

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201904084

# GHPFRCC 框架梁抗火性能试验研究\*

李秀领, 蔡 帅, 闫庆喜

(山东建筑大学土木工程学院, 建筑结构加固改造与地下空间工程教育部重点实验室, 山东 济南 250101)

**摘要:** 绿色高性能纤维增强水泥基复合材料 (green high-performance fiber-reinforced cementitious composites, GHPFRCC) 是在传统 ECC 基础上加入大掺量粉煤灰制成的一种新型绿色建筑材料。GHPFRCC 具有高延性特点, 很适合用于框架梁、柱及节点, 但 GHPFRCC 框架梁作为一种新型结构其抗火性能研究较少, 为了探明 GHPFRCC 框架梁的抗火性能, 进行 10 根 GHPFRCC 框架梁的耐火试验, 研究荷载比、纵筋率、剪跨比等因素对火灾下 GHPFRCC 框架梁的跨中挠度、温度场分布的影响。试验结果表明, 火灾下 GHPFRCC 框架梁升温速度最快的是梁底面, 速度最慢的是梁顶面; 剪跨比为火灾下 GHPFRCC 框架梁破坏形态的主要影响因素; 跨中挠度曲线近似线性下降, 且剪跨比越大, 跨中挠度下降斜率越大; 纵筋率可有限提高 GHPFRCC 框架梁的抗剪承载力, 箍筋对保证火灾下 GHPFRCC 框架梁的抗剪性能至关重要。

**关键词:** 绿色高性能纤维增强水泥基复合材料 (GHPFRCC); 三面受火; 剪跨比; 框架梁; 抗火性能

**中图分类号:** TU375.1   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2021)05-0954-06

## Experimental Study on Fire-resistance Properties of Green High-performance Fiber-reinforced Cementitious Composites Frame Beams

LI Xiuling, CAI Shuai, YAN Qingxi

(School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Key Laboratory of Building structural Retrofitting and Underground Space Engineering of Ministry of Education, Jinan 250101, China)

**Abstract:** Green high-performance fiber-reinforced cementitious composites (GHPFRCC) is a new type of green building material that is based on the traditional engineered cementitious composites (ECC) and mixed with a large amount of fly ash. GHPFRCC has high ductility and is suitable for frame beams, columns and joints. However, as a new type of structure, the fire resistance of GHPFRCC frame beams has not well understood. In order to find out the fire resistance of GHPFRCC frame beams, fire resistance tests on 10 GHPFRCC frame beams were carried out to study the effects of load ratio, longitudinal reinforcement ratio, and shear span ratio on the mid-span deflection and temperature field distribution of GHPFRCC frame beams under fire. The experimental results show that the fastest heating rate of GHPFRCC frame beams under fire is found in the bottom of the beam section, and the slowest is for the top of the beam. Shear span ratio is the main factor affecting the failure

\* 收稿日期: 2019-09-26; 修回日期: 2019-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51108253; 51278290)、长江学者和创新团队发展计划教育部创新团队 (IRT13075) 资助

作者简介: 李秀领 (1977—), 男, 教授, 博士。主要从事高性能结构减灾方面的研究。E-mail: dlutiem@163.com

通讯作者: 蔡帅 (1994—), 男, 硕士研究生。主要从事高性能结构减灾方面的研究。E-mail: 1214200868@qq.com

mode of GHPFRCC frame beams under fire. The mid-span deflection curve of the GHPFRCC frame beams decreases approximately linearly, and the larger the shear-span ratio, the larger the mid-span deflection decline slope. The longitudinal reinforcement ratio can slightly improve the shear capacity of GHPFRCC frame beams. The stirrups are very important to ensure the shear performance of GHPFRCC frame beams under fire.

**Keywords:** GHPFRCC; three-sided fire; shear-span ratio; frame beam; fire resistance

## 引言

混凝土是目前世界上应用最广的建筑材料之一,但其存在抗拉强度低、脆性大的缺点,利用纤维增强混凝土的性能成为该领域研究热点<sup>[1]</sup>。20世纪90年代,美国密歇根大学 Victor Li 教授利用断裂力学和微观力学原理成功研制 ECC (Engineered Cementitious Composites), 该材料是在水泥基中添加随机分布的短纤维如 PVA (Polyvinyl Alcohol) 纤维作为增强材料的一种高性能材料<sup>[2]</sup>。ECC 具有优异的裂缝抑制能力和超高韧性,能够弥补混凝土缺陷<sup>[3]</sup>。国内外学者对 ECC 的配合比设计、制备工艺、力学性能等进行了大量研究<sup>[4-6]</sup>。

基于绿色发展理念,李秀领在传统 ECC 基础上,以大掺量粉煤灰代替水泥,通过正交试验方法进行了绿色高性能纤维增强水泥基复合材料 (green high-performance fiber-reinforced cementitious composites, GHPFRCC) 配合比设计,测定其流动度和保水性能,进行直接拉伸、抗压及抗弯等力学性能试验。结果表明,GHPFRCC 具有高延性特点,很适合用于框架梁、柱及节点<sup>[7-9]</sup>。但 GHPFRCC 框架梁作为一种新型结构其抗火性能研究较少<sup>[10]</sup>。

为了探明 GHPFRCC 框架梁的抗火性能,本文考虑荷载比、纵筋率、剪跨比等三个因素进行无交互正交试验设计,制作 10 根 GHPFRCC 框架梁,然后进行三面受火试验,研究火灾下的挠度变化、温度场分布等抗火性能。

## 1 试验概况

### 1.1 试件制作

制作 10 根尺寸为 200 mm × 300 mm × 2 000 mm 的 GHPFRCC 框架梁,养护 28 d。其中,GHPFRCC 采用最佳配合比<sup>[11]</sup>,纵筋为 HRB400。考虑荷载比、纵筋率、剪跨比三个因素进行无交互正交

试验设计(表 1),得到 9 个无腹筋 GHPFRCC 梁和 1 个配有箍筋的 GHPFRCC 梁(表 2)。荷载比为试验施加荷载与梁极限荷载的比值。试验时梁两端简支,支座距梁端 100 mm。GHPFRCC 框架梁配筋如图 1 与图 2 所示。试验加载装置及测点布置如图 3 所示,热电偶设置在梁跨度三等分点截面处,距梁端 700 mm,截面内热电偶的布置如图 4 所示。

表 1 三因素三水平设计

Table 1 Three-factor three-level design

荷载比	纵筋率/%	剪跨比
0.15	1.78	0.75
0.25	1.43	2.07
0.35	1.13	3.38

表 2 GHPFRCC 框架梁工况

Table 2 Test cases of GHPFRCC frame beams

构件编号	荷载比	纵筋率/%	配箍率/%	有效高度/mm	剪跨长度/mm	剪跨比
GHPF-1	0.15	1.78	0	265	200	0.75
GHPF-2	0.15	1.43	0	266	550	2.07
GHPF-3	0.15	1.13	0	267	900	3.38
GHPF-4	0.25	1.78	0	265	550	2.07
GHPF-5	0.25	1.43	0	266	900	3.38
GHPF-6	0.25	1.13	0	267	200	0.75
GHPF-7	0.35	1.78	0	265	900	3.38
GHPF-8	0.35	1.43	0	266	200	0.75
GHPF-9	0.35	1.13	0	267	550	2.07
GHPF-10	0.25	1.43	0.25	266	550	2.07

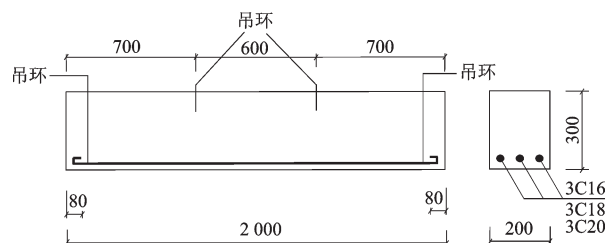


图 1 GHPF-1 至 GHPF-9(纵筋不同)试件尺寸及钢筋分布  
Fig.1 Dimension and reinforcement of the test specimens  
GHPF-1 to GHPF-9 (different longitudinal rib ratios)

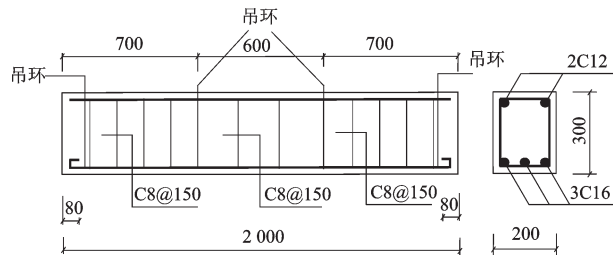


图2 GHPF-10试件尺寸及钢筋分布

Fig.2 Dimension and reinforcement of the test specimen GHPF-10

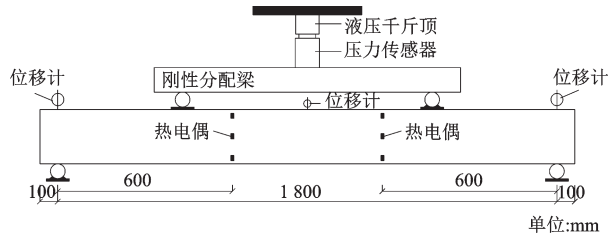


图3 加载装置及测点布置

Fig.3 Loading device and layout of measuring points

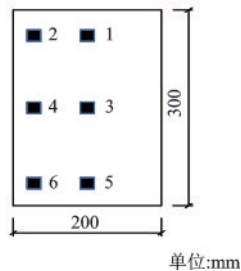


图4 截面热电偶分布

Fig.4 Layout of thermocouples in the beam cross-section

## 1.2 试验方案

采用三面受火方式对GHPFRCC框架梁进行耐火试验,其中升温方式采用ISO834标准升温曲线,受火时间为90 min,降温阶段采取强制通风冷却。结构火灾试验包括恒载-升温 and 恒温-加载两种工况,而实际结构发生火灾时多为第一种工况,本试验采用恒载-升温工况进行火灾试验。为了模拟GHPFRCC框架梁的实际受力情况,采用千斤顶施加集中荷载,千斤顶由液压伺服压力试验机控制。首先预加载至设计荷载的20%以检查各个系统的正常运转及各个通道的连通情况,然后卸载,再重新加载,每级持荷2 min,分10级加载至设计荷载。梁在火灾炉内的放置如图5所示,试验加载及测点布置如图6所示。

## 1.3 试验现象及其分析

从观察口可以看到试验炉中的构件侧面下部

呈亮红色,从下向上试件颜色由红色逐渐变暗,顶部仍为青灰色,与常温没有区别。梁受火后的主要



图5 炉内简支梁放置

Fig.5 Placement diagram of the simply supported beam in the furnace



图6 试验加载及测点现场

Fig.6 Photographs of the load test and measuring points

破坏特征为:梁侧面和底面出现不同程度的龟裂,部分保护层严重脱落、钢筋外露,但在未受火的顶部几乎没有裂缝。

火灾时GHPFRCC梁内PVA纤维熔化形成了连通孔隙,在快速升温时硬化的水泥浆体阻塞孔道将延滞水蒸气溢出,试件内部产生较大的蒸汽压力,导致GHPFRCC梁侧面出现密集裂缝甚至表皮脱落现象。一部分GHPFRCC梁由于剪跨比或荷载比过大,在荷载与高温共同作用下达到耐火极限而瞬间裂成大小不一的碎块,部分钢筋直接暴露在高温环境中,导致GHPFRCC梁过早破坏。

## 1.4 火灾中温度场分析

GHPFRCC框架梁截面温度上升曲线如图7所示。

由图7可知,GHPFRCC梁的测点1和测点2最高温度为100℃左右,上升斜率较小,这是因为测点1和测点2位于梁顶部,远离受火面。测点3和测点4最高温度为200℃左右,上升斜率和测点1、2相差不大,这说明GHPFRCC框架梁具有很好的热惰

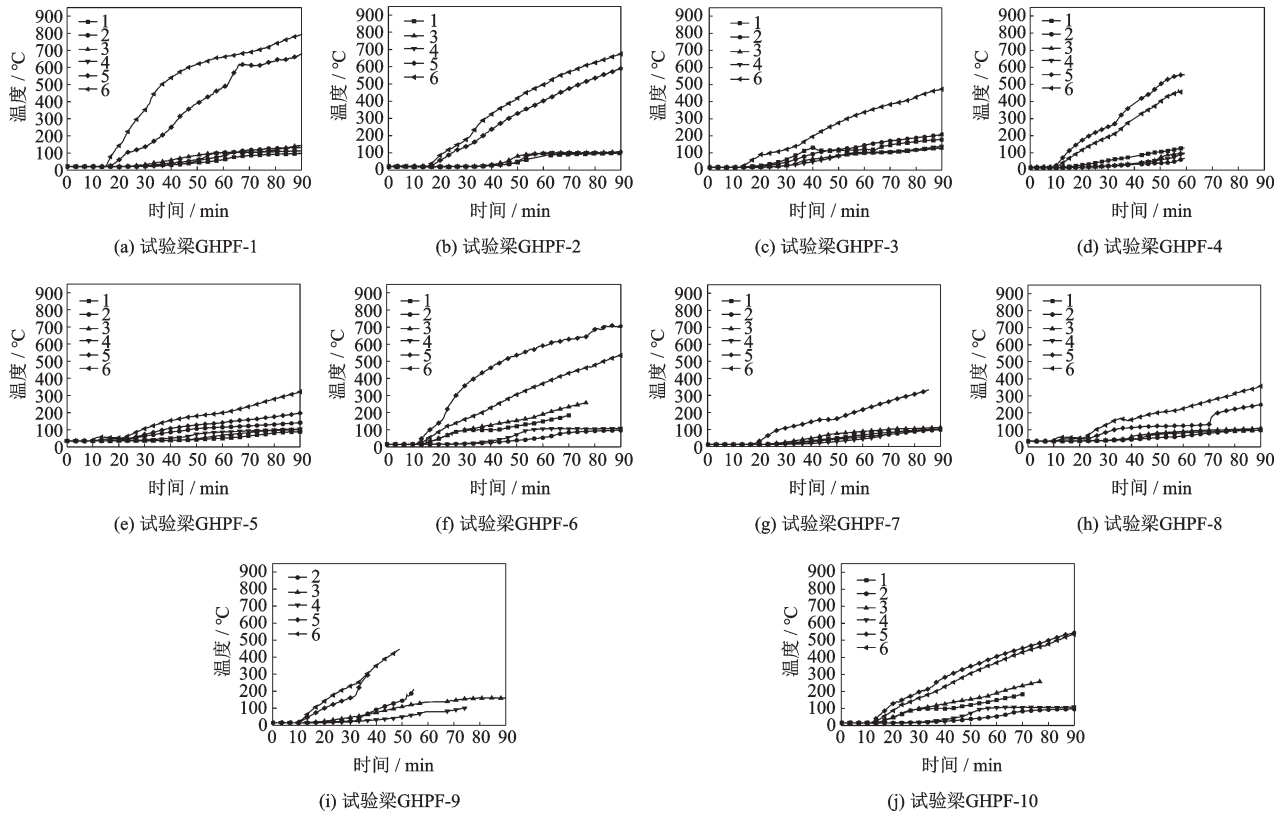


图7 各试件梁截面温度曲线

Fig.7 Temperature curves of cross-sections of GHPFRCC frame beams

性,GHPFRCC框架梁受火面处PVA纤维熔化后产生连通的孔隙,水蒸气溢出带走梁的部分热量,使梁内温度上升较慢,延迟了梁的破坏,提高了GHPFRCC框架梁的抗火性能。测点5和测点6处由于处于直接受火面其温度上升较快,受火温度也最高;其中20~30 min温度上升速率最大,此后上升速率变缓,测点6(底面角部)最高温度和上升速率均比测点5大,这说明三面受火GHPFRCC框架梁最高温度发生在梁底面角落处。

比较剪跨比为0.75的构件GHPF-1、GHPF-6和GHPF-8的温度曲线,发现GHPF-8在试验后期测点6温度上升斜率增大,这是因为GHPF-8荷载比较大,在持续高温作用下,试验后期裂缝较大使框架梁底部直接处于高温环境中,加快了梁底部温度上升速度。

试件GHPF-1、GHPF-2和GHPF-3在90 min时截面最高温度分别为800、700、500℃左右,主要是因为纵筋率减少且剪跨比增大时,梁较早出现贯穿裂缝,带走部分热量,使GHPFRCC框架梁保持了较低的温度场。

GHPF-10配有箍筋,30、60 min时梁截面最高

温度分别为200、400℃左右,90 min时最高温度仅为550℃左右,试验过程中测点5、6温度上升斜率逐渐变小,且恒载作用下持续承受高温100 min仍未破坏,说明配有箍筋的GHPFRCC框架梁抗火性能较好。

由温度场曲线可知,距受火面越近,升温速率越大,越远则升温速率相对较小,且受火面与框架梁内部有较大的温度梯度,进一步表明GHPFRCC有较好的热惰性,有效地保护了钢筋在高温下的屈曲变形,延缓了高温下框架梁的破坏,提高了框架梁的抗火性能。

### 1.5 火灾试验位移曲线分析

图8为GHPFRCC框架梁构件在剪跨比为0.75的跨中挠度曲线。

由图8可知,在剪跨比为0.75的情况下,GHPFRCC梁的跨中挠度为2.9~6.4 mm,在0~30 min内,跨中挠度曲线的下降斜率很小,其中GHPF-1和GHPF-8梁的跨中挠度均小于1 mm,GHPF-6为2.2 mm,下降挠度也较小;在30 min时,炉内温度达到900℃,而GHPFRCC梁截面最高温度仅为

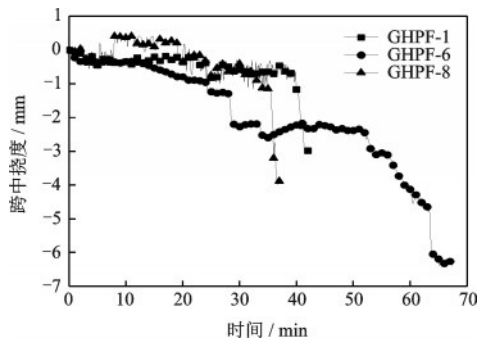


图8 剪跨比为0.75时GHPFRCC梁的跨中挠度曲线  
Fig.8 Midspan deflection curves of GHPFRCC beams with 0.75 shear-span ratio

300 °C。这是由于GHPFRCC梁温度达到PVA纤维熔点(230 °C)后,梁内PVA纤维熔化,GHPFRCC框架梁内部产生连通孔隙后,水蒸气通过孔隙溢出带走一部分热量,致使框架梁内部温度上升较慢,有效保护了钢筋,说明GHPFRCC框架梁在30 min内没有发生高温破坏,具有较好的高温承受能力。试验开始30 min后,梁截面的跨中挠度下降斜率变大,这主要是由于框架梁在恒载高温后开始发生热膨胀引起的。整个试验过程中,GHPF-1大约在40 min时产生位移突变,GHPF-8在35 min时产生位移突变,GHPF-6在27和62 min产生位移突变,这主要是梁内部蒸汽压力和外荷载共同作用使GHPFRCC梁发生了爆裂导致GHPFRCC梁跨中挠度突变。而纵向配筋率的不同导致跨中挠度GHPF-1最小、GHPF-6最大。

图9为GHPFRCC框架梁构件在剪跨比为2.07的跨中挠度曲线。

由图9可知,在剪跨比为2.07的情况下,框架梁GHPF-2、GHPF-4的跨中挠度分别为8、10.5 mm,跨中挠度下降斜率均比剪跨比0.75时大,且跨中挠

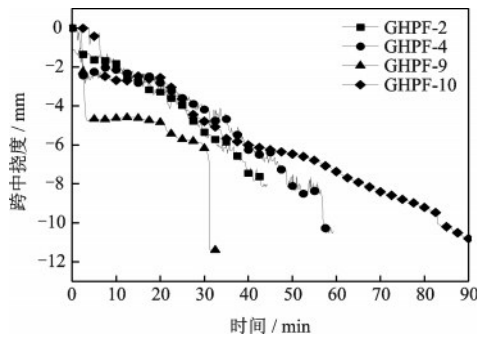


图9 剪跨比为2.07时GHPFRCC梁的跨中挠度曲线  
Fig.9 Midspan deflection curves of GHPFRCC beams with 2.07 shear-span ratio

度下降曲线接近线性。说明随着剪跨比增大,GHPFRCC框架梁的跨中挠度下降斜率变大,下降幅度也增大。框架梁GHPF-2、GHPF-4发生高温破坏(图10)。当GHPFRCC框架梁在较大剪跨比且持续高温的环境下,由PVA纤维熔化形成连通孔隙后,试件表皮往往会发生爆裂脱落,部分钢筋暴露在高温环境中,促使框架梁的加速破坏。例如GHPF-9发生了剪压破坏,且形成临界斜裂缝。GHPF-9跨中挠度在3 min时由于截面温度场变化使得框架梁发生第一次突变,3~30 min内接近线性变化,在30 min时由于梁斜压破坏发生第二次位移突变。GHPF-9配筋率较小也是破坏原因之一。GHPF-2和GHPF-4跨中挠度的不同也是由于纵向配筋率不同引起的,配筋率越大挠度越小。



图10 高温作用下的破坏  
Fig.10 Damage under high temperature

GHPF-10配有箍筋,整个试验过程中发生1次位移突变,这是由构件爆裂后截面温度场改变导致的。GHPF-10的剪跨比在1~3,常温下发生剪压破坏,由于配有箍筋,提高了梁的承载力,梁并没有发生破坏,说明箍筋能够增强GHPFRCC梁的抗火性能。

图11为GHPFRCC框架梁构件在剪跨比为

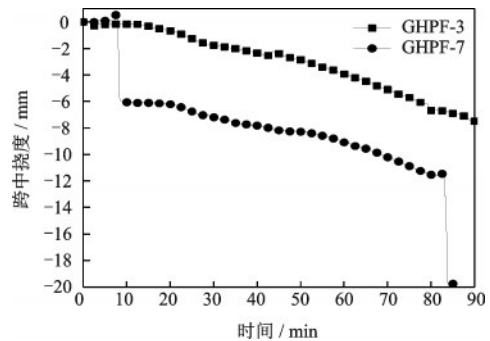


图11 剪跨比为3.38时GHPFRCC梁的跨中挠度曲线  
Fig.11 Midspan deflection curves of GHPFRCC beams with 3.38 shear-span ratio

3.38的跨中挠度曲线。由图11可知,在剪跨比为3.38的情况下,GHPF-3跨中挠度接近线性变化,且斜率最大,说明剪跨比越大,GHPFRCC框架梁跨中挠度下降越快;最大挠度达到11 mm且未损坏,说明此状态下GHPFRCC框架梁的抗火性能是比较好的。GHPF-5跨中挠度在0~5 min时位移较平缓,5 min时位移突变,说明此时梁发生破坏,17 min时再次发生位移突变,这是由于GHPF-5配筋率较低且荷载比较大,致使GHPF-5过早破坏。GHPF-7在7 min时由于截面温度场变化使得框架梁发生第一次突变,7~83 min时下降斜率很小且接近线性变化,这是因为无腹筋梁在剪跨比大于3的情况下发生斜拉破坏,其承载力主要取决于抗拉强度,GHPFRCC的抗拉强度强于混凝土<sup>[11]</sup>,使GHPF-7在荷载比较高和剪跨比大于3的情况下耐火极限达85 min左右,说明GHPFRCC梁抗火能力非常有潜力。

由上可知,高温作用下,剪跨比是影响GHPFRCC梁破坏形态的主要因素,剪跨比越大,框架梁的跨中挠度越大,跨中挠度下降越快;箍筋能够增强GHPFRCC框架梁的抗火性能。

## 2 结 论

对10根GHPFRCC框架梁进行三面受火试验,研究荷载比、纵筋率、剪跨比等因素对其抗火性能的影响规律,主要结论如下:

(1)由于PVA纤维的高温熔化,GHPFRCC框架梁内部形成贯通缝隙,从缝隙逸出的水蒸气带走一部分热量,抑制了GHPFRCC框架梁的热量传递和热量对流,使其保持了较低的温度分布。

(2)三面受火下GHPFRCC框架梁升温速度最快、温度最高的是梁底部,速度最慢且温度最低的是梁顶面。

(3)影响火灾下GHPFRCC框架梁破坏形态的主要因素是剪跨比。剪跨比越大,框架梁的跨中挠度越大,下降斜率也越大,框架梁破坏越严重。

(4)火灾下GHPFRCC框架梁的跨中挠度曲线近似线性下降,纵筋率在一定程度上影响了GHPFRCC框架梁的受剪承载能力,但影响效果很小。

(5)无腹筋GHPFRCC框架梁的抗火性能较差,箍筋能增强火灾下GHPFRCC框架梁的耐火极限。箍筋对火灾下GHPFRCC梁的抗火性能至关重要,但配箍率对火灾下GHPFRCC框架梁承载力

的定量影响还有待研究。而GHPFRCC作为一种加固材料对火损梁进行加固也是将来的研究方向。

## 参考文献:

- [1] 徐世焯,李庆华.超高韧性水泥基复合材料在高性能建筑结构中的基本应用[M].北京:科学出版社,2010:1-5.  
Xu Sh L, Li Q H. Basic application of ultra high toughness cementitious composites in advanced engineering structures [M]. Beijing: Science Press, 2010: 1-5. (in Chinese)
- [2] Li V C, Leung C K Y. Theory of steady state and multiple cracking of random discontinuous fiber reinforced brittle matrix composites [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(11): 2246-2264.
- [3] Lampropoulos A P, Paschalis S A, Tsioulou O T, et al. Strengthening of reinforced concrete beams using ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) [J]. Engineering Structures, 2016, 106: 370-384.
- [4] Li X L, Bao Y, Wu L L, et al. Thermal and mechanical properties of high-performance fiber-reinforced cementitious composites after exposure to high temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2017, 157: 829-838.
- [5] Yang E H, Li V C. Strain-rate effects on the tensile behavior of strain-hardening cementitious composites [J]. Construction and Building Materials, 2014, 52: 96-104.
- [6] 徐世焯,李贺东.超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用[J].土木工程学报,2008,41(6):45-60.  
Xu Sh L, Li H D. A review on the development of research and application of ultra high toughness cementitious composites [J]. China Civil Engineer Journal, 2008, 41(6):45-60. (in Chinese)
- [7] Li X L, Wang J, Bao Y, et al. Cyclic behavior of damaged reinforced concrete columns repaired with high-performance fiber-reinforced cementitious composite [J]. Engineering Structures, 2017, 136: 26-35.
- [8] 王娟.二次受力下绿色高性能纤维增强水泥基复合材料加固震损钢筋混凝土柱的抗震性能试验研究[D].济南:山东建筑大学,2015.  
Wang J. Experimental study on seismic behavior of earthquake damaged RC columns retrofitted by GHPFRCC under secondary loading [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2015. (in Chinese)

(本文责编:赵霞)  
(下转第986页)