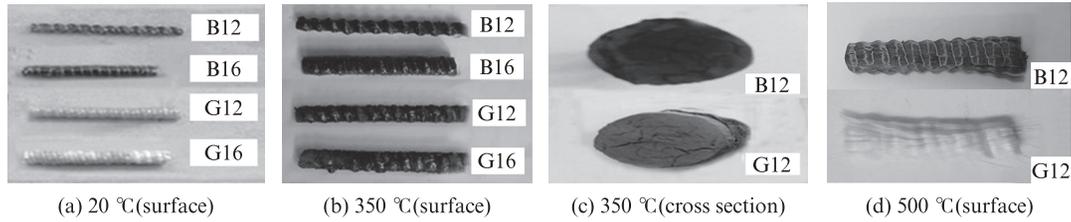


图2 不同温度下试件的表现变化

Fig. 2 Apparent changes of specimens under different temperatures



图3 G16筋在20、350 °C下的剪切破坏形态

Fig. 3 Shear failure modes of G16 bar at 20 and 350 °C

期呈线性变化,中期出现弯曲现象,直至加载到峰值,出现剪切破坏;随着温度的升高,初始线性段

斜率减小,这是因为高温作用使筋材的刚度下降,即使在较小力的作用下,其也会产生较大的位移;根据剪切载荷-位移曲线涵盖的面积可知,2类FRP筋的剪切韧性随着温度的升高逐渐降低;350 °C达到了树脂基体的热分解温度 T_d ,此时B16和G16筋的剪切性能均有较大幅度的退化,且G16筋的退化程度更严重.

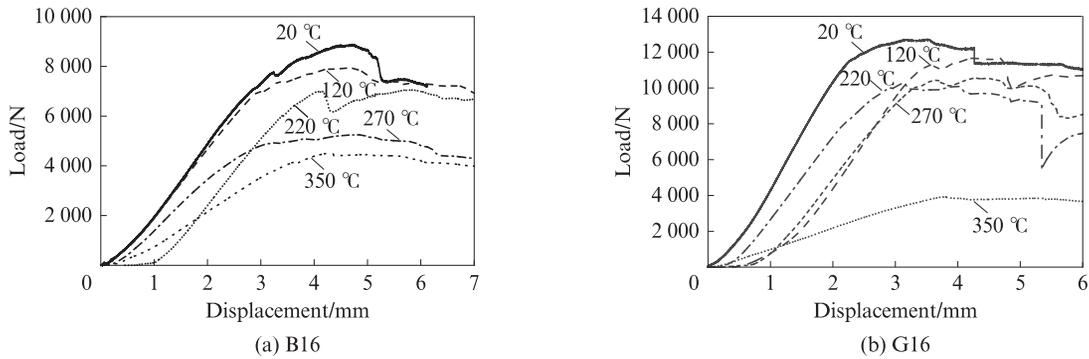


图4 不同温度下B16和G16筋的剪切载荷-位移曲线

Fig. 4 Shear load-displacement curves of B16 and G16 bars under different temperatures

2.3 剪切强度

根据 ASTM D4475-02 (2016)《Standard test method for apparent horizontal shear strength of pultruded reinforced plastic rods by the short-beam method》,FRP筋的剪切强度 τ 为:

$$\tau = 0.849 \frac{P}{d^2} \quad (1)$$

式中: P 为试件破坏时的最大荷载,N.

不同温度下BFRP和GFRP筋的剪切强度及其退化率 η 见表2.由表2可见:随着温度的升高,小直径FRP筋的剪切强度退化速率略快,尤其是BFRP筋,这是因为试件的高温受损过程为由表及里,而直径与界面降解率成反比.在Mouritz^[13]的研究中也表明FRP材料受温度作用会逐渐分化为焦炭层和完整层,而焦炭层在直径小的筋材内占比更高,同时降解界面占比越高,剪切性能的衰减就更加明显.

由表2还可见,相同温度作用后,G16的剪切

强度退化率除170、270 °C外均高于B16.这一方面应是玄武岩纤维的导热系数小,具有屏蔽热辐射的特性^[14],故受温度作用时,玄武岩纤维可以更好地保护试件内部树脂;另一方面,玄武岩纤维中存在着 Fe_2O_3 和 FeO 化合物,而玻璃纤维中所没有Fe元素,这使得玄武岩纤维的热稳定性略优于玻璃纤维^[15-16].

根据温度将FRP筋的剪切强度退化过程初步分为3个阶段:(1)当温度低于120 °C时,树脂基体呈玻璃态,筋材的剪切性能稳定,B16的剪切强度相较于室温仅退化了2.01%,G16的退化幅度为6.56%;(2)当温度为120~270 °C时,由于超过树脂基体的玻璃化转变温度($T_g=111.3$ °C),聚合物由玻璃态向黏弹态转变,BFRP和GFRP筋剪切强度的降低幅度增大;(3)当温度高于270 °C时,筋材表面的树脂发生氧化分解反应,内部树脂处于缺氧状态而发生碳化反应,从而使纤维/树脂界面剥离^[17],BFRP和GFRP筋的剪切强度均急剧减小.

表2 不同温度下BFRP和GFRP筋的剪切强度及其退化率
Table 2 Shearing strength and its degradation rate of BFRP and GFRP bars after different temperatures treatment

| T/°C | B12 | | B16 | | G12 | | G16 | |
|------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| | τ /MPa | η /% |
| 20 | 17.679 | | 26.704 | | 43.063 | | 41.395 | |
| 70 | 16.225 | 8.22 | 26.468 | 0.88 | 39.685 | 7.84 | 39.223 | 5.25 |
| 120 | 16.206 | 8.33 | 26.166 | 2.01 | 36.424 | 15.42 | 38.679 | 6.56 |
| 170 | 12.766 | 27.79 | 24.827 | 7.03 | 36.212 | 15.91 | 39.001 | 5.78 |
| 220 | 12.693 | 28.20 | 23.457 | 12.16 | 37.114 | 13.81 | 34.832 | 18.85 |
| 270 | 12.075 | 31.70 | 18.943 | 29.06 | 33.235 | 22.82 | 34.431 | 16.82 |
| 350 | 6.827 | 61.39 | 14.768 | 44.70 | 13.189 | 69.37 | 12.294 | 70.30 |
| 420 | 1.527 | 91.36 | 0.789 | 97.05 | 1.733 | 95.98 | 1.094 | 97.36 |

2.4 恒温时长对剪切性能的影响

270 °C、不同恒温时间下BFRP和GFRP筋剪切强度保留率 γ_T 见图5.由图5可见:BFRP和GFRP筋的剪切强度保留率均随恒温时间的延长逐渐降低,且BFRP筋降低的幅度明显小于GFRP筋;相同恒温时

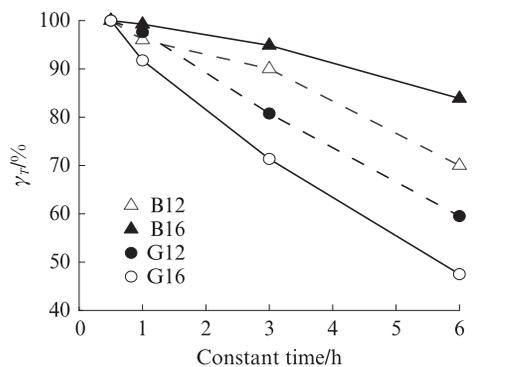


图5 不同恒温时间下BFRP和GFRP筋剪切强度保留率(270 °C)

Fig. 5 Shear strength retention rate of BFRP and GFRP bars under different constant temperature time (270 °C)

间下,BFRP筋的剪切强度保留率均高于GFRP筋.由此可见,BFRP筋的耐高温性能要明显优于GFRP筋.

2.5 微观结构

不同温度下BFRP和GFRP筋的SEM照片见图6.由图6可见:20 °C时,BFRP、GFRP筋中纤维丝排列紧密有序,纤维和基体的浸润性较好;120 °C时,由于刚达到树脂基体的玻璃化转变温度(111.3 °C),BFRP、GFRP筋的纤维丝仅表现为轻微的松散;B16在350 °C温度作用后,部分纤维表面光滑,附着的树脂基体减少,说明两者的交联度降低,黏结力下降;G16中纤维的脱黏现象十分严重,树脂基体已很难传递纤维间的应力;在整个观测过程中,纤维表面未见明显损伤,说明在试验温度范围内,FRP筋的剪切性能退化主要是由树脂基体的热降解所造成.基于此,后续研究可考虑将耐高温树脂与纤维丝复合形成FRP筋,进而改善其高温剪切性能.

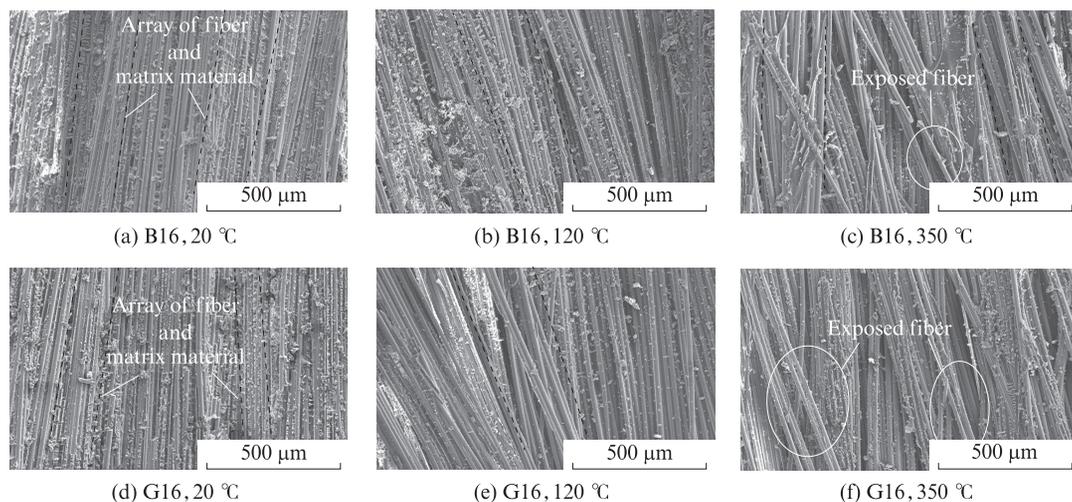


图6 不同温度下B16和G16筋的SEM照片

Fig. 6 SEM images of B16 and G16 bars under different temperatures

2.6 温度作用后FRP筋剪切性能退化分析

温度作用后FRP筋的剪切强度 τ_T 为:

$$\tau_T = \gamma_T \tau_{20} \quad (2)$$

式中: τ_{20} 为20℃作用后FRP筋的剪切强度.

参照文献[18],FRP筋的剪切强度保留率 γ_T 与温度 T 的关系可由双曲正切函数表示:

$$\gamma_T = \left(\frac{1-a}{2} \right) \tanh[-b(T-c)] + \frac{1+a}{2} \quad (3)$$

式中: a 、 b 、 c 为回归参数,可由试验结果得到.

用式(3)对试验值进行回归分析,得到了回归参数 a 、 b 和 c 的建议值,同时出于安全考虑,初步

提出了BFRP和GFRP筋在关键温度节点对应的剪切强度保留率 γ_T 的建议值,结果见表3,其他作用温度条件下的 γ_T 可采取线性插值法获取.根据 γ_T 的建议值,可得到FRP筋剪切强度随高温作用后的建议退化曲线.BFRP和GFRP筋剪切强度保留率与温度的关系曲线见图7.由图7可见:预测结果可以较好地描述BFRP和GFRP筋的剪切强度随温度升高的退化过程;所得到的建议退化曲线能在描述FRP筋材剪切强度退化规律的同时,具有一定的安全保障,可用于相关工程问题的应用分析.

表3 剪切强度计算公式中的回归参数及关键温度节点的 γ_T 建议值

Table 3 Regression parameters in shear strength calculation formula and recommended γ_T for critical temperature

| FRP | a | b | c | γ_T | | | | | |
|------|--------|-------|---------|------------|-----------------------|-----------------------|---------|-----------------------|-----------------------|
| | | | | $T=T_g$ | $T=170^\circ\text{C}$ | $T=270^\circ\text{C}$ | $T=T_d$ | $T=350^\circ\text{C}$ | $T=420^\circ\text{C}$ |
| BFRP | -0.691 | 0.005 | 406.938 | 0.90 | 0.75 | 0.70 | 0.65 | 0.35 | 0 |
| GFRP | -0.379 | 0.007 | 359.024 | 0.85 | — | 0.70 | 0.55 | 0.25 | 0 |

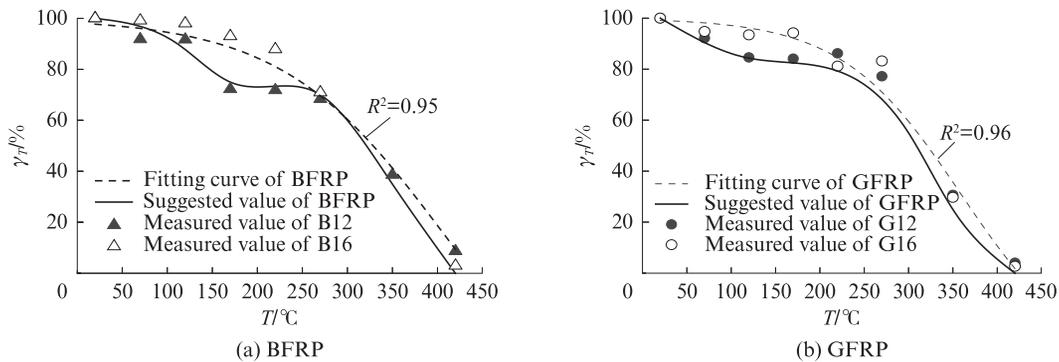


图7 BFRP和GFRP筋剪切强度保留率与温度的关系曲线
Fig. 7 Relation curves between temperature and shear strength retention of BFRP and GFRP Bars

3 结论

(1)高温作用会改变玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)、玻璃纤维增强复合材料(GFRP)筋的外观,当作用温度达350℃时,BFRP、GFRP筋均呈炭黑色;但在20~420℃温度区间内,温度作用未改变其剪切破坏模式.

(2)相同温度作用后,直径12mm的BFRP、GFRP筋剪切性能退化速率高于直径16mm的筋材.此外,在270℃下,BFRP、GFRP筋的剪切性能均随恒温时间的延长而逐渐降低,且BFRP筋整体上表现出比GFRP筋更优的耐高温性能.

(3)BFRP、GFRP筋的剪切强度随温度的升高逐渐降低;结合SEM分析,强度衰减的主要原因是

树脂基体随温度升高发生分解反应,且纤维/基体间协同工作能力逐渐降低.故后续相关研究及应用中,可考虑将耐高温树脂作为基体材料,以改善纤维增强复合材料(FRP)筋的高温剪切性能.

(4)基于试验结果进行了回归分析,提出了20~420℃温度范围内BFRP、GFRP筋剪切强度的预测计算模型,其理论值与试验结果总体趋势吻合较好.

参考文献:

[1] 李杉,任慧韬,黄承逵,等.温度与碱溶液作用下FRP片材耐久性研究[J].建筑材料学报,2010,13(1):94-99.
LI Shan, REN Huitao, HUANG Chengkui, et al. Combined effects of temperature and alkaline solution on durability of FRP sheets[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(1):94-99. (in Chinese)

- [2] 薛伟辰, 付凯, 秦珩. 预制夹芯保温墙体FRP连接件抗拉强度加速老化试验研究[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(3):420-424. XUE Weichen, FU Kai, QIN Heng. Accelerated aging tests of tensile strength of FRP connectors in precast concrete sandwich wall panels[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(3): 420-424. (in Chinese)
- [3] 李趁趁, 王英来, 赵军, 等. 高温后FRP筋纵向拉伸性能[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(6):1076-1081. LI Chenchen, WANG Yinglai, ZHAO Jun, et al. Longitudinal tensile properties of FRP bars after high temperature[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(6):1076-1081. (in Chinese)
- [4] ROBERT M, BENMOKRANE B. Behavior of GFRP reinforcing bars subjected to extreme temperatures[J]. Journal of Composites for Construction, 2010, 14(4):353-360.
- [5] WANG Y C, WONG P M H, KODUR V. An experimental study of the mechanical properties of fibre reinforced polymer (FRP) and steel reinforcing bars at elevated temperatures[J]. Composite Structures, 2007, 80(1):131-140.
- [6] CHEN Y, DAVALOS J F, RAY I. Durability prediction for GFRP reinforcing bars using short-term data of accelerated aging tests[J]. Journal of Composites for Construction, 2006, 10(4): 279-286.
- [7] 郝文峰, 郭广平, 陈新文, 等. 基于数字图像相关方法的复合材料层间剪切性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(1):29-32. HAO Wenfeng, GUO Guangping, CHEN Xinwen, et al. Characterization of interlaminar shear properties for composite materials using digital image correlation[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2016(1):29-32. (in Chinese)
- [8] 高丹盈, 李士会, 朱海堂, 等. 玻璃纤维增强聚合物筋压缩和剪切性能试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(3):28-32. GAO Danying, LI Shihui, ZHU Haitang, et al. Experimental research on basic mechanical properties of GFRP bars[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2009(3):28-32. (in Chinese)
- [9] SAWPAN M A. Shear properties and durability of GFRP reinforcement bar aged in seawater[J]. Polymer Testing, 2019, 75:312-320.
- [10] CHEN Y, DAVALOS J F, RAY I, et al. Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures[J]. Composite Structures, 2007, 78(1): 101-111.
- [11] WANG Z K, ZHAO X L, XIAN G J, et al. Durability study on interlaminar shear behaviour of basalt-, glass- and carbon-fibre reinforced polymer (B/G/CFRP) bars in seawater sea sand concrete environment[J]. Construction and Building Materials, 2017, 156:985-1004.
- [12] SAWPAN M A, MAMUN A A, HOLDSWORTH P G. Long term durability of pultruded polymer composite rebar in concrete environment[J]. Materials and Design, 2014, 57:616-624.
- [13] MOURITZ A P. Post-fire flexural properties of fibre-reinforced polyester, epoxy and phenolic composites[J]. Journal of Materials Science, 2002, 37(7):1377-1386.
- [14] 吴敬宇. 玄武岩纤维复合筋高温性能研究[D]. 北京:中国地震局工程力学研究所, 2011. WU Jingyu. Study on high temperature performance of basalt fiber reinforced polymer bars [D]. Beijing: Engineering Mechanics Institute of China Earthquake Administration, 2011. (in Chinese)
- [15] WANG M C, ZHANG Z G, LI Y B, et al. Chemical durability and mechanical properties of alkali-proof basalt fiber and its reinforced epoxy composites[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2008, 27(4):393-407.
- [16] SIM J, PARK C, MOON D Y. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures[J]. Composites Part B:Engineering, 2005, 36(6/7):504-512.
- [17] 周长东, 吕西林, 金叶. 火灾高温下玻璃纤维筋的力学性能研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(1):23-28. ZHOU Changdong, LÜ Xilin, JIN Ye. Research on mechanical behavior of GFRP bars in high temperature [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(1):23-28. (in Chinese)
- [18] 张凯. 火灾高温下及高温后结构中FRP筋残余力学性能研究[D]. 南京:东南大学, 2018. ZHANG Kai. Experimental investigation on the residual mechanical properties of FRP bars in the structure during and after exposure to high temperatures[D]. Nanjing: Dongnan University, 2018. (in Chinese)