复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

火灾高温后混凝土内GFRP筋剪切性能退化试验与理论

陆春华 漆仲浩 葛浩 张云舒 张虹宇

Experimental and theoretical investigation on shear performance degradation of GFRP bars in concrete after fire and high temperature

LU Chunhua, QI Zhonghao, GE Hao, ZHANG Yunshu, ZHANG Hongyu

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230314.002

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

碱、盐环境下不同应力水平FRP筋抗压强度试验与理论研究

Experimental and theoretical study on compressive strength of FRP rebars under different stress levels in alkali and salt solution

复合材料学报. 2017, 34(10): 2220–2231 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170106.001

GFRP筋橡胶集料混凝土梁受弯性能

Analyses on flexural behavior of GFRP–reinforced crumb rubber concrete beams

复合材料学报. 2021, 38(5): 1611–1622 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201106.002

GFRP筋与自密实混凝土黏结性能的试验研究

Experimental study on bond properties between GFRP bars and self compacting concrete

复合材料学报. 2021, 38(10): 3484–3494 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210207.001

全GFRP筋混凝土电缆排管的抗剪承载力

Shear bearing capacity of concrete cable duct reinforced with GFRP bars

复合材料学报. 2018, 35(12): 3331–3341 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180206.001

高温环境下碳纤维增强树脂复合材料的层间力学性能老化行为与失效预测

Aging behavior and failure prediction of interlaminar mechanical properties of carbon fiber reinforced polymer composite at high temperature

复合材料学报. 2020, 37(4): 859–868 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190619.002

玻化微珠保温混凝土高温后性能劣化及微观结构

Performance degradation and microscopic structure of glazed hollow bead insulation normal concrete after exposure to high temperature

复合材料学报. 2019, 36(12): 2932–2941 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190118.001

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 40 卷 第 12 期 12 月 2023 年
Vol. 40 No. 12 Dec 2023

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20230314.002

火灾高温后混凝土内 GFRP 筋剪切性能退化试验与理论

分享本文

陆春华*，漆仲浩，葛浩，张云舒，张虹宇
（江苏大学 土木工程与力学学院，镇江 212013）

摘 要：为研究火灾高温后混凝土内玻璃纤维增强树脂复合材料 (GFRP) 筋材的剪切性能，选取了 100℃、150℃、200℃、300℃、350℃、400℃、500℃、650℃ 及 800℃ 共 9 个温度工况，对混凝土内 GFRP 筋进行了高温作用及水平剪切试验；结合本试验及已有相关试验结果，对高温后混凝土内 GFRP 筋水平剪切强度预测方法进行了探讨。试验及分析结果表明：300℃ 高温以内，混凝土内 GFRP 筋表面温度存在滞后现象，其高温劣化程度明显低于裸筋，剪切强度退化也较缓慢；随着温度超过 300℃ 及混凝土表面裂缝不断发展，内部 GFRP 筋受高温侵蚀逐步加大，剪切强度出现急剧下降，并出现与裸筋相似的退化规律；在 300℃(接近树脂热分解温度) 高温下，GFRP 筋剪切强度随恒温时间的增加而线性下降，恒温 1~3 h 时其剪切强度保留率从 76.4% 降为 46.5%。结合双曲正切函数模型，建立了高温后混凝土内 GFRP 筋水平剪切强度预测模型，其预测值与试验值吻合较好。最后，以剪切强度保留系数 0.7 为基准，给出了不同保护层厚度下 GFRP 筋的耐火时间预测值，供工程应用参考。

关键词：火灾高温作用；GFRP 筋混凝土构件；水平剪切性能；预测模型；变异系数

中图分类号: TU524；TB33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2023)12-6756-10

Experimental and theoretical investigation on shear performance degradation of GFRP bars in concrete after fire and high temperature

LU Chunhua*, QI Zhonghao, GE Hao, ZHANG Yunshu, ZHANG Hongyu
(Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: To explore the shear performance of glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars in concrete after fire and high temperature, nine temperature conditions of 100°C, 150°C, 200°C, 300°C, 350°C, 400°C, 500°C, 650°C and 800°C were selected to treat the GFRP bars placed in concrete, and the horizontal shear tests were carried out on the obtained bar specimens. The method of predicting the horizontal shear strength of GFRP bars in concrete after exposure to high temperature was discussed using the results of this study and some existing tests. Test and analytical results show that within 300°C there is a hysteresis phenomenon in the surface temperature of GFRP bars in concrete. Their high temperature deterioration is significantly lower than that of the bare bars, as well as the shear strength degradation is also relatively slow. As the temperature exceeds 300°C and the concrete surface cracks continue to develop, the deterioration of embedded GFRP bars caused by high temperature gradually enlarges, meanwhile, the shear strength decreases sharply, which shows a similar degradation pattern to that of bare bars. At high temperature of 300°C which is close to the thermal decomposition temperature of resins, the shear strength retention rate of GFRP bars decreases linearly from 76.4% to 46.5% with the constant temperature time increasing

收稿日期：2023-01-03; **修回日期**：2023-03-08；**录用日期**：2023-03-09；**网络首发时间**：2023-03-15 17:19:11
网络首发地址：https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230314.002
基金项目：国家自然科学基金 (51878319; 51578267)
National Natural Science Foundation of China (51878319; 51578267)
通信作者：陆春华，博士，教授，硕士生/博士生导师，研究方向为混凝土结构基本性能及耐久性、FRP 筋混合配筋混凝土结构性能
E-mail: lch79@ujs.edu.cn
引用格式：陆春华，漆仲浩，葛浩，等. 火灾高温后混凝土内 GFRP 筋剪切性能退化试验与理论 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(12): 6756-6765.
LU Chunhua, QI Zhonghao, GE Hao, et al. Experimental and theoretical investigation on shear performance degradation of GFRP bars in concrete after fire and high temperature[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(12): 6756-6765(in Chinese).

from 1 h to 3 h. Based on the hyperbolic tangent function model, a prediction model for the horizontal shear strength of GFRP bars in concrete after high temperature was established and model's predictions were in good agreement with test values. Finally, considering a shear strength retention factor of 0.7, the predictions of fire resistance time of GFRP bars with different cover thickness were proposed, which can provide some references for engineering application.

Keywords： fire high temperature effect；GFRP-reinforced concrete element；horizontal shear performance；prediction model；coefficient of variation

纤维增强树脂复合材料 (Fiber reinforced polymer，FRP) 是以连续纤维为增强体、聚合物树脂为基体，经过浸润、固化等工序制备而成的新型复合材料，常以片材、筋材或型材的形式在土木工程中推广和应用。其中，玻璃纤维增强复合材料 (GFRP) 筋材凭借着其比强度高、耐腐蚀性能好、可设计性好等优点，被广泛应用于混凝土结构工程中，来解决因钢筋锈蚀而引起的混凝土结构耐久性退化问题[1-2]。然而，GFRP 筋在应用上也有一定的局限性，其中最突出的就是在火灾高温情况下，GFRP 筋中树脂基体会随温度升高而出现软化和分解，进而导致筋材力学性能发生退化[3]。

目前，国内外学者已对 GFRP 筋高温力学性能进行了大量研究，但大多数针对的是 GFRP 筋高温拉伸性能[4-6]。然而，在 GFRP 筋混凝土梁斜截面受剪性能分析中，GFRP 纵筋由于销栓作用而出现受剪状态。相对而言，热轧钢筋抗剪强度高，销栓作用通常不会引起其剪切破坏；而 GFRP 筋本身的抗剪强度较低，且火灾高温环境会加快筋材的性能退化，这可能导致高温后 GFRP 筋因销栓作用而发生剪切破坏。因此，在混凝土构件中，GFRP 筋的剪切性能值得关注和研究[7-8]。此外，在横向荷载作用下，受材料和生产工艺特性影响，FRP 筋材易先发生水平剪切破坏[8]。综上可知，对 GFRP 筋受高温后的水平剪切性能进行研究十分有意义。

发生火灾时，由于混凝土保护层的存在，混凝土内部的 GFRP 筋与空气中的裸筋相比，两者接触到的氧气的含量存在较大差异。同时火灾中空气温度场与混凝土内部温度场的发展过程有一定差异，后者存在明显的滞后性[9]。基于此，本文在考虑实际混凝土构件中筋材保护层厚度的前提下设计了 GFRP 筋混凝土试件，并采用三面受热的方式对试件进行高温作用，以期使内部 GFRP 筋受热更均匀；随后对火灾高温后混凝土内 GFRP 筋水平剪切性能的退化规律进行试验研究，主要探讨不同温度及恒温时间对其性能的影响。研究给出火灾高温作用后 GFRP 筋水平剪切强度退化模型和强度预测值，以期为 GFRP 筋混凝土结构的抗火设计及火灾后结构性能评估提供理论参考。

1 试验设计

1.1 试验材料及试件

已有研究表明[3-4]，随温度升高，GFRP 筋材的力学性能退化规律基本相似，均与树脂的玻化温度和热分解温度有关。基于此，本文选取以双酚 A 型环氧树脂为树脂基的 GFRP 筋作为试验筋材；其中，双酚 A 型环氧树脂是目前生产量最大、应用最广泛的环氧树脂基，对此类树脂基的 GFRP 筋进行研究有较好的应用和参考价值。该 GFRP 筋由江苏飞博尔新材料科技有限公司生产，直径为 12 mm，纤维体积率为 64%。由差示扫描量热法 (DSC) 测得其玻璃化温度 T_g 为 104.5℃，热分解温度 T_d 接近 300℃。筋材表面形态为纤维缠绕型，室温下呈轻微程度的白黄色。经测定，GFRP 筋基本力学性能见表 1。

混凝土设计强度等级为 C30，采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥。混凝土配合比及 28 天标准条件养护后的实测抗压强度如表 2 所示。

共制作 12 个混凝土试件，其横截面为 60 mm×60 mm 的正方形，GFRP 筋设置在试件中心，保护层厚度为 24 mm，如图 1(a) 所示。混凝土试件长度为 700 mm，浇筑完成的混凝土试件如图 1(b) 所示。

表 1 玻璃纤维增强树脂复合材料 (GFRP) 筋基本力学性能

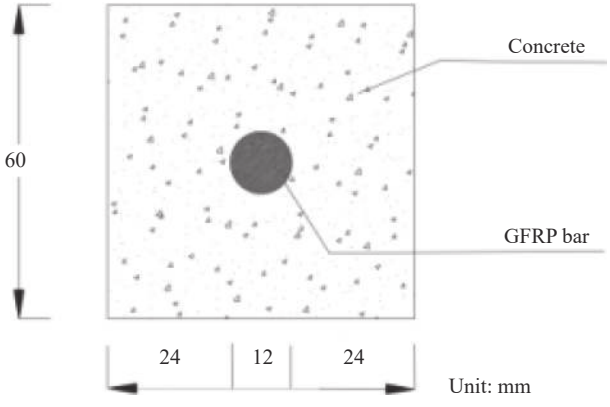
Table 1 Basic mechanical properties of glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars

Bar type	Tensile strength/MPa	Tensile elastic modulus/GPa	Bending strength/MPa	Horizontal shear strength/MPa
GFRP	884.6	32.8	875.8	47.7

表 2　混凝土配合比及基本参数

Table 2　Concrete mix ratio and basic parameters

Strength grade of concrete	Water binder ratio	Material/(kg·m^{-3})				Measured compressive strength/MPa
		Water	Cement	Sand	Stones	
C30	0.49	220	449	615	1 116	33.8



(a) Schematic diagram of cross section

(b) Actual picture of test specimens

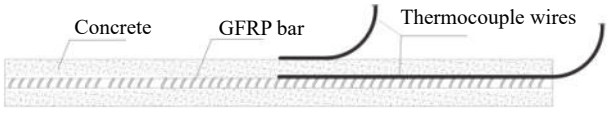
图 1　混凝土试件详图

Fig. 1　Detailed pictures of concrete specimens

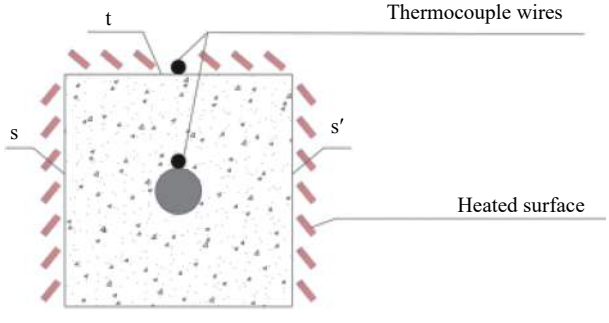
1.2　试验方案

使用江苏华东炉业有限公司生产的 HDX-48-10 型高温炉对试件进行高温处理。炉温可由仪器自带热电偶测得。混凝土表面及筋材表面温度通过固定的铠装热电偶测得，其允差等级为 I 级，允差值为 0.4%T_c，其中 T_c 为实测温度值。热电偶布置情况见图 2(a)。考虑到火灾作用情况，对构件采用三面受热的加热方式，如图 2(b) 所示。

为有效分析高温对 GFRP 筋材的影响，以筋材表面的温度作为设计计算温度，在考虑树脂玻璃化温度 T_g 及热分解温度 T_d 的基础上，共设计了 100℃(接近 T_g)、150℃、200℃、300℃(接近 T_d)、350℃、400℃、500℃、650℃ 及 800℃ 这 9 个温度工况 (以下分析中提到的温度工况，均是筋材表面的温度)。参照 ISO834[10] 中的室内标准火灾升温曲线，炉内升温速率取为 80℃/min，当温度超过设计工况温度约 30℃ 后保持恒温；此时，混凝土内 GFRP 筋表面的温度仍持续上升，在经过一定时间后可达到设计工况温度，整个升温过程约 2 h。随后，下调炉内温度至工况温度，并保持恒温 1 h。以 800℃ 工况为例，高温炉内、混凝土表面及 GFRP 筋表面的整个升温和恒温过程如图 3 所示。此外，为研究恒温时间对 GFRP 筋材水平剪切性能的影响，选取与树脂热分解温度 T_d 接近的 300℃ 作为分析温度，对 G12 筋进行恒温 2 h 和 3 h 处理后进行对比分析。



(a) Longitudinal section



(b) Cross section

t—Top surface; s—Side surface at left; s'—Side surface at right

图 2　混凝土试件的热电偶布置及受热面

Fig. 2　Thermocouple arrangement and heated surfaces of concrete specimens

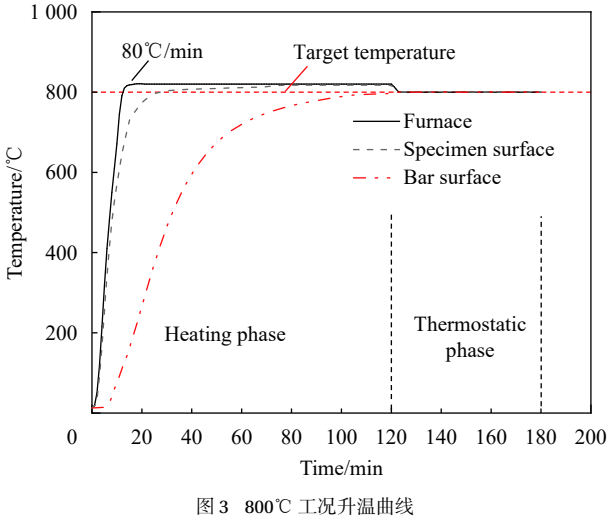


图 3　800℃ 工况升温曲线

Fig. 3　Heating curves under target temperature of 800°C

达到预期的温度作用后，将炉内温度降至 300℃ 以内后取出混凝土试件；经室温自然冷却后破碎取出内部 GFRP 筋，将其制作成水平剪切试件 (在每个混凝土试件中部位置截取 3 个 GFRP 筋剪切试件)。参考规范 GB/T13096—2008[11] 和 ASTM D4475-21[12]，采用短梁法对 GFRP 筋进行水平剪切试验，用于测定其层间剪切强度。试件跨径比取为 5，同时，为防止加载时试件两端与仪器滑脱，筋材两端各延伸一倍直径的长度，最终试件长度为 84 mm。试验在三思纵横 UTM 5350 型电子万能试验机上进行 (图 4)，采用位移控制方法进行加载，速率取为 3 mm/min。试验中，需要量测在筋材加载点处的荷载和竖向位移，而该荷载和位移可近似取为加载头施加的荷载及其竖向位移，它们的量值由试验机数据采集系统自动记录。

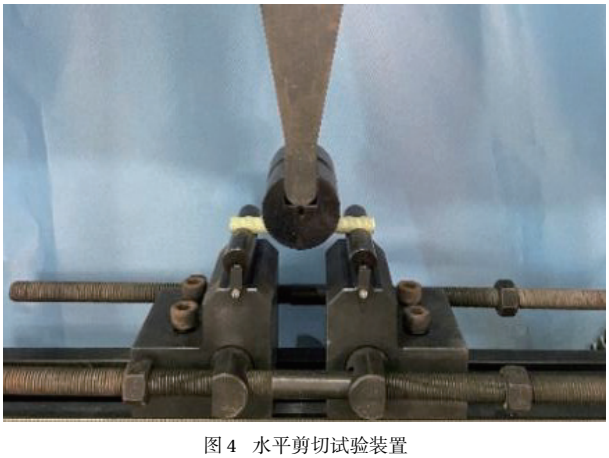


图 4　水平剪切试验装置

Fig. 4　Device for horizontal shear test

2　试验现象

2.1　高温后混凝土外观变化

图 5 给出了典型温度工况下混凝土试件的外观形貌。可以发现，不同高温作用后，试件的外观也呈现不同的变化。一方面，随工况温度的升高，其外观颜色逐渐由水泥灰色变为白灰色；另一方面，温度升高至一定程度后，在试件的上部受火面 t(图 2(b)) 上先出现裂缝，大致沿筋材布置方向开展，且发展较快成为通长裂缝；两个侧部受火面 s 与 s'上也随后出现裂缝，但宽度较小，发展也较缓慢。产生上述裂缝的主要原因在于[13]：在高温作用下，伴随着水分溢出、水泥石分解及骨料膨胀等反应的发生，混凝土内部产生的拉应力导致裂缝的产生和发展，并逐渐扩展至混凝土表面。具体而言，对于上部受火面上的裂缝，在温度工况 200℃ 以内时，并未出现该裂缝；当温度工况达到 300℃ 后，上部受火面开始出现裂缝 (见图 5 中线条处)；随着温度继续升高，裂缝发展速度逐渐增大；温度工况 350℃ 后，上表面裂缝已形成明显的纵向通长裂缝；此后，该裂缝继续急剧扩展，达到 500℃ 时，已变成宽度超过 2 mm 纵向通长裂缝。

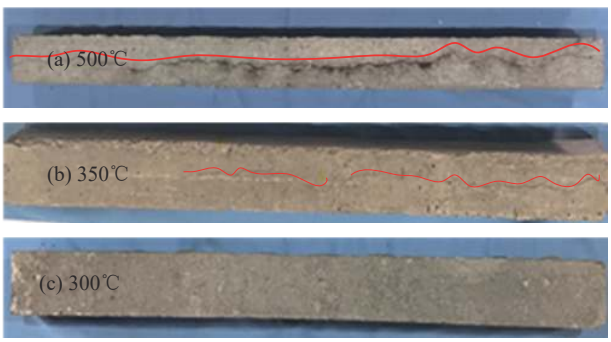


图 5　不同温度工况下混凝土外观变化

Fig. 5　Appearance changes of concrete under different temperature conditions

2.2　混凝土内 GFRP 筋表面温度滞后现象

在升温过程中，与混凝土表面的温度相比，筋材表面的温度存在明显的滞后，以 300℃、400℃ 和 500℃ 温度工况为例，两者的温度对比见图 6。可以看出，随着炉内温度上升，混凝土表面的温度也随之迅速上升，20 min 内达到设计工况温度；而与混凝土表面温度相比，GFRP 筋表面的温度升高出现明显的滞后，经 20 min 后筋材表面温度仅达到混凝土表面温度的 50% 左右；由此可见，由于混凝土保护层的存在，在高温环境下前 20 min

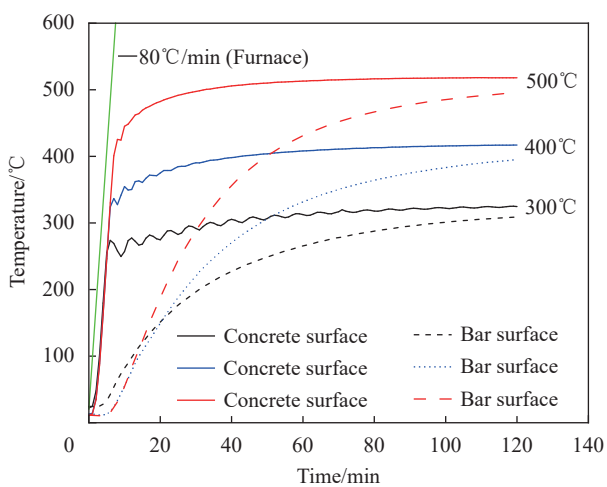


图 6　混凝土与筋材表面的升温过程对比

Fig. 6　Comparison of heating processes between the surfaces of concrete and bar

内筋材表面的温度发展较缓慢，约为同等条件下直接暴露时裸筋温度的一半。经共计 2 h 升温时间后，筋材表面的温度才能达到设计工况的温度。

2.3 高温后 GFRP 筋表观形态

高温作用后，对从混凝土中取出的 GFRP 筋进行外观形态观测，结果如图 7 所示。可以明显看出，筋材经历 100℃、150℃ 及 200℃ 温度作用后，表面颜色基本无变化；经历 300℃ 温度作用后，筋材表面颜色加深；350℃ 温度工况后，筋材表面颜色持续加深，且局部有纤维开始裸露；400℃ 温度作用后，筋材已完全呈黑褐色，且筋材表面的树脂基体完全分解，其纤维呈不同程度松散状；650℃ 工况后，筋材中的树脂完全分解，仅剩树脂热分解残留物和纤维。

图 7 高温后 GFRP 筋的外观形态

Fig. 7 Appearance of GFRP bars after exposure to high temperatures

3 试验结果分析

由 2.3 节分析可知，在经历 650℃ 和 800℃ 温度作用后，GFRP 筋中的树脂完全分解，已无法开展水平剪切试验。基于此，本文中仅对 20~500℃ 温度工况作用后的筋材进行水平剪切试验和结果分析。

3.1 GFRP 筋水平剪切荷载-位移曲线

图 8 给出了不同温度工况后水平剪切试件 (每组中选取 1 个试件) 的荷载-位移曲线。可以看出，在加载初期，曲线有一水平直线段；且该直线段随着作用温度的升高而变长。究其原因，主要有以下两个方面：一是由于带肋的 GFRP 筋与支座之间无法完全贴合，造成加载初期出现较大竖向位移；另一方面是由于高温作用使 GFRP 筋出现松散和膨胀，从而在加载初期使水平直线段增大。

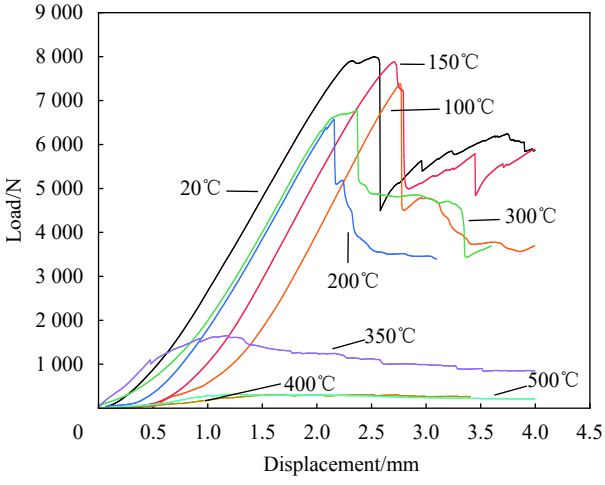


图 8 GFRP 筋水平剪切的荷载-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves of GFRP bars in horizontal shear tests

此后，随着作用荷载的增大，曲线开始逐步上升，但在 300°C 温度工况之前和 350°C 温度工况之后呈现两种完全不同的结果。在 20~300°C 的温度工况中，随工况温度升高，曲线上升趋势非常相似，直至最大荷载 (已发生剪切破坏) 后出现快速下降，随后曲线仍出现一定的上升或下降速度变缓。而当工况温度达到甚至超过 350°C 后，曲线的上升段非常短，达到最大荷载后开始缓慢下降；在 400℃ 温度工况后，曲线几乎变成一条水平直线，说明此时 GFRP 筋已基本丧失水平剪切承载能力。总体而言，在 20~500°C 范围内，GFRP 筋的水平剪切峰值荷载随工况温度升高而呈下降趋势，并在 300°C 温度工况前后出现明显的差异。

3.2 GFRP 筋水平剪切破坏特征

试验发现，同一温度工况下，试件的水平剪切破坏形态基本相似。选取每种工况中的典型试件对其破坏形态及端部水平裂缝进行详细观测，结果如图 9 所示。对于高温后未成松散状的筋材，在水平剪切试验中，均出现明显层间剪切破坏现象，且破坏形态与室温 (20℃) 测得的筋材破坏形态一致。其原因可解释为[8]：一方面，承受横向荷载时，水平应力先于横向应力诱导筋材产生层间剪切破坏；另一方面，高温作用后，树脂与纤维之间粘结力进一步降低，进而导致试件更易发生水平剪切破坏。因此，高温后混凝土内 GFRP 筋水平剪切破坏形式并未改变。

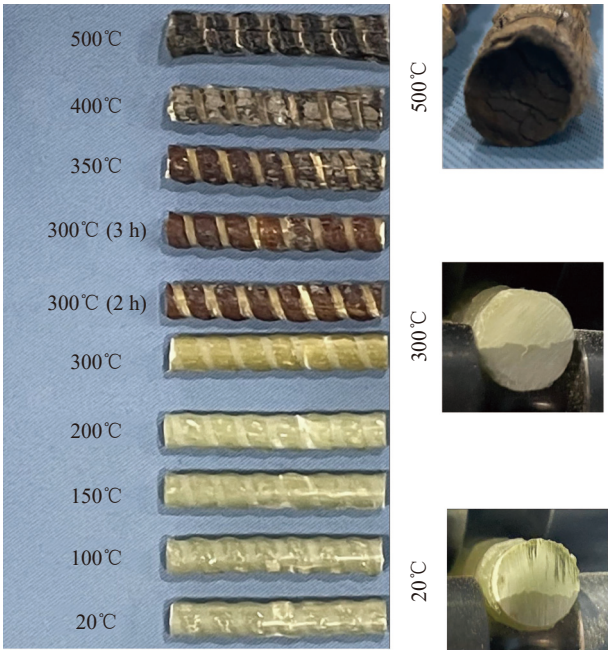


图 9 GFRP 筋的剪切破坏形态及端部详图

Fig. 9 Shear failure modes and end details of tested GFRP bars

3.3 GFRP 筋水平剪切残余强度

参照标准 ASTM D4475-21[12] 中给出的计算方法，采用短梁法测试的水平剪切强度可按下式进行计算：

$$S = 0.849F/D^2 \tag{1}$$

式中：S 为试件的水平剪切强度 (MPa)；D 为筋材的直径 (mm)；F 为试件破坏时的峰值荷载 (N)。

表 3 给出了不同温度工况 (恒温 1 h) 下 GFRP 筋水平剪切时的破坏荷载及其按式 (1) 计算得到的水平剪切强度。从结果来看，在 300°C 以内时，3 个试件实测结果的变异系数 COV 均小于 0.1，说明实测结果较稳定、离散性较小；当超过 300°C 后，相应的 COV 逐渐变大，表明离散性开始增大，这也与筋材外观形态变化的不均匀相符。以室温 (20℃) 时的水平剪切强度作为参考值，计算得到不同温度工况下 GFRP 筋水平剪切强度保留率 R，其结果同样列于表 3 中。

图 10(a) 以保留率的形式给出了不同温度工况后混凝土内 GFRP 筋水平剪切强度变化曲线。如图所示，20~500℃ 工况温度范围内，筋材水平剪切强度呈阶段性退化。工况温度在 100~150℃ 时 (在 T_g 附近)，筋材水平剪切强度缓慢下降，其保留率分别为 93.1% 和 91.6%；工况温度升高至 200~300℃ 后 (远高于 T_g、逐渐接近 T_d)，筋材水平剪切强度下降速度略有增大，保留率降为 82.3% 和 76.4%。与课题组前期开展的裸 GFRP 筋剪切性能的温度效应相比[14]，当工况温度升高到 300℃(接近筋材树脂基体热分解温度 T_d) 时，水平剪切强度保留率已急剧下降，具体见图 10(a) 中的虚线结果。究其原因，可以认为混凝土保护层为筋材提供了良好的保护作用。具体而言，当工况温度在 300℃(接近 T_d) 以内时，混凝土试件表面未出现明显开裂，内部的筋材未与外部空气直接接触，筋材的树脂基体分解速率较慢，从而不会出现水平剪切强度急剧下降的现象。

由图 5 可知，当工况温度高于 350°C 后，混凝土试件表面出现较大尺寸的裂缝；相应地，对比 300℃ 温度工况时的筋材，350℃ 温度工况后筋材表面的树脂分解程度更加明显 (图 7)。因此，在 350°C 温度工况后，混凝土内 GFRP 筋的水平剪切强度保留率骤降为 16.58%，下降趋势与裸筋相似。500℃ 工况后，筋材水平剪切强度保留率仅为 3.7%，可认为已基本失去水平剪切承载能力。

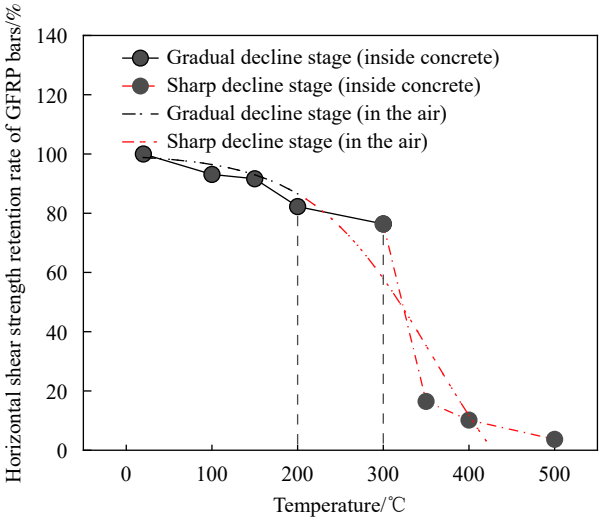
表 4 给出了温度工况 300℃ 时不同恒温时间

表 3 不同温度工况下 GFRP 筋的水平剪切强度及保留率

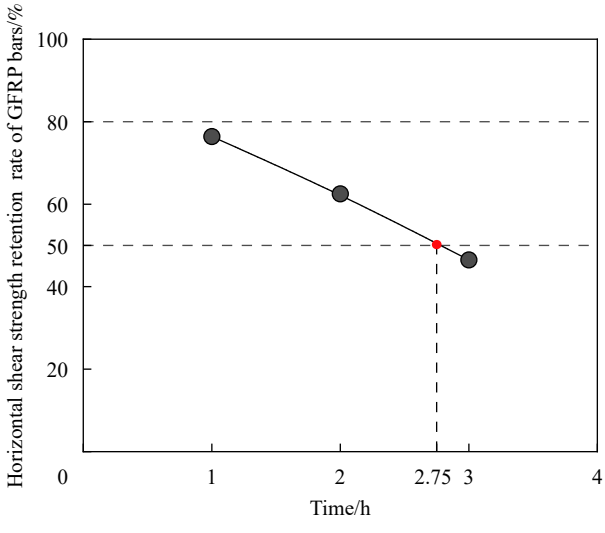
Table 3 Horizontal shear strength and retention rate of GFRP bars under different temperature conditions

T/℃	F/N			S/MPa			Statistical characteristics		R/%
	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	μ/MPa	COV	
20	7 995.3	8 607.5	7 656.2	47.1	50.8	45.1	47.7	0.06	100.0
100	7 791.4	7 415.2	7 379.4	45.9	43.7	43.5	44.4	0.03	93.1
150	6 976.8	7 375.1	7 878.1	41.1	43.5	46.5	43.7	0.06	91.6
200	6 480.6	6 766.1	6 707.3	38.2	39.9	39.6	39.2	0.02	82.3
300	6 564.2	5 134.5	6 827.3	38.7	30.3	40.3	36.4	0.15	76.4
350	1 654.7	1 006.1	1 335.2	9.8	5.9	7.9	7.9	0.24	16.5
400	315.5	1 333.5	–	1.9	7.9	–	4.9	0.87	10.2
500	266.9	326.1	–	1.6	1.9	–	1.7	0.14	3.7

Notes: T—Temperature; F—Maximum load; S—Horizontal shear strength; μ—Average value; COV—Coefficient of variation; R—Retention rate of horizontal shear strength.



(a) Different temperature conditions with constant temperature time of 1 h



(b) Different constant temperature time at temperature condition of 300℃

图 10　高温后混凝土内 GFRP 筋水平剪切强度保留率

Fig. 10　Retention rate of horizontal shear strength of GFRP bars embedded in concrete after high temperature

下筋材水平剪切强度及保留率。基于此，图 10(b) 给出了恒温时间对 GFRP 筋水平剪切强度保留率的影响关系。可知，300℃ 温度下，随恒温时间增加，筋材水平剪切强度保留率呈线性下降趋势。分析可知，当温度达到树脂 T_d 后，即使混凝土未开裂，筋材的强度保留率仍会随恒温时间增加而降低，上述现象在裸筋研究中也有发现[14]。综上可以发现，当工况温度接近筋材树脂 T_d 时，混凝土保护层对筋材有一定的保护作用，但这种保护作用具有时限性。如图 10(b) 中显示，3 h 恒温后，混凝土内筋材水平剪切强度保留率已下降至 50% 以下。即随温度作用时间增加，混凝土对其内部筋材的保护作用逐渐减弱。

4　火灾高温作用后 GFRP 筋强度预测及其耐火时间

4.1　FRP 裸筋高温力学性能预测模型

试验数据表明，随温度升高，FRP 筋材力学性能变化呈规律性。近年来，国内外学者对 FRP 裸筋的高温力学性能 (以拉伸性能为主) 进行了一定的研究，并提出了不同的筋材性能退化规律预测模型。这里，为统一表达，用 $f_{u,0}$ 与 $f_{u,T}$ 分别表示高温作用前后筋材的某一项力学强度指标。

Saafi[15] 仅考虑作用温度因素，提出了高温下 GFRP 裸筋拉伸强度随作用温度的线性退化模型：

$$\frac{f_{u,T}}{f_{u,0}}=\begin{cases}1-0.0025T & 0\leqslant T\leq 400\\ 0 & 400\leqslant T\end{cases} \tag{2}$$

Nigro 等[16] 以幂函数的形式给出了高温下 GFRP 裸筋拉伸强度退化模型：

$$\frac{f_{u,T}}{f_{u,0}}=\frac{0.05}{0.05+8.0\times10^{-11}T^{3.55}} \tag{3}$$

但同样仅考虑了作用温度。Zhou 等[17] 将初始温度 T_0 考虑在内，提出了高温后 GFRP 裸筋拉伸强度随温度升高的幂函数退化模型：

$$\frac{f_{u,T}}{f_{u,0}}=1-1.136\times10^{-9}(T-T_0)^{3.439} \tag{4}$$

部分学者对 FRP 裸筋高温力学性能规律 (包括拉伸、弯曲和剪切性能等) 进行了全面研究，并提出了统一的函数形式用于预测筋材的强度 (拉伸、弯曲和剪切强度等)、弹性模量等。Mouritz 等[18] 在考虑到树脂基体残余量对筋材残余力学性能影响的基础上提出了双曲正切函数预测模型：

表 4　300℃ 下不同恒温时间 t 作用后 GFRP 筋水平剪切强度及保留率

Table 4　Horizontal shear strength and retention rate of GFRP bars after different constant temperature time t at 300℃

t/h	F/N			S/MPa			Statistical characteristics		R/%
	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	μ/MPa	COV	
1	6 563.3	5 134.4	6 828.3	38.7	30.3	40.3	36.4	0.15	76.4
2	5 784.6	4 268.1	5 111.3	34.1	25.2	30.1	29.8	0.15	62.5
3	4 315.8	3 798.1	3 232.1	25.5	22.4	19.1	22.3	0.14	46.5

$$P(T)=P_{\mathrm{U}}-\frac{P_{\mathrm{U}}-P_{\mathrm{R}}}{2}[1+\tanh(k(T-T_{\mathrm{d}}))] \tag{5}$$

式中：P_{U} 与 P_{R} 分别为树脂基体完好和完全分解时的筋材残余力学性能；k 为拟合参数。

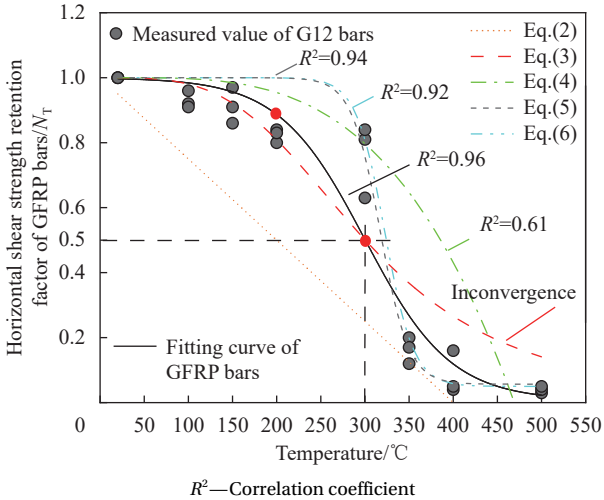
Bisby[19] 基于已有研究，总结并提出了双曲正切函数模型：

$$\frac{f_{\mathrm{u},T}}{f_{\mathrm{u},0}}=\left(\frac{1-a}{2}\right)\tanh[-b(T-c)]+\left(\frac{1+a}{2}\right) \tag{6}$$

式中：a、b、c 为与筋材类型、树脂基体类型相关的参数，可由试验数据拟合分析得出。

4.2 高温后混凝土内 GFRP 筋水平剪切强度预测

基于已有预测模型，根据试验结果对 GFRP 筋水平剪切强度随工况温度的变化规律进行分析与拟合，结果如图 11 所示。



R^2—Correlation coefficient

图 11 高温后混凝土内 GFRP 筋水平剪切强度预测模型对比分析

Fig. 11 Comparative analysis of prediction models for horizontal shear strength of GFRP bars embedded in concrete after high temperature

从图 11 可以看出，与式 (5) 和式 (6) 相比，式 (2)、式 (3) 和式 (4) 与试验结果拟合效果较差，不适用于预测混凝土内 GFRP 筋高温后水平剪切强度。本文参考式 (5) 和式 (6)，同时考虑树脂完全分解后的水平剪切强度保留率 (近似取 P_{R}=0.05P_{U}) 与树脂热分解温度 T_{d}，提出高温后混凝土内 GFRP 筋水平剪切强度随温度变化的预测模型，见下式：

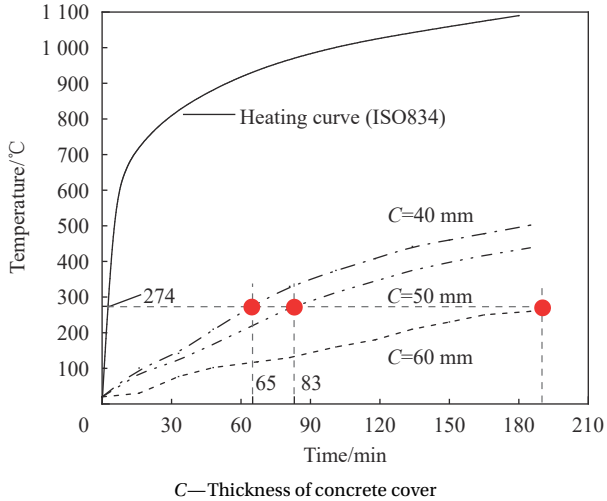
$$\frac{f_{\mathrm{u},T}}{f_{\mathrm{u},0}}=N_{\mathrm{T}}=0.525-0.475\tanh[k(T-n)] \tag{7}$$

式中：N_{T} 为 GFRP 筋水平剪切强度保留系数；n 为与筋材树脂热分解温度相关的参数。经拟合，得到 k 值为 0.015，n 值为 299.7；相关拟合曲线与试验结果的对比见图 11。

4.3 基于水平剪切强度的混凝土内 GFRP 筋耐火时间

在高温环境中，与钢筋相比，FRP 筋的力学性能更易受高温影响，其承载力也更早地开始下降[4]。钢筋混凝土结构设计相关规范中[20-21]，对于一级耐火等级民用建筑中的梁构件，设计要求耐火极限为 2 h。一般而言，保护层厚度越大，构件的耐火时间就越长，更容易满足规范要求。

在我国规范中[21]，对一~三类环境类别中的混凝土梁，规定的最小保护层厚度 C_{min} 为 20~50 mm。这里，考虑到火灾高温下对混凝土构件的保护层厚度 C 要求较高，选取 C 为 40~60 mm 进行分析。Hajiloo 等[22] 对高温下混凝土内部的温度场进行了试验研究 (该混凝土的 28 天圆柱体抗压强度实测值为 28.9 MPa，与本文的 C30 混凝土强度相当)，得到受火深度 40~60 mm 处 (等同于保护层厚度) 的温度随时间的变化情况，见图 12。可以看出，与室内标准火灾升温曲线 (ISO834[10]) 相比，混凝土内温度的升高过程存在明显的滞后，且随保护层厚度增加，滞后效应越明显。



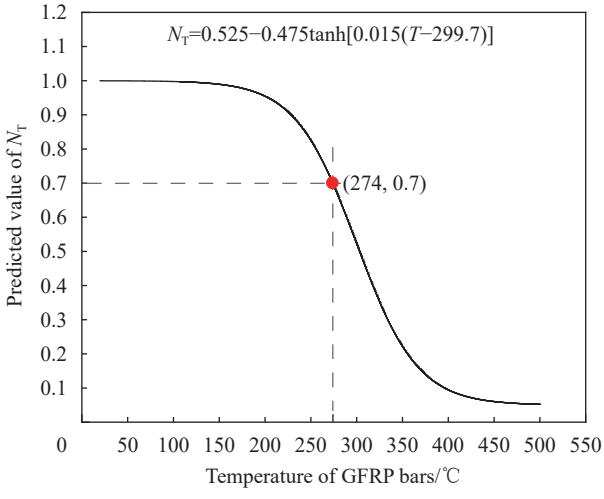
C—Thickness of concrete cover

图 12 火灾中混凝土构件内部温度场

Fig. 12 Temperature fields inside concrete components in fires

ACI 440.1 R-15[23] 指南中考虑环境对 FRP 筋力学性能的影响，将设计抗拉强度的环境折减系数取为 0.7。参照上述取值要求，本文将 GFRP 筋的水平剪切强度保留系数 N_{T} 也取为 0.7，并以此为条件分析不同保护层厚度情况下构件的耐火时间。结合火灾中混凝土构件内部温度场 (图 12) 及高温后 GFRP 筋水平剪切强度的预测模型 (图 13)，以 N_{T}=0.7 为筋材水平剪切强度的设计保留系数，得

到了火灾高温中不同混凝土保护层厚度时 GFRP 筋水平剪切性能退化到设计临界点的耐火时间 t_f，结果如表 5 所示。显然，受混凝土内部温度滞后效应的影响，随着保护层厚度 C 的逐渐增加，t_f 也随之增大。需要指出的是，这里给出的耐火时间仅是基于 GFRP 筋的水平抗剪强度退化分析得到的，不能直接用于结构的耐火极限的评价；但相关分析方法和结论可为 GFRP 筋混凝土结构的耐火设计分析和火灾后结构性能评估提供一定参考。



N_T—Shear strength retention coefficient; T—Temperature

图 13　GFRP 筋水平剪切强度保留系数预测值

Fig. 13　Prediction values for horizontal shear strength retention factor of GFRP bars after high temperature

表 5　不同保护层厚度下 GFRP 筋的耐火时间

Table 5　Fire resistance time for GFRP bars with different cover thickness

Case	C/mm	t_f
Case one	40	65
Case two	50	83
Case three	60	190

Note: t_f—Fire resistance time.

5　结 论

通过对火灾高温作用后混凝土内玻璃纤维增强树脂复合材料 (GFRP) 筋的水平剪切强度试验研究，对该类筋材的水平剪切强度退化规律及预测模型进行了分析与探讨。研究得到的主要结论有：

(1) 火灾高温环境中，与混凝土表面相比，其内部 GFRP 筋表面存在明显的温度滞后现象；

(2) 温度在 300℃ 以内时，未开裂的混凝土保护层可有效防止热量和氧气与筋材接触，延缓树脂热分解，使筋材仍有较高的水平剪切强度保留率，且明显高于裸筋；

(3) 随着温度和恒温时间的增加，混凝土裂缝的发展导致混凝土保护层对其内部筋材的保护作用逐渐消失；350℃ 温度工况后，混凝土内部筋材剪切性能随温度的退化趋势接近于裸筋；

(4) 在 20~300℃ 内，当温度超过树脂基玻璃化温度 T_g 后，混凝土内 GFRP 筋水平剪切强度下降较缓慢；对于 300℃ 以上温度工况，即当温度超过树脂基热分解温度 T_d 后，混凝土内筋材水平剪切强度开始急剧下降，350℃ 温度工况后，保留率仅为 16.5%；

(5) 通过对实验结果的拟合分析，得到了 20~500℃ 温度内，混凝土内 GFRP 筋水平剪切强度预测模型，模型计算值与实测值较符合。同时，综合考虑火灾下混凝土内部温度场的发展规律，基于给定水平剪切强度保留系数给出了不同保护层厚度下 GFRP 筋的耐火时间。

参考文献：

[1] 叶列平, 冯鹏. FRP在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3)：24-36.
YE Lieping, FENG Peng. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3)：24-36(in Chinese).

[2] 陆春华, 吴小龙, 徐可, 等. 普通/钢纤维混凝土混合配筋梁裂缝和挠度计算分析[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2022, 44(2)：197-206.
LU Chunhua, WU Xiaolong, XU Ke, et al. Calculation analysis of the cracking and deflection of ordinary/steel fiber concrete hybrid-reinforced beams[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2022, 44(2)：197-206(in Chinese).

[3] 王晓璐, 查晓雄. 高温下GFRP筋力学性能的试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2011, 39(9)：75-81.
WANG Xiaolu, CHA Xiaoxiong. Experimental investigation into mechanical behavior of GFRP rebars at elevated temperature[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 39(9)：75-81(in Chinese).

[4] 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).

[5] ASHRAFI H, BAZLI M, NAJAFABADI E P, et al. The effect of mechanical and thermal properties of FRP bars on their tensile performance under elevated temperatures[J]. Con-

struction and Building Materials，2017，157：1001-1010.

[6] 朱德举, 徐旭锋, 郭帅成, 等. 高温后玄武岩和玻璃纤维增强复合材料筋的力学性能[J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2021, 48(7)：151-159.
ZHU Deju, XU Xufeng, GUO Shuaicheng, et al. Mechanical properties of basalt and glass fiber reinforced polymer tendons after exposed to elevated temperatures[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences)，2021，48(7)：151-159(in Chinese).

[7] GUO X K, XIONG C S, JIN Z Q, et al. A review on mechanical properties of FRP bars subjected to seawater sea sand concrete environmental effects[J]. Journal of Building Engineering，2022，58(15)：105038.

[8] AHMAD S M. Shear properties and durability of GFRP reinforcement bar aged in seawater[J]. Polymer Testing，2019，75：312-320.

[9] 屈凯. 真实火灾下钢筋混凝土板温度场有限元分析[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(6)：1815-1821.
QU Kai. FFinite element analysis on temperature distribution of reinforced concrete slabs in natural fire[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society，2020，39(6)：1815-1821(in Chinese).

[10] International Standards Organization (ISO). Fire resistance tests-Elements of building construction—Part 1: General requirements: ISO 834-1[S]. Geneve: International Organization for Standardization, 1999.

[11] 中国国家标准化管理委员会. 拉挤玻璃纤维增强塑料杆力学性能试验方法: GB/T 13096—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method for mechanical properties of pultruded glass fiber reinforced plastic rods: GB/T 13096—2008[S]. Beijing: China Standards Press, 2009(in Chinese).

[12] American Society for Testing and Materials. Standard test method for apparent horizontal shear strength of pultruded reinforced plastic rods by the short-beam method: ASTM D4475-21[S]. West Conshohocken: ASTM, 2021.

[13] 金浏, 张仁波, 杜修力, 等. 温度对混凝土结构力学性能影响的研究进展[J]. 土木工程学报, 2021, 54(3)：1-18.
JIN Liu, ZHANG Renbo, DU Xiuli, et al. Research progress on the influence of temperature on the mechanical performance of concrete structures[J]. China Civil Engineering Journal，2021，54(3)：1-18(in Chinese).

[14] 蔡启明, 陆春华, 延永东, 等. BFRP和GFRP筋剪切性能的温度效应[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(4)：395-400.
CAI Qiming, LU Chunhua, YAN Yongdong, et al. Temperature effect on shear properties of BFRP and GFRP bar[J]. Journal of Building Materials，2022，25(4)：395-400(in Chinese).

[15] SAAFI M. Effect of fire on FRP reinforced concrete members[J]. Composite Structures，2002，58(1)：11-20.

[16] NIGRO E, CEFARELLI G, BILOTTA A, et al. Guidelines for flexural resistance of FRP reinforced concrete slabs and beams in fire[J]. Composites Part B: Engineering，2014，58：103-112.

[17] ZHOU C H, PAN J J, ZHANG Z H, et al. Comparative study on the tensile mechanical behavior of GFRP bars under and after high temperature exposure[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16: e00905.

[18] MOURITZ A P, GIBSON A G. Fire properties of polymer composite materials[M]. Dordrecht: Springer, 2006.

[19] BISBY L A. Fire behaviour of fibre-reinforced polymer (FRP) reinforced or confined concrete[D]. Kingston: Queen's University at Kingston, 2003.

[20] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 建筑设计防火规范: GB/T 50016—2014(2018)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Code for fire protection design of buildings: GB/T 50016—2014(2018)[S]. Beijing: China Planning Press, 2018(in Chinese).

[21] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构设计规范: GB/T 50010—2010(2015)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Code for design of concrete structures: GB/T 50010—2010(2015)[S]. Beijing: China Architecture Press, 2015(in Chinese).

[22] HAJILOO H, GERRN M F, NOËL M, et al. Fire tests on full-scale FRP reinforced concrete slabs[J]. Composite Structures，2017，179：705-719.

[23] American Concrete Institute. Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars: ACI 440.1 R-15[S]. Farmington Hills: ACI, 2015.