

# 钢筋钢纤维混凝土梁与钢筋混凝土梁抗火性能 试验及对比分析

周焕廷\*, 陈建平, 邹有云

(武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070)

**摘要:** 为了研究钢筋钢纤维混凝土梁在高温下的抗火性能,对截面尺寸和配筋均相同的钢筋钢纤维混凝土梁和普通钢筋混凝土梁开展了抗火试验和有限元模拟。试验结果表明:普通钢筋混凝土梁发生了以剪切破坏为主的弯剪破坏,呈现出脆性破坏的特点,而钢筋钢纤维混凝土梁发生弯曲破坏达到极限状态,属于延性破坏;钢筋钢纤维混凝土梁的临界温度为594℃,相比于普通钢筋混凝土梁(545℃)提高了9.0%;临界状态下,钢筋钢纤维混凝土梁的跨中挠度更大、弯曲裂缝发展更加充分、裂缝宽度更大,但裂缝间距更小、主裂缝之间的衍生裂缝更多。数值研究表明:加入适量的钢纤维能增强混凝土的整体性,使其受力更加均匀,随着钢纤维体积掺量的增加,钢筋钢纤维混凝土梁的抗弯刚度也随之增强;不同钢纤维体积掺量的钢筋钢纤维混凝土梁的力学性能分析表明,当钢纤维体积掺量为1.0%时,梁的挠度发展更加充分;增加配筋率可以增强钢筋钢纤维混凝土梁的初始刚度,但当配筋率超过一定值后,其对抗弯刚度的提高效果不明显,反而会降低钢筋的利用效率。

**关键词:** 钢纤维; 钢纤维混凝土梁; 抗弯性能; 抗火试验; 高温

中图分类号: TU352.5, TU398

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)02-0009-12

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20230913003

## Fire Resistance Test and Comparative Analysis of Reinforced Steel Fiber Concrete Beams and Reinforced Concrete Beams

ZHOU Huanting\*, CHEN Jianping, ZOU Youyun

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

\*Corresponding author: zhouht@whut.edu.cn

**Abstract:** To study the fire resistance of reinforced steel fiber concrete beams at high temperatures, fire tests and finite element simulations were conducted on reinforced steel fiber concrete beams and ordinary reinforced concrete beams with identical cross-sectional dimensions and reinforcement. The test results showed that ordinary reinforced concrete beams exhibited shear-dominated flexural-shear failure with brittle characteristics, while reinforced steel fiber concrete beams exhibited flexural failure with ductile characteristics. The critical temperature of reinforced steel fiber concrete beams was 594 °C, representing a 9% increase compared to ordinary reinforced concrete beams (545 °C). At the critical state, the reinforced steel fiber concrete beams exhibited larger mid-span deflection, more extensive development of bending cracks, and wider crack width, but smaller crack spacing and more derived cracks between primary cracks. Additionally, numerical investigations indicated that adding steel fibers can enhance the overall integrity of concrete, making it more uniformly loaded. The flexural stiffness of the reinforced steel fiber concrete

收稿日期: 2023-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(52378533)

作者简介:

周焕廷(1969—),男,博士,教授,主要从事结构抗火方面的研究。E-mail: zhouht@whut.edu.cn。(通信作者)

陈建平(1998—),男,硕士研究生,主要从事结构抗火方面的研究。

beams increases as the steel fiber content increases. The analysis of mechanical properties of reinforced steel fiber concrete beams with different volumes of fibers shows that when the volume content of steel fiber is 1.0%, the deflection of reinforced steel fiber concrete beams is more fully developed. Increasing the reinforcement ratio can enhance the initial stiffness of reinforced steel fiber concrete beams. However, beyond a certain value, further increasing the reinforcement ratio does not significantly contribute to improving their flexural stiffness and instead, results in reduced efficiency of steel reinforcement utilization.

**Keywords:** steel fiber; steel fiber concrete beam; flexural behavior; fire test; high temperature

混凝土是一种广泛应用于建筑领域的材料,具有来源广泛、生产工艺简单等优点<sup>[1]</sup>。实际工程中,混凝土结构在拉应力作用下极易产生裂缝,而裂缝的出现会导致结构产生不同程度的损伤。为有效延缓混凝土的开裂,常在混凝土中加入纤维以提高其抗裂能力。由于钢纤维具有抗拉强度高、耐高温、易分散等特点,因此钢纤维混凝土在建筑领域得到了广泛应用<sup>[2]</sup>,对钢纤维混凝土受力性能的研究也成为当今的热点。

研究发现,常温下在混凝土中加入钢纤维不仅能够改善混凝土的抗弯<sup>[3-5]</sup>、抗剪<sup>[6-7]</sup>、抗裂<sup>[8]</sup>和耐磨性能,还可以增强混凝土的延性<sup>[9]</sup>和抗冲击性能<sup>[10]</sup>;但是当钢纤维混凝土遭受高温作用时会发生强度损失,导致钢纤维与混凝土之间的黏结力减弱,从而增加钢纤维被拔出的风险,与常温下钢纤维混凝土的力学性能表现出较大的差异。KARATAS等<sup>[11]</sup>的研究表明,在温度升高至200℃之前,钢纤维混凝土的抗压强度随温度的升高而增大。SADRMOMTAZI等<sup>[12]</sup>认为这一现象是由于温度升高促进了混凝土基体的水化反应,导致水化产物增多,孔隙率减小,从而提高了抗压强度。BOZKURT<sup>[13]</sup>还考虑了钢纤维尺寸对钢纤维混凝土抗压强度的影响,认为在同一温度下,减小纤维尺寸和降低粗纤维掺量会使钢纤维混凝土的抗压强度得到小幅提升。实际结构中,钢纤维混凝土常以受弯状态为主,为此ABDULHALEEM等<sup>[14]</sup>研究了高温后钢纤维混凝土牛腿柱的弯曲性能,发现钢纤维能够提高牛腿柱的弯曲性能和延展性,并防止其突然发生断裂。张聪<sup>[15]</sup>对比了钢纤维混凝土简支梁在高温作用前后的抗弯性能,发现高温作用后梁的挠度明显增大;与无纤维梁的对比发现,掺入钢纤维后,梁的

裂缝条数增加、平均裂缝间距减小。

综上所述,目前对钢纤维混凝土的研究主要集中在常温下和高温后基本性能的分析,对高温下钢筋钢纤维混凝土梁力学性能的研究较少。而实际工程中钢筋钢纤维混凝土梁经常遭受火灾和荷载的共同作用,因此其抗火性能成为了结构工程领域关注的重点。为此,本文对具有正、负弯矩区的钢筋钢纤维混凝土梁和作为对照的普通钢筋混凝土梁开展了抗火试验,研究了高温下钢纤维对混凝土梁跨中挠度、裂缝发展和破坏形态的影响。此外,还进行了数值模拟研究,分析关键参数对钢筋钢纤维混凝土梁抗火性能的影响。为钢筋钢纤维混凝土梁高温下的抗火性能研究提供了坚实的理论依据。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

依据规范<sup>[16]</sup>设计了两根具有相同几何尺寸和配筋的混凝土梁:一根是钢纤维体积掺量为1.0%的钢筋钢纤维混凝土梁(SF-RC),另一根是作为对照的普通钢筋混凝土梁(CO-RC),两根梁的几何尺寸及配筋方案如图1所示。两根梁试件的混凝土强度等级均为C30,钢筋采用直径为6 mm和12 mm的HRB400,试件SF-RC中钢纤维的各项参数如表1所示。依据规范<sup>[17-18]</sup>的测试方法,得到普通混凝土和钢纤维混凝土的力学性能指标如表2所示,钢筋的力学性能指标如表3所示。

### 1.2 试验装置及试验流程

试验加载装置如图2所示。采用千斤顶对试件进行两点加载,结合实际工程中连续混凝土梁的受力状态并

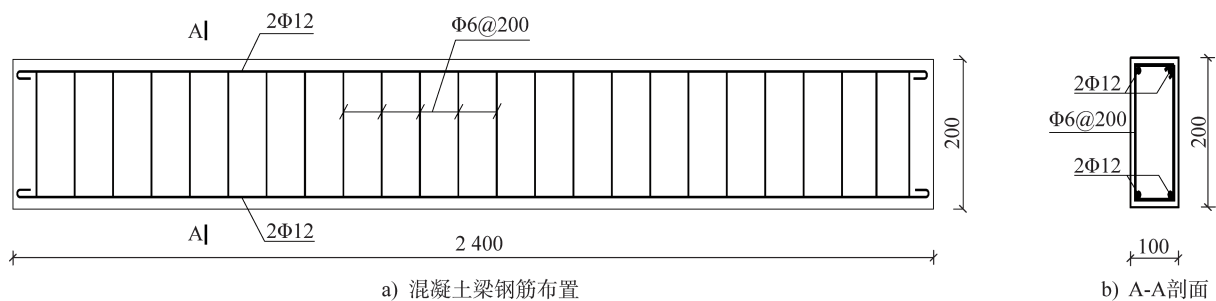


图1 试件SF-RC和CO-RC构造(单位:mm)

Fig. 1 Details of specimens SF-RC and CO-RC(unit:mm)

表1 钢纤维参数

Table 1 Parameters of steel fiber

类型	直径/mm	长度/mm	长径比	生产工艺	抗拉强度/MPa
L型钢纤维	0.4	25	62.5	钢丝冷拉型	1 050

表2 混凝土力学性能指标

Table 2 Mechanical property indexes of concrete

材料	立方体抗压强度 $f_{cu}/\text{MPa}$	混凝土弹性模量 $E_c/\text{GPa}$
C30普通硅酸盐混凝土	36	31
1.0%钢纤维体积掺量混凝土	37	32

考虑到荷载过大会导致构件临界温度较低,不利于观察构件的变形过程,取荷载比(常温下所施加荷载值与极限荷载值之比)为0.3,得到两点目标荷载值如表4所示,采

表3 钢筋力学性能指标

Table 3 Mechanical property indexes of steel bars

材料	屈服强度 $f_y/\text{MPa}$	抗拉强度 $f_u/\text{MPa}$	钢筋弹性模量 $E_s/\text{GPa}$
6 mmHRB400钢筋	463	608	201
12 mmHRB400钢筋	456	602	202

用三面受火方式(混凝土梁的底面和两个侧面受火)进行升温。图3展示了火灾试验过程中试件的安装状态,由于试验采用电炉加热,升温速率较慢,无法按ISO 834标准升温曲线升温,因此为了保持炉温的升温趋势与ISO 834标准升温曲线一致,前期升温速率取为 $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ,后期升温速率取为 $25\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 。此外,在温度每上升一个阶段后,保持5 min的恒温状态。设定的升温曲线如图4所示。试验采用恒载升温模式,即两个加载点的荷载保持恒定。

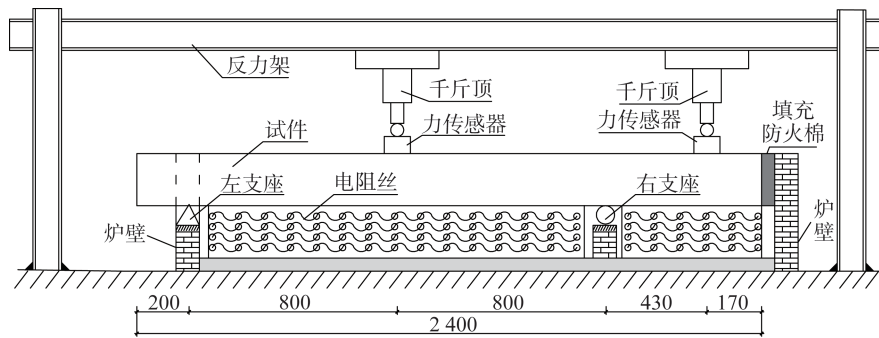


图2 混凝土梁恒载升温装置示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of heating device for concrete beam under constant load (unit: mm)

表4 试验参数

Table 4 Experimental parameters

试件编号	跨中荷载/kN	悬挑端荷载/kN	钢纤维体积掺量/%
SF-RC	32	22	1.0
CO-RC	32	22	—

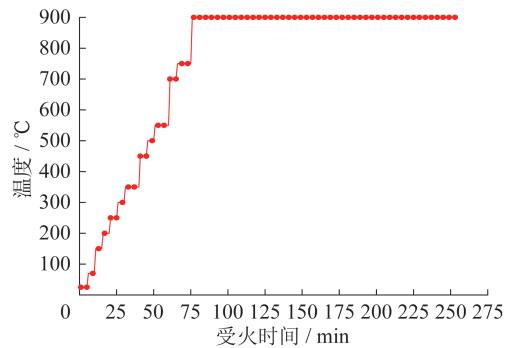


图4 设定升温曲线

Fig. 4 Prescribed temperature curve



图3 火灾试验试件安装状态

Fig. 3 Fire test installation status of specimens

在试验过程中,对混凝土梁跨中及悬挑端加载点处挠度、跨中截面温度以及试验炉膛温度进行了监测。各位移计的布置情况如图5a)所示;跨中截面各温度测点的位置如图5b)所示,其中G1和G2为钢筋温度测点,C1、C2和C3为混凝土温度测点;试验炉膛的温度通过其自带的热电偶获取。

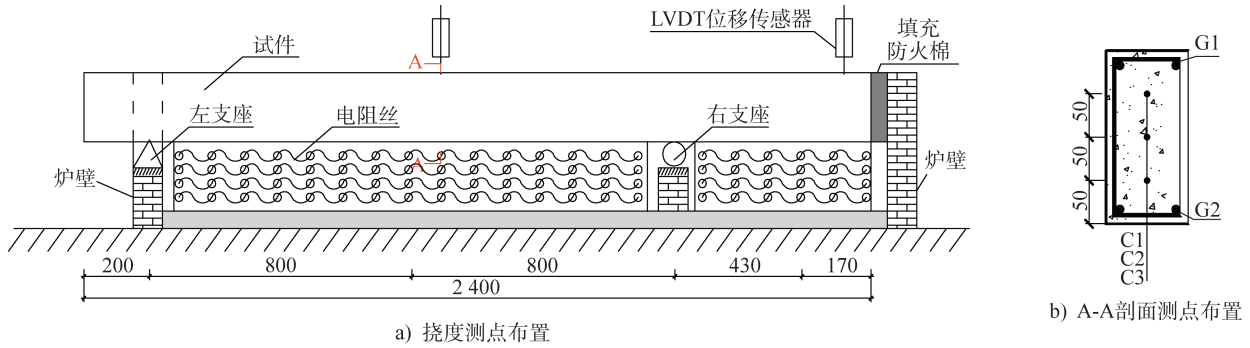


图5 挠度和温度测点布置(单位:mm)

Fig. 5 Arrangement of deflection and temperature measurement points (unit: mm)

在试验过程中,首先将混凝土梁吊装在支座上;随后,在常温条件下,以目标荷载值的10%对混凝土梁进行预加载,验证各试验仪器的数据是否正常;接着,按目标荷载值的20%逐级加载至目标荷载值并稳定30 min<sup>[19]</sup>;最后,启动火灾试验炉,按图4设定的升温曲线进行升温;当荷载无法保持恒定或挠度值达到5.0%的跨长时,认为结构达到临界状态并结束试验。

## 2 试验结果分析

### 2.1 混凝土梁截面温度

试件CO-RC和SF-RC跨中截面各测点温度随受火时间的变化曲线如图6所示。以试件CO-RC为例,由图可知,随着受火时间的延长,各测点温度逐渐上升。如G2测点的温度在前20 min内缓慢上升,这是因为启动电炉前炉内空气温度较低,启动后需先加热炉内空气,然后将温度传递至混凝土梁;在20~100 min,升温速率加快,在100~250 min,升温速率减缓,这种升温趋势与平均炉温走势一致。但试件CO-RC不同位置处的温度变化略有差异。例如,混凝土测点C1~C3的升温速率沿截面高度方向由下至上依次降低,呈现出明显的温度梯度。对于钢筋测点G1和G2,由于钢筋受到周围混凝土的吸热保护作用,二者的升温趋势与混凝土测点相比未表现出显著差异,但G2测点离混凝土梁的受火底面较近,温度高于G1测点。对比图6可以发现试件SF-RC的C1~C3测点在温度达到约100℃时出现了平台段,这是水分的蒸发吸热所导致;而对于试件CO-RC的C1~C3测点则未出现此现象,这是由于试件CO-RC跨中在温度未达到100℃时已经开裂,而试件SF-RC在温度达到100℃时还未开裂,试件CO-RC跨中裂缝的不断发展导致混凝土内部传热加快,因此其在升温过程中并未出现明显的平台段。

### 2.2 混凝土梁典型截面挠度

为了分析高温下混凝土梁截面抗弯刚度的变化,得到试件CO-RC和SF-RC典型截面的挠度-温度曲线分别如

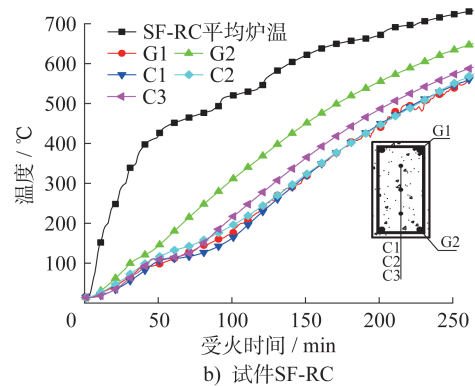
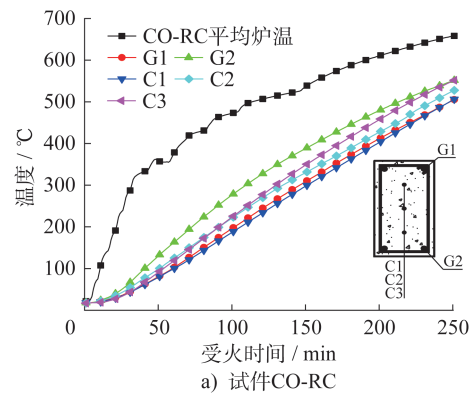


图6 试件CO-RC和SF-RC各测点温度-时间曲线  
Fig. 6 Temperature-time curves of all measurement points of specimen CO-RC and SF-RC

图7、图8所示。其中,图7横坐标温度表示试件CO-RC跨中截面混凝土测点C3(图5b))的温度。在试件CO-RC的恒载升温过程中,悬挑段率先发生破坏,导致其提前退出工作;由于测试原因,未测得试件CO-RC悬挑端挠度的相应数据。

鉴于试件CO-RC和SF-RC跨中挠度随温度的发展趋势具有相似性,因此以图7中试件CO-RC跨中挠度随温度的发展为例加以分析。图7中曲线斜率表示单位温度下的挠度变化率,是梁抗弯刚度的一种量度。根据跨中挠度-温度曲线斜率的不同,可将曲线分为3个阶段(3个阶段的斜率分别为 $-0.018 \text{ mm} \cdot \text{°C}^{-1}$ 、 $-0.238 \text{ mm} \cdot \text{°C}^{-1}$

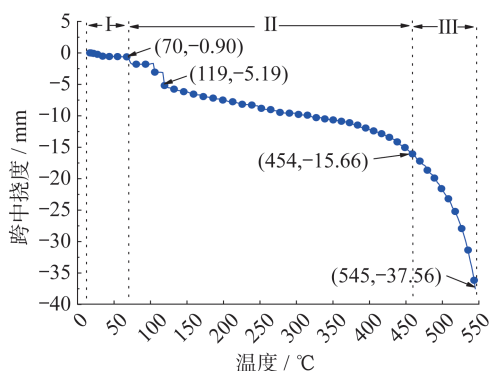


图7 试件CO-RC跨中挠度-温度曲线

Fig. 7 Mid-span deflection-temperature curve of specimen CO-RC

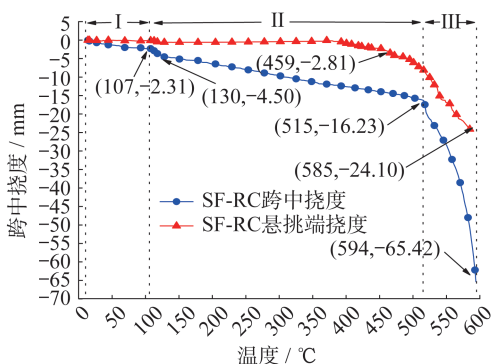


图8 试件SF-RC跨中及悬挑端挠度-温度曲线  
Fig. 8 Deflection-temperature curve of specimen SF-RC at mid-span and cantilever end

和 $-0.312 \text{ mm} \cdot \text{°C}^{-1}$ )。第I阶段,试件CO-RC跨中挠度随温度的升高缓慢增加,此阶段内试件CO-RC的温度较低,各材料力学性能随温度的衰减较小,因此挠度缓慢增加。第II阶段,曲线在此阶段初期出现一段陡降后,跨中挠度仍随着温度的升高缓慢增加,但增长速率明显大于第I阶段的增长速率。曲线陡降段的出现是由于试件跨中突然开裂,使跨中挠度陡增。同时在这一阶段内试件CO-RC受到开裂和升温的共同作用,抗弯刚度下降,因此跨中挠度的增长速率大于第I阶段的增长速率。第III阶段为挠度快速发展阶段,试件CO-RC跨中挠度随温度的升高急剧下降。主要是因为裂缝不断发展并逐渐进入不稳定阶段,同时温度不断升高,各材料力学性能受温度影响劣化严重,导致挠度急剧下降。

对比试件CO-RC和SF-RC跨中挠度的发展曲线可以发现:(1)在第II阶段,试件SF-RC的开裂温度为 $107 \text{ °C}$ ,末温度为 $515 \text{ °C}$ ,而试件CO-RC的开裂温度为 $70 \text{ °C}$ ,末温度为 $454 \text{ °C}$ 。这是因为试件SF-RC中钢纤维的受力主要分为三个阶段,如图9所示。随着混凝土拉应变的增加,试件SF-RC中的钢纤维和混凝土共同承担拉

应力作用,提高了其开裂温度。当混凝土开裂后,钢纤维能对裂缝两边的混凝土起到很好的搭接作用(图9a),有效延缓了裂缝的发展,减缓了跨中挠度的增长。(2)在第III阶段,试件SF-RC的跨中极限挠度值大于试件CO-RC的相应值。这是因为随着钢纤维应力的增加,钢纤维与混凝土会产生相对滑移(图9b),直至钢纤维最终被拔出(图9c),随着试件SF-RC延性的发挥,其临界挠度值大于试件CO-RC的临界挠度值。

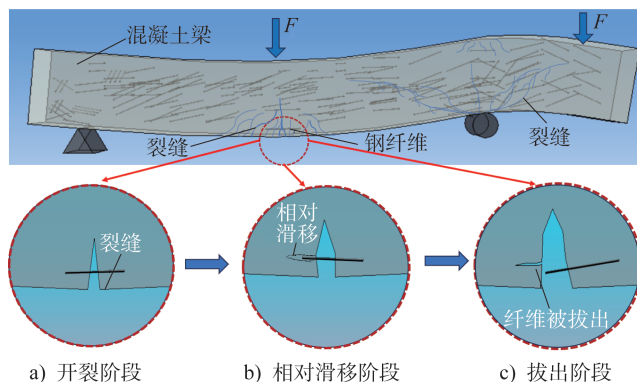


图9 钢纤维-混凝土之间相互作用

Fig. 9 Interaction between steel fibers and concrete

试件SF-RC悬挑端挠度随温度的发展如图8所示。在常温升温至 $459 \text{ °C}$ 的过程中,挠度-温度曲线基本保持水平状态。这主要是因为试件SF-RC悬挑段负弯矩区上部受拉纵筋距离受火面较远,升温速率较慢,材料性能劣化相对缓慢,因而能够在较长时间内保持较大的抗弯刚度。当温度在 $459 \sim 585 \text{ °C}$ 时,由于各材料性能进一步劣化,导致试件SF-RC悬挑端挠度值从 $0.90 \text{ mm}$ 急剧上升至 $24.10 \text{ mm}$ 。

### 2.3 火灾下混凝土梁裂缝分析

为了分析钢纤维对混凝土梁裂缝发展的影响,得到临界状态下试件CO-RC和SF-RC正、负弯矩区的裂缝分布情况如图10~13所示。图10a)、c)分别展示了试件CO-RC和SF-RC的立面裂缝形态,通过对比可以发现:(1)试件CO-RC和SF-RC跨中区域弯曲裂缝的分布范围相似,但是试件SF-RC的弯曲裂缝发展得更充分,裂缝宽度大于试件CO-RC的裂缝宽度。这是由于钢纤维只在混凝土开裂后才承受较大拉应力,加入一定体积掺量的钢纤维对弯曲裂缝的分布范围影响不大,但是随着钢纤维拉应力的增加,钢纤维与混凝土产生相对滑移,提高了试件SF-RC的延性,因此其弯曲裂缝比试件CO-RC的弯曲裂缝发展得更加充分。(2)试件CO-RC和SF-RC在简支段右半跨和悬挑端各发展出了一条明显的斜裂缝,由于钢纤维对剪切裂缝的约束效应较强,试件SF-RC的斜裂缝宽度和长度均小于试件CO-RC的相应值。在简支段,试件CO-RC的斜裂缝

起裂点位于跨中加载点处,向右支座方向倾斜,而试件 SF-RC 的斜裂缝起裂点位于右支座处,向跨中加载点方向倾斜。这是由于试件 CO-RC 悬挑端退出工作后,其近似成为简支梁承受跨中荷载,随着温度继续升高,集中荷载作用处产容易生裂缝,斜裂缝起裂点位于跨中加载点处;而试件 SF-RC 简支段的斜裂缝起裂点位于右支座底部,这是由于与试件 CO-RC 相比,试件 SF-RC 右支座处顶面开裂较晚,裂缝在垂直于其主拉应力迹线方向展开。

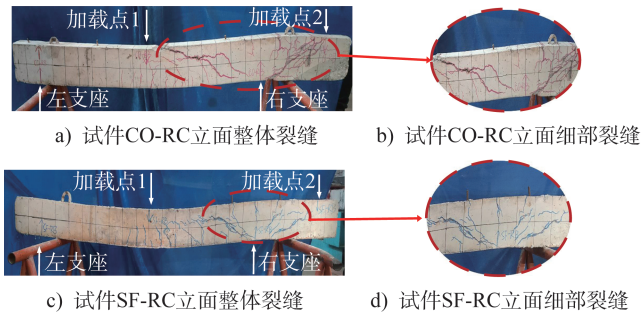


图 10 临界状态下混凝土梁立面裂缝

Fig. 10 Crack distribution on vertical surface of beams at critical state

图 11a)、c) 分别展示了试件 CO-RC 和 SF-RC 底面裂缝的分布情况。可以发现相较于试件 CO-RC, 试件 SF-RC 的弯曲裂缝间距更小、分布更加密集, 同时主裂缝之间的衍生裂缝更多。这是由于试件 SF-RC 开裂后, 钢纤维对裂缝两边的混凝土起到桥接作用, 延缓了主弯曲裂缝的发展, 同时使主裂缝之间的混凝土受力更加均匀, 因此在主裂缝之间发展出了更多的衍生裂缝, 混凝土得到了更加充分的利用。

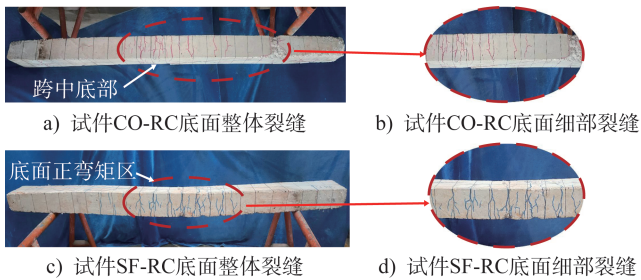


图 11 临界状态下混凝土梁底面裂缝

Fig. 11 Crack distribution on bottom surface of beams at critical state

试件 CO-RC 和 SF-RC 的顶面裂缝主要集中在跨中加载点和右支座顶部, 如图 12a)、c) 所示。在右支座的顶面, 试件 CO-RC 和 SF-RC 均存在弯曲裂缝的发展, 但试件 SF-RC 的弯曲裂缝宽度略小于试件 CO-RC 的相应值; 在跨中加载点处, 试件 CO-RC 出现了混凝土被压溃的现象, 而试件 SF-RC 却未出现。这是由于试件 CO-RC

悬挑端退出工作后, 简支段继续按原加载方案加载, 跨中加载点处混凝土受到较大弯曲压应力, 最终导致混凝土被压溃。而试件 SF-RC 由于全长范围内的弯矩分布模式不同于试件 CO-RC 的弯矩分布模式, 因此其弯矩压力亦低于试件 CO-RC 的相应值。

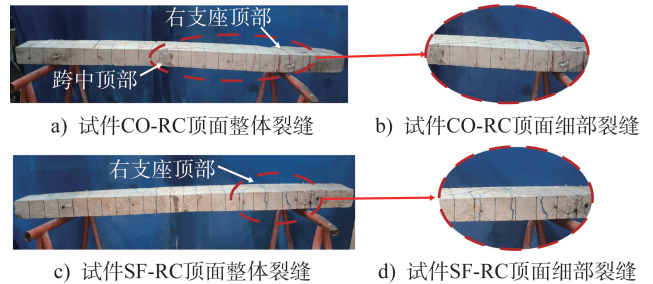


图 12 临界状态下混凝土梁顶面裂缝

Fig. 12 Crack distribution on upper surface of beams at critical state

### 2.4 火灾下混凝土梁破坏模式

图 13 展示了临界状态下试件 CO-RC 和 SF-RC 的变形形态及裂缝分布情况。如图所示, 试件 CO-RC 的悬挑段存在一条明显的斜裂缝, 贯穿整个梁截面, 表明在悬挑段发生了明显的剪切破坏; 在简支段, 试件 CO-RC 的跨中区域出现了明显的弯曲裂缝, 同时右半跨发展出了一条几乎贯穿整个斜截面的斜裂缝, 表明试件 CO-RC 在简支段发生了以剪切破坏为主的弯剪破坏, 呈现出脆性破坏的特点。与试件 CO-RC 相比, 试件 SF-RC 简支段和悬挑段的斜裂缝在极限状态下均未贯穿整个斜截面, 最终, 试件 SF-RC 由于跨中发生弯曲破坏而达到极限状态, 属于延性破坏。

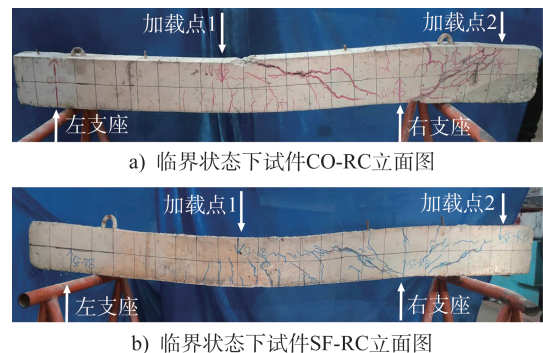


图 13 混凝土梁临界状态下立面图

Fig. 13 Elevation view of concrete beams at critical state

## 3 钢筋钢纤维混凝土梁有限元分析

### 3.1 有限元建模

利用 ABAQUS 有限元软件, 采用热-力顺序耦合的

计算方法,建立了试件 SF-RC 和作为对照的试件 CO-RC 的有限元模型如图 14 所示。其中,钢筋采用三维桁架单元 T3D2 模拟,钢纤维混凝土采用整体建模的方式,使用三维线性实体单元 C3D8R 模拟。钢筋网通过 ABAQUS 软件中的 Embedded 功能嵌入至混凝土梁中。

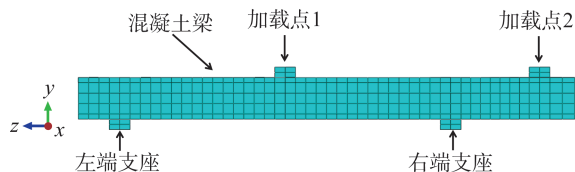


图 14 混凝土梁有限元模型

Fig. 14 Finite element model of concrete beam

在热分析中,钢筋、混凝土的热工参数取自欧洲规范<sup>[20-21]</sup>,钢筋纤维混凝土的热工参数参照文献<sup>[22]</sup>;在结构分析中,结合表 2、表 3 中的材性试验数据,普通混凝土采用 ABAQUS 软件自带的塑性损伤模型,钢纤维混凝土的本构关系模型采用文献<sup>[23]</sup>给出的应力-应变关系式,钢筋采用理想弹塑性模型。

混凝土梁左端支座的边界条件为  $U_1=U_2=U_3=U_{R2}=U_{R3}=0$ ,右端支座的边界条件为  $U_1=U_2=U_{R2}=U_{R3}=0$ ( $U_1、U_2、U_3$ 分别为沿  $x、y、z$ 轴方向的位移, $U_{R2}、U_{R3}$ 分别为绕  $y、z$ 轴方向的转角位移,其中  $x、y、z$ 轴方向如图 14 所示)。有限元分析中混凝土梁的受火面及升温曲线与试验保持一致。

### 3.2 有限元模拟验证

#### 3.2.1 热分析模拟验证

为验证有限元热分析建模方法的准确性,按上述建模方法对试验中试件 CO-RC 和 SF-RC 进行热分析计算,得到各测点的模拟温度-时间曲线并与试验结果进行对比,如图 15 所示。可以看出有限元热分析的计算结果与试验结果基本吻合,证明本文热分析有限元模型是可靠的。

为了进一步验证有限元模型结构分析的准确性,对试件 CO-RC 和 SF-RC 的有限元模型进行了热-力耦合计算,得到其跨中挠度-温度曲线模拟结果与试验结果的对比如图 16 所示。

从 CO-RC 跨中挠度-温度对比曲线(图 16a))可以看出,在常温至 100 °C 时,试验与模拟结果较为接近。在温度达到 418 °C 后,CO-RC 跨中挠度的模拟结果与试验结果出现一定偏差,这是由于试验中炉内温度沿梁长方向分布不均,试件跨中区域的温度低于其他区域的温度,而在模拟中温度沿梁长方向均匀分布,因此试验中的跨中挠度发展滞后于相应模拟值。从 SF-RC 跨中挠度-温度对比曲线(图 16b))可以看出,当温度低于 518 °C 时试验

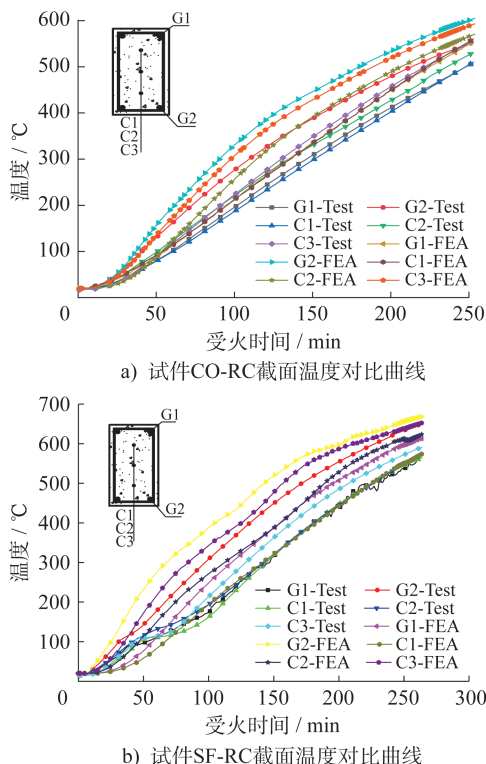


图 15 热分析有限元结果与试验结果对比

Fig. 15 Comparison between finite element thermal analysis and experimental results

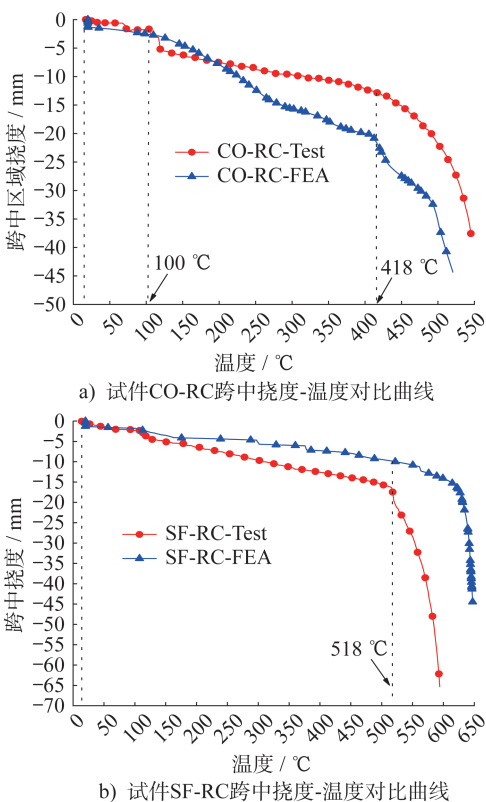


图 16 结构分析有限元结果与试验结果对比

Fig. 16 Comparison between structural analysis finite element and experimental results

结果与模拟结果较为接近。当温度达到 518 °C 后,试验值与模拟值出现一定偏差。这主要是由于有限元模拟中对钢纤维混凝土采用的是整体建模方式,当试验梁中钢纤维未被拔出时有限元可以较好地模拟钢纤维混凝土的实际受力情况,当试验梁中的钢纤维被拔出时,在有限元模拟中无法模拟钢纤维的拔出。但是试验和模拟的跨中挠度随温度的变化趋势相同,跨中挠度极限值及临界温度值的误差也在允许范围内,验证了本文有限元建模方法的准确性,故可按此建模方法对结构进行分析。

### 3.3 参数分析

本文主要分析钢纤维体积掺量和配筋率对 SF-RC 高温下抗火性能的影响。为方便表述,SF-RC 的钢纤维体积掺量和配筋率分别采用 SF (steel fiber) 和 RR (reinforcement ratio) 表示(如 SF1.0-RR1.29 表示钢纤维体积掺量为 1.0%、配筋率为 1.29% 的 SF-RC)。

#### 3.3.1 钢纤维体积掺量

为了分析钢纤维体积掺量对 SF-RC 高温下抗火性能的影响,建立了不同钢纤维体积掺量(0.5%、1.0%、1.5% 和 2.0%)的 SF-RC 和 CO-RC 模型。图 17a)~e) 展示了不同混凝土梁临界状态下的 S33 应力云图。首先,对比不同混凝土梁临界状态下的变形形态可以发现,相比于 CO-RC, SF-RC 跨中及悬挑端的竖向变形更为明显,随着钢纤维体积掺量的增加,变形也略有增大;其次,对比不同混凝土梁临界状态下的最大 S33 应力可以发现,加入钢纤维后, SF-RC 的最大 S33 应力为 3.0 MPa, 相比于 CO-RC (1.5 MPa) 有明显提高,这是由于高温下钢纤维混凝土的抗拉性能优于普通混凝土的抗拉性能。由此表明在混凝土梁中加入一定的钢纤维不仅提高了混凝土梁的延性,而且提高了混凝土梁高温下的承载能力。

图 18a)~e) 展示了各混凝土梁在不同温度(跨中受拉钢筋温度)下跨中截面混凝土沿截面高度方向的纵向应变分布。鉴于不同温度下梁跨中截面混凝土沿高度方向纵向应变分布的相似性,以 CO-RC 为例加以分析(图 18a))。在 20 °C 时, CO-RC 刚施加完荷载,此时处于弹性阶段,受力较小,沿高度方向的纵向应变值较小且近似呈直线分布;在 100~300 °C 时,随着温度的升高, CO-RC 承受的温度荷载不断增加,各点的纵向应变值也随之增大,同时 CO-RC 底部混凝土离受火底面最近,其随着温度升高导致材料性能劣化较为严重,从而使跨中截面中和轴不断上移;在 400~500 °C 时,由于混凝土的导热性能较差,导致其横截面沿高度方向呈现出明显的温度梯度,材料性能的劣化出现较大差异,沿高度方向的变形不再协调,应变分布出现折线。

对比 CO-RC 和 SF-RC 可以发现:(1) 在相同温度下

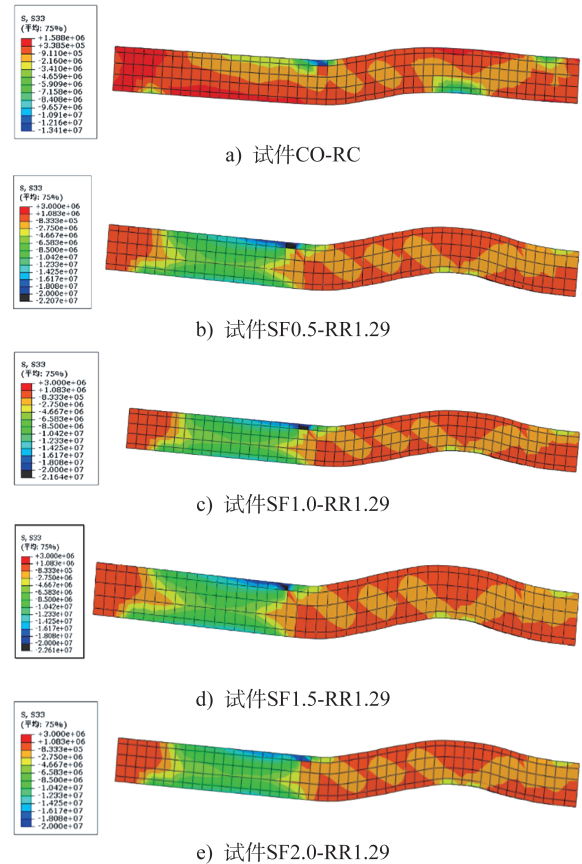


图 17 不同混凝土梁临界状态下 S33 应力云图(单位:MPa)

Fig. 17 S33 stress contours of concrete beams at critical state (unit: MPa)

的相同位置处, SF-RC 的应变值小于 CO-RC 的应变值。(2) 在温度达到 300 °C 之前, CO-RC 混凝土沿高度方向的应变分布为直线或近似直线,当温度达到 400 °C 后应变分布出现折线,跨中截面沿高度方向的变形不再协调。而 SF-RC 在 400 °C 时的应变分布仍近似呈直线,并且当钢纤维体积掺量达到 1.5% 时,在 500 °C 下其应变分布仍近似呈直线。表明在混凝土梁中加入一定的钢纤维,一方面增加了截面的抗弯刚度,另一方面增强了混凝土的整体性,使其受力更加均匀,能够在更高温度下保持变形协调,并且随着钢纤维体积掺量的增加,截面的抗弯刚度也随之增大。

图 19 为 CO-RC 和不同钢纤维体积掺量 SF-RC 的跨中挠度-温度曲线。不同钢纤维体积掺量 SF-RC 的跨中挠度随温度的变化趋势基本一致,大致可分为 3 个阶段。以 SF1.0-RR1.29 为例加以分析,在第 I 阶段(20~430 °C), SF-RC 跨中截面处于弹性工作阶段,因此跨中挠度随温度的升高呈线性缓慢增加。在第 II 阶段(430~630 °C), SF-RC 跨中截面沿高度方向的变形不再协调,挠度增长速率加快。在第 III 阶段(630~720 °C),跨中挠度的增长速率

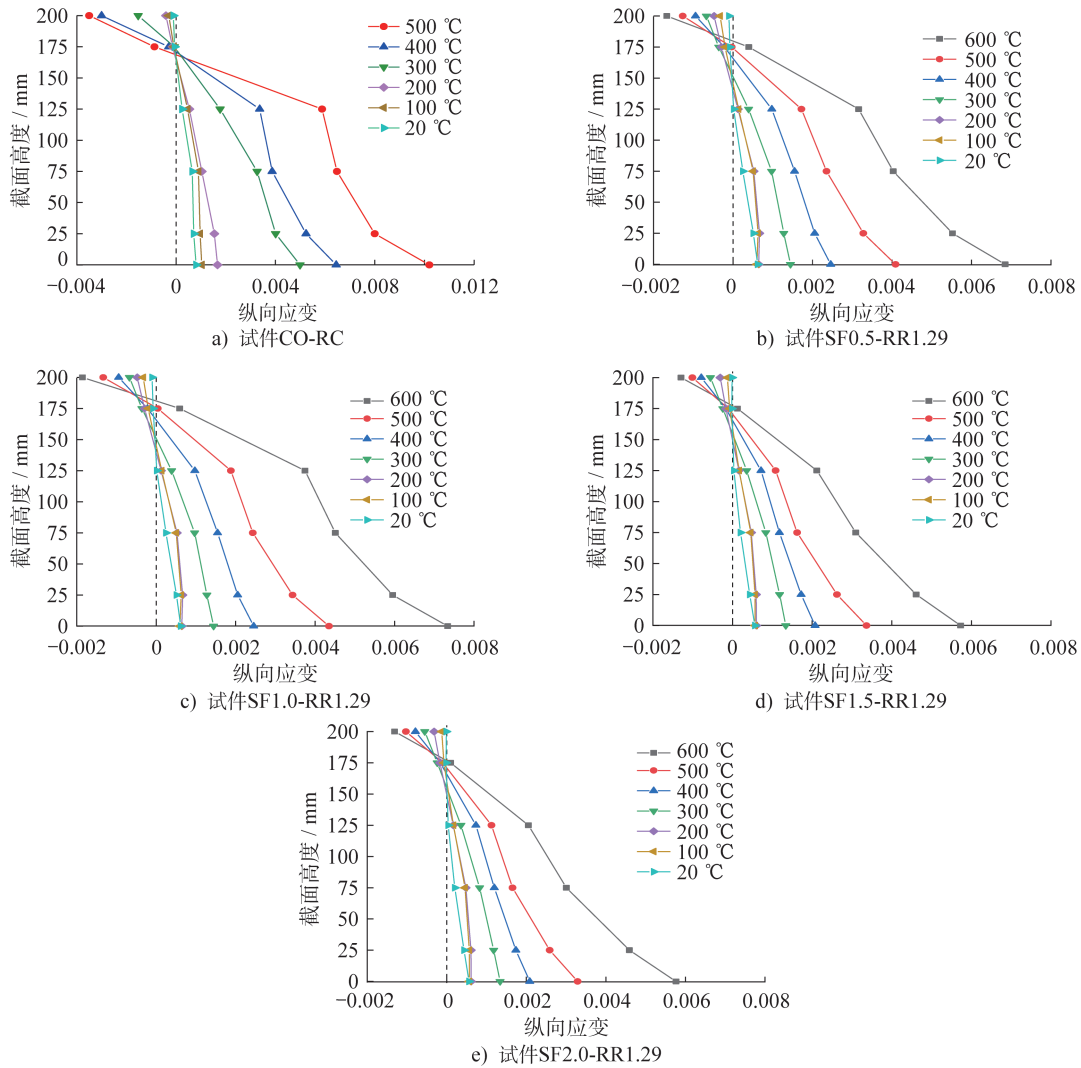


图 18 跨中混凝土纵向应变沿梁高分布曲线

Fig. 18 Mid-span longitudinal strain distribution curves of concrete at along the height of beam

进一步加快,最终达到极限挠度。对于不同钢纤维体积掺量的SF-RC,在第I、II阶段曲线基本重合,不同的是在第III阶段钢纤维体积掺量为0.5%、1.5%、2.0%的SF-RC的极限挠度值均约为25 mm,钢纤维体积掺量为1.0%的SF-RC的极限挠度值约为45 mm。对于CO-RC,在温度达到430 °C前挠度缓慢增加,当温度达到430 °C后,挠度增长速率显著增大,当温度达到535 °C后挠度增长速率进一步加快并最终达到极限状态。这说明在混凝土梁加入一定的钢纤维提高了截面的抗弯刚度和混凝土梁的延性,相比于其他钢纤维体积掺量的SF-RC,钢纤维体积掺量为1.0%的SF-RC的挠度发展更加充分。

### 3.3.2 配筋率

为了分析配筋率对高温下SF-RC受力性能的影响,保持钢纤维体积掺量为1.0%不变,建立不同配筋率(1.29%、1.76%和2.29%)的SF-RC有限元模型。提取不同配筋率下SF-RC的正弯矩区受拉钢筋S33应力和跨

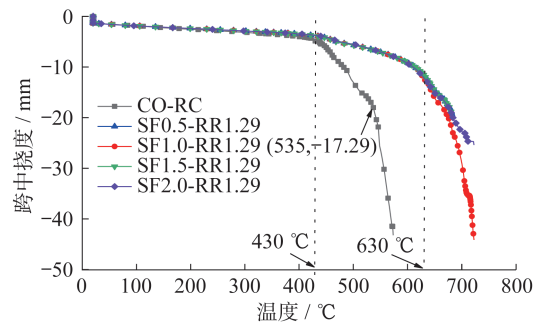


图 19 混凝土梁跨中挠度-温度曲线

Fig. 19 Mid-span deflection-temperature curves of concrete beams

中挠度随温度(跨中受拉钢筋的温度)的变化曲线如图20所示。

图20a)为不同配筋率的SF-RC跨中受拉钢筋S33应力随温度的变化曲线。以SF1.0-RR1.29为例进行分析:在第I阶段(常温至94 °C),受拉钢筋S33应力增长较快。

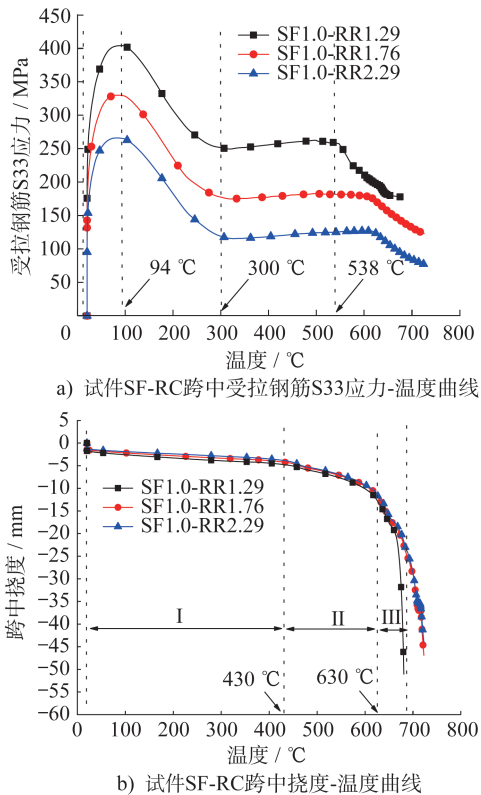


图20 配筋率对试件SF-RC受力性能的影响  
Fig. 20 Influence of reinforcement ratio on mechanical performance of specimen SF-RC

在此阶段,由于荷载的施加前期应力急剧增长,后期由于荷载施加完毕进入恒载升温阶段,应力增长速度减缓。在第II阶段(94~300℃),钢筋应力开始下降。这主要有两方面原因:(1) SF-RC跨中截面的中和轴位置不断上移(图18c),受拉钢筋应力降低;(2) 钢筋弹性模量受温度影响发生较大衰减,这也导致了钢筋应力的降低。在第III阶段(300~538℃),钢筋应力基本保持不变。这是由于中和轴位置在此温度范围内基本不变,同时钢筋的弹性模量也不会发生急剧下降。当温度超过538℃后,钢筋应力开始急剧下降,最终达到极限状态。对比不同配筋率的SF-RC可以发现,配筋率越大,受拉钢筋的最大S33应力值越小。当配筋率为1.29%时,受拉钢筋的最大S33应力为403.96 MPa;当配筋率为2.29%时,受拉钢筋的最大S33应力值最小,为265.97 MPa。因此增加配筋率会在一定程度上降低钢筋的利用效率。

图20b)为不同配筋率的SF-RC跨中挠度随温度的变化曲线。以SF1.0-RR1.29为例进行分析,其跨中挠度发展趋势及原因与图19中SF1.0-RR1.29的发展趋势及原因一致。对比不同配筋率的SF-RC可以发现,在第I阶段随着配筋率的增加,SF-RC的初始刚度略有增大;在第III阶段随着配筋率的增加,跨中挠度的发展速率及极限挠度值均有所降低,同时随着SF-RC的配筋率由1.29%增加

至2.29%,其临界温度也由680℃上升至722℃。但当配筋率超过1.76%后,配筋率对于提高SF-RC抗弯刚度的贡献不明显。

## 4 结论

本文基于钢筋钢纤维混凝土梁和普通钢筋混凝土梁的抗火试验及数值模拟研究,可以得出以下主要结论:

(1) 试验中钢筋钢纤维混凝土梁的耐火极限温度为594℃,相较于普通钢筋混凝土梁的耐火极限温度(545℃),提升了9.0%,说明钢纤维对钢筋混凝土梁的耐火极限有一定的提升作用。

(2) 临界状态下,混凝土梁的正弯矩区和负弯矩区均有裂缝发展,但相较于普通钢筋混凝土梁,钢筋钢纤维混凝土梁的弯曲裂缝宽度更大,裂缝间距更小,主裂缝之间的衍生裂缝也更加密集,说明钢纤维能增强混凝土的整体性,使其受力更加均匀。

(3) 在混凝土梁中加入钢纤维能对混凝土起到良好的搭接作用,提高钢筋钢纤维混凝土梁的开裂温度(由70℃提升至107℃);钢纤维与混凝土之间的相对滑移改善了高温下钢筋钢纤维混凝土梁的延性,并使其裂缝和挠度发展更加充分。

(4) 加入钢纤维能提高混凝土梁的抗弯刚度,并且随着钢纤维体积掺量的增加,截面的抗弯刚度也随之增大;对于不同的钢纤维体积掺量,混凝土梁适宜的钢纤维体积掺量为1.0%,此时其延性最好;增加配筋率可以增强钢筋钢纤维混凝土梁的初始刚度,但当配筋率超过一定值后,配筋率对抗弯刚度的提高效果不再显著,反而会降低钢筋的利用效率。

## 参考文献:

- [1] BENGAL S N, PAMMAR L S, NAYAK C B. Engineering application of organic materials with concrete: a review [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 56: 581-586. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.390.
- [2] 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. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2021.03.001.  
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. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2021.03.001. (in Chinese)
- [3] SOUTSOS M N, LE T T, LAMPROPOULOS A P. Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and synthetic fibres [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 36: 704-710. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.042.
- [4] FAISAL MAHMOOD S M, AGARWAL A, FOSTER S J, et al. Flexural performance of steel fibre reinforced concrete

- beams designed for moment redistribution [J]. *Engineering Structures*, 2018, 177: 695-706. DOI: 10.1016/j. engstruct. 2018.10.007.
- [ 5 ] 伍凯,徐超,曹平周,等.型钢-钢纤维混凝土组合梁抗弯性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(9): 41-52. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2019.09.004.  
WU Kai, XU Chao, CAO Pingzhou, et al. Experimental study on the flexural behavior of profile steel-steel fiber reinforced concrete composite beams [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(9): 41-52. DOI: 10.15951/j. tmgcxb. 2019.09.004.(in Chinese)
- [ 6 ] BUI T T, NANA W S A, DOUCET-FERRU B, et al. Shear performance of steel fiber reinforced concrete beams without stirrups: experimental investigation [J]. *International Journal of Civil Engineering*, 2020, 18(8): 865-881. DOI: 10.1007/s40999-020-00505-8.
- [ 7 ] MÉSZÖLY T, RANDL N. Shear behavior of fiber-reinforced ultra-high performance concrete beams [J]. *Engineering Structures*, 2018, 168: 119-127. DOI: 10.1016/j. engstruct. 2018.04.075.
- [ 8 ] PAKRAVAN H R, LATIFI M, JAMSHIDI M. Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: a review [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 142: 280-294. DOI: 10.1016/j. conbuildmat. 2017.03.059.
- [ 9 ] 程东辉,羌震. 钢纤维再生混凝土梁受弯承载力试验分析[J]. *混凝土*, 2019(9): 31-35. DOI: 10.3969/j. issn. 1002-3550. 2019.09.008.  
CHENG Donghui, QIANG Zhen. Experimental analysis on flexural capacity of steel fiber reinforced recycled concrete beams [J]. *Concrete*, 2019(9): 31-35. DOI: 10.3969/j. issn. 1002-3550. 2019.09.008.(in Chinese)
- [ 10 ] 张雪梅,周美容. 钢纤维和碳纤维的混合效应对高性能混凝土力学性能的影响[J]. *功能材料*, 2021, 52(1): 1208-1213. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-9731. 2021.01.031.  
ZHANG Xuemei, ZHOU Meirong. Influence of the mixing effect of steel fiber and carbon fiber on the mechanical properties of high performance concrete [J]. *Journal of Functional Materials*, 2021, 52(1): 1208-1213. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-9731. 2021.01.031.(in Chinese)
- [ 11 ] KARATAS M, DENER M, BENLI A, et al. High temperature effect on the mechanical behavior of steel fiber reinforced self-compacting concrete containing ground pumice powder [J]. *Structural Concrete*, 2019, 20(5): 1734-1749. DOI: 10.1002/suco. 201900067.
- [ 12 ] SADRIMOMTAZI A, GASHTI S H, TAHMOURESI B. Residual strength and microstructure of fiber reinforced self-compacting concrete exposed to high temperatures [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 230: 116969. DOI: 10.1016/j. conbuildmat. 2019.116969.
- [ 13 ] BOZKURT N. The high temperature effect on fibre reinforced self compacting lightweight concrete designed with single and hybrid fibres [J]. *Acta Physica Polonica A*, 2014, 125(2): 579-583. DOI: 10.12693/aphyspola. 125.579.
- [ 14 ] ABDULHALEM K N, GÜLŞAN M E, ÇEVIK A. Mechanical behavior of steel fiber-reinforced self-compacting concrete corbels after exposure to elevated temperatures [J]. *Structural Concrete*, 2018, 19(6): 1881-1894. DOI: 10.1002/suco. 201700034.
- [ 15 ] 张聪. 混杂纤维自密实混凝土梁高温作用前后的受弯性能[D]. 大连:大连理工大学, 2016.  
ZHANG Cong. Flexural performance of hybrid fiber-reinforced self-consolidating concrete beams before and after high temperature [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [ 16 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 2015版. 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. Code for Design of Concrete Structures: GB 50010—2010 [S]. 2015 ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.(in Chinese)
- [ 17 ] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.  
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic Materials—Tensile Testing—Part 1: Method of Test at Room Temperature: GB/T 228.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.(in Chinese)
- [ 18 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for Test Methods of Concrete Physical and Mechanical Properties: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.(in Chinese)
- [ 19 ] 国家技术监督局, 中华人民共和国建设部. 混凝土结构试验方法标准: GB 50152-92[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.  
State Bureau of Quality and Technical Supervision, Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard Methods for Testing of Concrete Structures: GB 50152-92[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1992.(in Chinese)
- [ 20 ] European Committee for Standardization. Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures—Part 1-2: General Rules—Structural Fire Design: EN 1994-1-2 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2003.
- [ 21 ] European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of Steel Structures—Part 1-2: General Rules—Structural Fire

- Design: ENV 1993-1-2 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [22] 巴恒静, 杨少伟. 钢纤维混凝土高温应力损伤性能[J]. 混凝土, 2009(1): 15-17, 22. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2009.01.005. BA Hengjing, YANG Shaowei. Stress damage performance of steel-fiber reinforced concrete exposed to high temperature[J]. Concrete, 2009 (1) : 15-17, 22. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2009.01.005.(in Chinese)
- [23] ASLANI F, SAMALI B. Constitutive relationships for steel fibre reinforced concrete at elevated temperatures [J]. Fire Technology, 2014, 50(5) : 1249-1268. DOI: 10.1007/s10694-012-0322-5.
- 
- (上接第8页)
- [12] 郭金琼, 房贞政, 郑振. 箱形梁设计理论[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2008: 139-144. GUO Jinqiong, FANG Zhenzheng, ZHENG Zhen. Design theory of box girder[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2008: 139-144. (in Chinese)
- [13] 黎雅乐, 杨丙文, 张建东. 单箱室波形钢腹板梁桥横向弯矩计算方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(8): 2802-2809. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2016.08.035. LI Yale, YANG Bingwen, ZHANG Jiandong. Transverse moment of PC single box-girder bridge with corrugated steel webs[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(8) : 2802-2809. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2016.08.035.(in Chinese)
- [14] 陈东亮, 张元海, 刘泽翔. 基于板元框架法的钢底板波形钢腹板组合箱梁畸变效应分析[J]. 建筑钢结构进展, 2023, 25(12): 30-38. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.12.004. CHEN Dongliang, ZHANG Yuanhai, LIU Zexiang. Analysis on distortion effect of trapezoidal composite box girders with corrugated steel webs and steel bottom plates based on plate element frame method [J]. Progress in Steel Building Structures, 2023, 25(12) : 30-38. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.12.004.(in Chinese)
- [15] 汪洋生, 张元海. 斜腹板薄壁箱梁横向内力分析及其参数影响研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(3): 104-111. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2017.03.017. WANG Yangsheng, ZHANG Yuanhai. Research on transverse internal force and its parameter influence of thin-walled box girders with inclined webs[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(3) : 104-111. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2017.03.017.(in Chinese)
- [16] 王彤, 谢旭, 王渊, 等. 桁腹式组合桁梁结构计算理论[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(4): 711-720, 741. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2014.04.022. WANG Tong, XIE Xu, WANG Yuan, et al. Analysis of prestressed composite truss girders with steel truss webs[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(4) : 711-720, 741. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2014.04.022.(in Chinese)
- [17] 何嘉祥, 张元海, 黄洪猛. 考虑畸变影响的薄壁箱梁横向内力修正系数研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(6): 140-146. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2022.06.017. HE Jiexiang, ZHANG Yuanhai, HUANG Hongmeng. Research on modification factor of transverse internal force of thin-walled box girder considering distortion effect [J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(6) : 140-146. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2022.06.017.(in Chinese)