

# 火灾后铁尾矿砂混凝土梁抗弯性能试验研究

杨志年<sup>1,2</sup>, 毛震<sup>1</sup>, 周云龙<sup>1,3</sup>, 雷翔宇<sup>1</sup>

(1. 华北理工大学 建筑工程学院, 河北 唐山 063210; 2. 河北省地震工程与防灾重点实验室 河北 唐山 063210;  
3. 河北省建筑结构绿色建造技术创新中心, 河北 唐山 063210)

**摘要:** 为研究铁尾矿砂全部替代天然砂对混凝土梁火灾后抗弯性能的影响, 对 3 根受火 45 min 和 3 根非受火混凝土梁进行了静载试验。对比了受火过程中梁内混凝土和钢筋温度分布、梁跨中挠度以及火灾后静载试验荷载-挠度曲线、残余抗弯承载力、破坏形态, 验证了平截面假定, 分析了铁尾矿砂全部替代天然砂和不同铁尾矿砂混凝土强度对钢筋混凝土梁火灾后抗弯性能的影响。结果表明: 铁尾矿砂混凝土梁与天然砂混凝土梁受火过程中混凝土和钢筋温度、跨中挠度无明显差异, 受火 45 min 后满足平截面假定; 铁尾矿砂混凝土梁的火灾后残余抗弯承载力与天然砂混凝土梁无明显差异, 但破坏时跨中挠度显著增加; 不同铁尾矿砂混凝土强度(C30、C40)对梁火灾后抗弯承载力影响不大。

**关键词:** 铁尾矿砂混凝土; 简支梁; 火灾后; 抗弯性能; 平截面假定

中图分类号: TU37; X932

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)02-0220-09

## Experimental study on flexural performance of iron tailings concrete beams after fire

YANG Zhinian<sup>1,2</sup>, MAO Zhen<sup>1</sup>, ZHOU Yunlong<sup>1,3</sup>, LEI Xiangyu<sup>1</sup>

(1. College of Civil and Architectural Engineering, North China University of Science and Technology, Hebei Tangshan 063210, China;

2. Hebei Key Laboratory of Earthquake Engineering and Disaster Prevention, Hebei Tangshan 063210, China;

3. Hebei Technology Innovation Center of Green Construction for Building Structures, Hebei Tangshan 063210, China)

**Abstract:** In order to study the effect of replacing natural sand with iron tailings sand on the flexural performance of concrete beams after fire, static load tests were carried out on three concrete beams exposed to fire for 45 min and three concrete beams non-exposed to fire. The temperature distribution of concrete and reinforcement in the beam during fire, the mid span deflection of the beam, the load deflection curve of standard post fire static load test, the residual bending capacity, and the failure mode were compared. The plane section assumption was verified, and the influences of all iron tailings sand replacing natural sand and the strength of different iron tailings sand concrete on the bending resistance of reinforced concrete beams after fire were analyzed. The results show that there is no significant difference in the temperature field of concrete and steel bars and mid span deflection between iron tailings sand concrete beam and natural sand concrete beam under fire, and both meet the plane section assumption after 45 minutes of fire. The residual flexural capacity of iron tailings sand concrete beams after fire is not significantly different from that of natural sand concrete beams, but the mid-span deflection increases significantly during failure. The strength C30 or C40 of concrete with different iron tailings has little effect on the flexural capacity of beams after fire.

**Key words:** iron tailings sand concrete; simple supported beam; after fire; flexural behavior; plane section assumption

收稿日期: 2022-11-08 修回日期: 2024-03-19

基金项目: 河北省自然科学基金项目(E2021209112); 河北省高等学校科学研究重点项目(ZD2021085); 唐山市科技局应用基础研究项目(21130222C)

第一作者: 杨志年(1983—), 男, 博士, 教授, 主要从事建筑结构抗火方向的研究. E-mail: yangzhinian1983@163.com

通信作者: 周云龙(1989—), 男, 博士生, 副教授, 主要从事建筑结构抗火方向的研究. E-mail: ncstzyl@163.com

随着建筑火灾的日益增多, 火灾造成的人民生命财产损失和其他直接或间接的经济损失急剧增加, 建筑结构与构件的防火性能研究引起广泛关注<sup>[1-7]</sup>。钢筋混凝土梁是结构重要的水平承重构件, 也是火灾作用下结构损伤最严重的构件之一, 其火灾后残余性能对整个结构的火灾安全影响巨大<sup>[2-4]</sup>。对于钢筋混凝土构件, 高温下的破坏进程以及高温后的力学性能退化程度, 往往与混凝土的高温爆裂与剥落密切相关<sup>[5-7]</sup>。课题组前期针对 12 根足尺天然砂钢筋混凝土梁进行了恒载—升温条件下的耐火试验, 研究表明混凝土强度越高、剪跨比越大、支座约束越强, 钢筋混凝土梁的耐火极限越好<sup>[8-10]</sup>。

铁尾矿砂是铁矿石选矿后的废弃物, 以铁尾矿砂替代天然砂配制而成的混凝土称为铁尾矿砂混凝土<sup>[11-12]</sup>。将铁尾矿砂混凝土应用于工程中, 不仅解决了混凝土用天然砂短缺的问题, 又能实现铁尾矿再利用, 解决尾矿的危害<sup>[13-14]</sup>。很多专家对常温下铁尾矿砂混凝土材料和构件性能进行了大量研究, 研究表明<sup>[15-16]</sup>通过调整铁尾矿砂混凝土配合比、控制外加剂掺量以及添加粉煤灰和矿粉能够满足混凝土的使用和耐久性要求。管品武<sup>[17]</sup>、张龙生<sup>[18]</sup>、王光琦<sup>[19]</sup>、马卫华<sup>[20]</sup>等对常温下铁尾矿砂混凝土梁和天然砂混凝土梁的力学性能做了对比研究, 结果表明二者的力学性能差异较小。李壮<sup>[21]</sup>对铁尾矿砂、河砂以及混合砂三种混凝土的力学性能进行了对比研究, 完成了 36 组试块的高温后轴压试验, 并根据试验结果绘制出高温后力学性能随温度变化的函数关系。相关研究表明<sup>[22-23]</sup>由于铁尾矿砂为细砂, 提高了混凝土微观结构的密实性, 降低了渗透性, 但是在高温环境中, 密实性越高, 混凝土的耐高温性能越差, 直接在建筑行业中应用铁尾矿砂混凝土可能会存在安全隐患。课题组上阶段对 5 根铁尾矿砂混凝土梁和 2 根天然砂混凝土梁进行了耐火试验, 研究结果表明, 铁尾矿砂完全替代天然砂对火灾下筒支梁和连续梁的耐火极限影响不大<sup>[24]</sup>。

综上所述可以看出, 虽然国内外学者对普通混凝土梁的防火性能、铁尾矿砂混凝土常温和高温力学性能进行了大量研究, 但是针对用铁尾矿砂替代天然砂的钢筋混凝土梁火灾后抗弯性能研究, 迄今为止未见报道。因此, 课题组制作 2 根足尺天然砂混凝土梁以及 4 根足尺铁尾矿砂全部替代天然砂混凝土梁, 采用 ISO834 标准升温曲线进行恒载升温试验, 待混凝土梁自然冷却至室温后进行静

载受弯试验, 研究铁尾矿砂全部替代天然砂和不同铁尾矿砂混凝土强度对火灾后钢筋混凝土梁抗弯性能的影响, 从而为铁尾矿砂混凝土梁的防火性能优化设计、火灾后修复加固提供依据, 为铁尾矿砂混凝土的大规模工程应用提供理论和技术支撑。

## 1 试件设计

根据现行的《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)(2015 版)<sup>[25]</sup>设计制作 4 根铁尾矿砂混凝土筒支梁, 2 根天然砂混凝土筒支梁。试验梁的全长为 4.1 m, 净跨 3.6 m, 梁的截面尺寸为 200 mm×400 mm, 各试验梁设计参数如表 1 所示。为了减少试验梁含水率在受火过程中对混凝土爆裂的影响, 将试验梁养护 28 d 后一起置于干燥通风处 90 d 后再进行火灾升温实验。试验当天, 6 根试验梁含水率及实测混凝土强度见表 1 所示。通过筛分试验可知, 铁尾矿砂细度模数为 1.69, III 区级配, 而天然砂细度模数为 2.65, II 区级配。因此, 配置铁尾矿砂混凝土时, 在保证混凝土水胶比不变的情况下, 通过调整各原材料的掺量使铁尾矿砂混凝土和易性达到要求, 最终试验梁混凝土配合比见表 2 所示。梁内纵筋采用直径为 20 mm 的 HRB400 级钢筋, 箍筋采用直径为 8 mm 的 HRB400 级钢筋。试验梁配筋如图 1 所示。

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Design parameters of beams

试件 编号	受火 工况	取代率 /%	混凝土 强度	实测强度 /MPa	含水率 /%
ITC30L1	—	100	C30	36.51	3.28
ITC40L2	—	100	C40	46.34	3.15
PC30L3	—	0	C30	37.86	3.18
FITC30L1	三面受火	100	C30	38.22	3.30
FITC40L2	三面受火	100	C40	45.79	3.14
FPC30L3	三面受火	0	C30	35.87	3.20

注: F 为受火梁; ITCL 为铁尾矿砂混凝土梁; PCL 为天然砂混凝土梁; 数字为梁编号。

## 2 试验方法

火灾试验在华北理工大学结构实验室水平炉内进行, 炉膛内净尺寸为 5 250 mm×3 650 mm×1 470 mm, 炉内设置 10 个燃烧器喷和 10 个铠装 K 型高温热电偶, 各热电偶温度的平均值作为试验平均炉温。所有试验梁按照国际标准 ISO—834 升温曲线进行恒载—升温火灾试验。试验装置如

图2所示. 为防止梁在火灾实验过程中提前破坏和方便数据对比, 本次试验所有梁千斤顶施加的荷载均为58 kN(梁PC30L3常温下极限抗弯承载力的三分之一, 并减去分配梁和加载装置自重), 达到预定荷载后进行45 min受火试验. 火灾试验中梁底面和两侧面受火, 梁端简支, 梁内的混凝土和钢筋温度由预先埋入的K型热电偶进行测量. 在简支梁跨中, 混凝土沿截面布置水平方向5个等距测点和垂直方向6个等距测点, 钢筋的箍筋各边

中心及四角的纵筋上布置温度测点. 热电偶布置如图3所示.

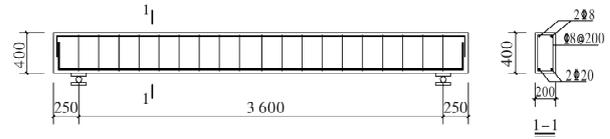


图1 试验梁配筋

Fig. 1 Arrangements of rebars for beams

表2 混凝土的配合比(kg·m<sup>-3</sup>)

Tab. 2 Mix ratio of concrete/kg/m<sup>3</sup>

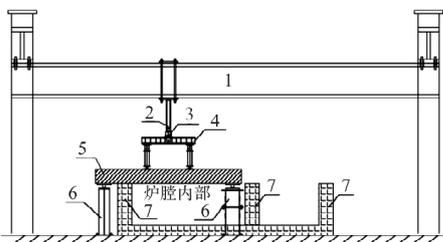
强度等级	砂	水泥	粉煤灰	矿粉	石	水	外加剂
PC-C30	840.5	214	60	75	997	170.5	7.00
ITC-C30	701	271	76	95	1 108	215.9	9.35
ITC-C40	572	320	90	112	1 026	203.5	11.00

注: ITC为铁尾矿砂混凝土、PC为天然砂混凝土

静载试验仍在试验炉内进行, 待试验梁冷却至室温后开始试验. 根据《混凝土结构试验方法标准》(GB/T50152—2012)<sup>[26]</sup>, 对试验梁进行分级加载, 每级加荷20 kN, 并持荷5 min, 直至达到火下试验荷载; 然后每级加荷10 kN, 持荷5 min, 直至试验梁破坏.

试验过程中, 试验梁的竖向位移由布置在梁顶的拉线位移计测量, 分别布置在两端支座、加载点和跨中位置, 共计6个测点计. 试验梁两端布置位移传感器以测量梁的轴向位移. 位移传感器的布置如图4所示.

在梁跨中两侧沿跨长方向各布置9个应变片, 测量简支梁在受力过程中跨中的应变情况. 具体布置如图5所示.



1—纵向反力钢梁; 2—油压千斤顶; 3—压力传感器; 4—加载钢梁; 5—试验梁; 6—钢支座; 7—炉壁

图2 加载装置

Fig. 2 Test equipment

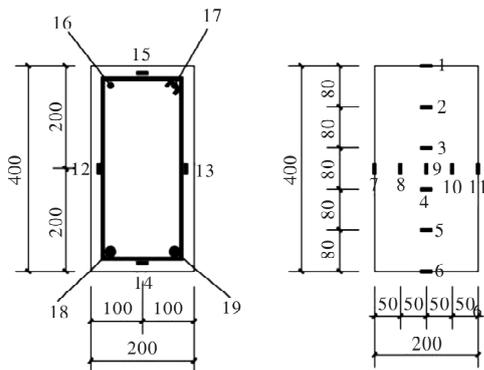


图3 梁内热电偶布置(mm)

Fig. 3 Thermocouple arrangement in the beam/mm

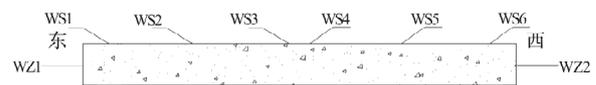


图4 位移传感器布置

Fig. 4 Displacement sensor arrangement



图5 应变片布置

Fig. 5 Strain gauge arrangement

### 3 火灾试验结果

#### 3.1 炉温

图6为试验梁实测炉温随时间变化的曲线, 由图可以看出实测炉温曲线与国际标准ISO-834升温曲线较为吻合.

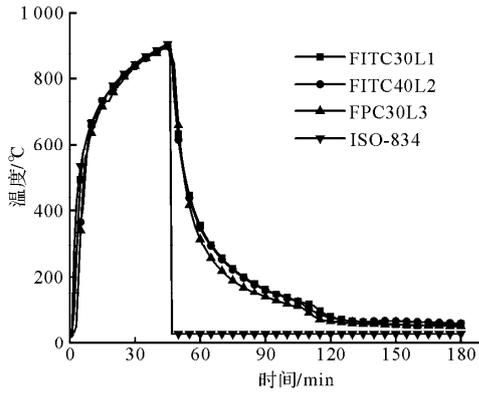


图 6 炉温随时间变化曲线

Fig. 6 The time history curve of furnace temperature

### 3.2 试验现象

将试验梁吊入火灾试验炉内, 使用液压千斤顶施加 58 kN 外荷载, 进行 45 min 持续明火试验. 三根试验梁受火到 25 min 时, 试验表面开始溢出水份; 受火到 40 min 时, 试验梁顶端跨中以及东侧溢出水份明显增加; 受火到 45 min 时, 水份部分蒸发, 原先溢出水份部分外圈留下些许水渍. 试验现象如图 7 所示.



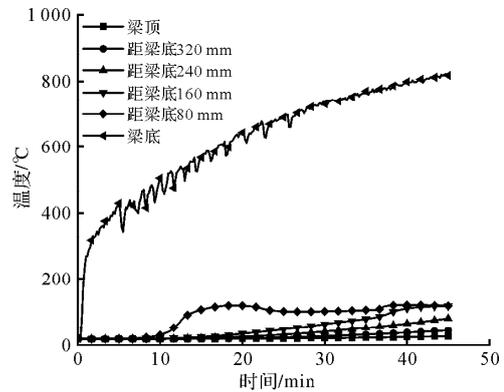
图 7 试验现象

Fig. 7 Experimental phenomenon

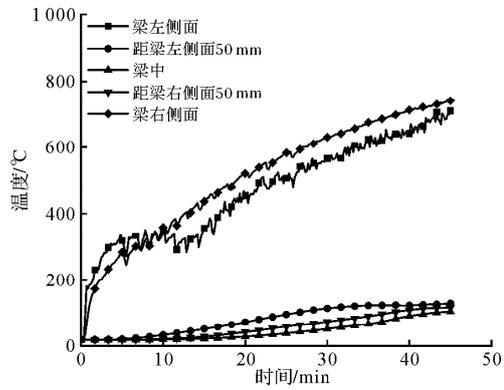
### 3.3 梁内混凝土及钢筋温度分布

试验梁跨中位置混凝土温度随时间变化曲线如图 8 所示. 梁底距离喷火口最近, 温度上升最快, 与炉内升温趋势大致相同, 不同位置的测点温度形成温度梯度. 混凝土内部温度达到 100 °C 左右时, 存在明显的水平台阶, 这是由于梁内温度升温至 100 °C 时, 梁内水分达到其沸点变为水蒸气, 水蒸发吸热消耗热量, 升温速度减慢, 当梁内水分几乎全部蒸发掉时, 升温速度加快. 观察火灾试验时水蒸气的蒸发时间可以发现, 水蒸气出现的时刻即为梁内大部分混凝土测点的温度-时间曲线水平阶段开始时刻. 水蒸气达到顶峰的时刻即为梁内大部分混凝土测点的温度-时间

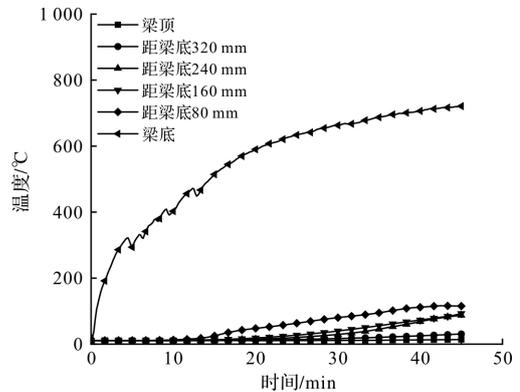
曲线水平阶段结束时刻. 由图示温度曲线可以看出, 铁尾矿砂混凝土梁和天然砂混凝土梁的温度场基本相似.



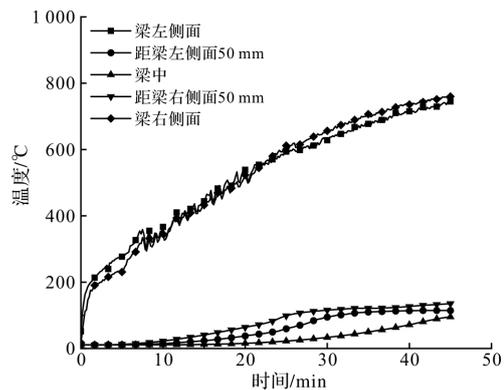
(a) FITC30L1 垂直方向温度



(b) FITC30L1 水平方向温度



(c) FITC40L2 垂直方向温度



(d) FITC40L2 水平方向温度

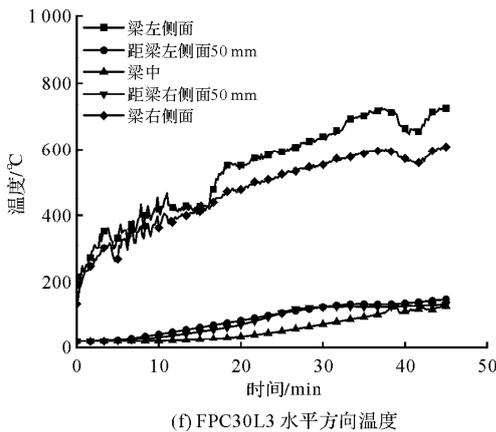
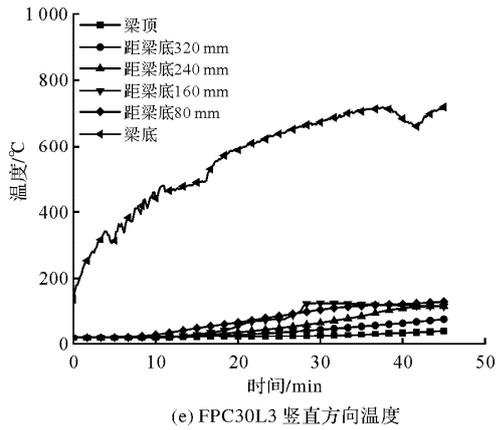


图8 混凝土温度随时间变化曲线

Fig. 8 Time history curves of concrete temperature in beams

试验梁跨中位置钢筋温度随时间变化曲线如图9所示。

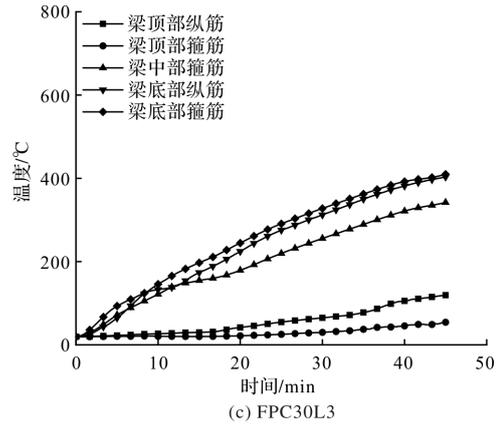
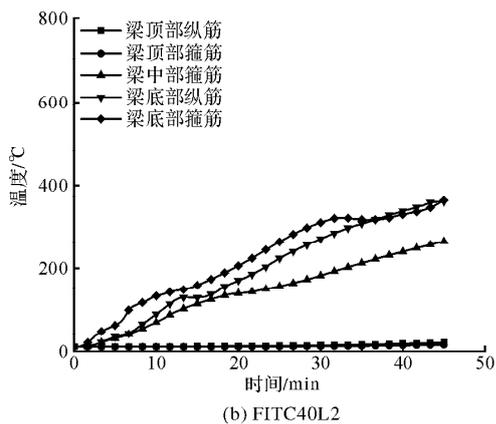
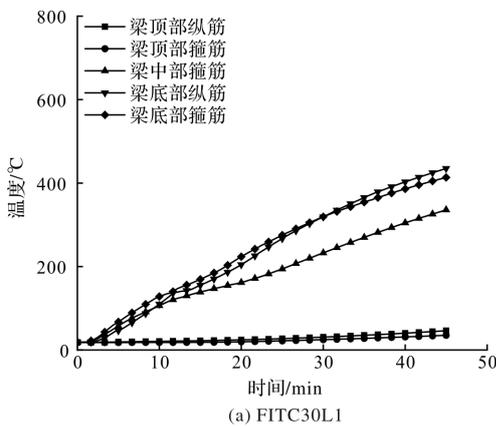


图9 钢筋温度随时间变化曲线

Fig. 9 Time history curves of rebar temperature in beams

在简支梁跨中截面钢筋温度场中,箍筋与纵筋在同一位置处温度相似,梁底箍筋升温最快,其次为箍筋中段,上侧钢筋温度最低.至试验结束时,梁底部纵筋温度均超过 360 °C.

3.4 变形

试验梁跨中位置竖向位移随时间变化曲线如图10所示,受火45min时,跨中挠度如表3所示。

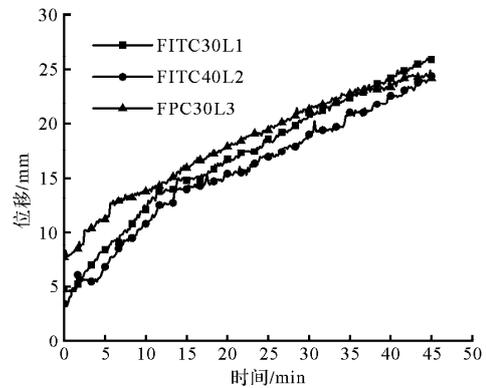


图10 竖向位移随时间变化曲线

Fig. 10 Time history curves of vertical displacement

表3 受火45min简支梁跨中挠度

Tab. 3 Mid span deflection of simply supported beams

under fire for 45 min

试件名称	跨中最大挠度/mm
FITC30L1	26.056
FITC40L2	25.25
FPC30L3	24.628

由图10及表4可知,火灾试验从开始到40min,铁尾矿砂梁比普通混凝土梁的跨中挠度小.火灾试验进行时间超过40min后,普通混凝土梁FPC30L3跨中挠度增长变缓.与天然砂混凝土梁FPC30L3相比,铁尾矿砂梁FITC30L1的跨

中最大挠度增大了 5.8%。C30 铁尾矿砂梁 FITC30L1 与 C40 铁尾矿砂梁 FITC40L2 跨中挠度增长趋势基本相同, 受火 45 min 时, C30 铁尾矿砂梁的跨中最大挠度比 C40 铁尾矿砂梁跨中挠度增加了 3.2%。

## 4 火灾后静载试验结果

### 4.1 破坏形态

对简支梁 ITC30L1、ITC40L2、PC30L3 进行常温下的静载试验, 对简支梁 FITC30L1、FITC40L2、FPC30L3 冷却至室温后进行静载试验。由于简支梁 FITC30L1、FITC40L2、FPC30L3 受火灾高温作用影响, 梁表面在静载试验开始前已存在部分裂纹, 因此在试验开始前对已出现的裂纹进行标记, 与加载时出现的裂纹进行区分。各简支梁的裂纹分布如图 11 所示。

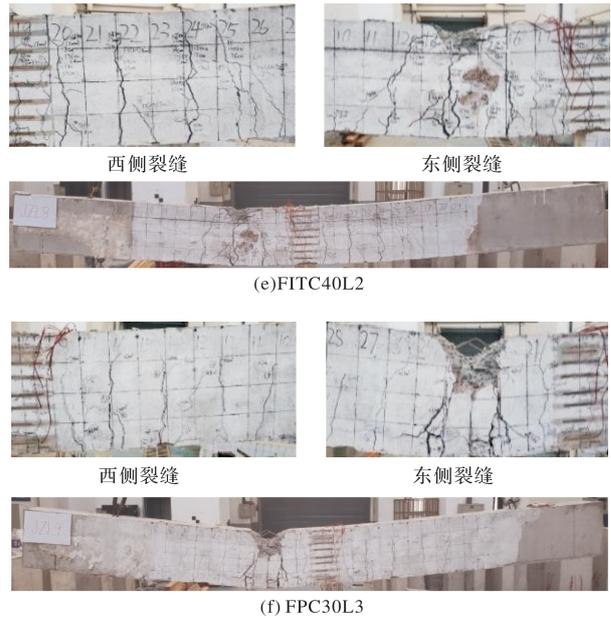
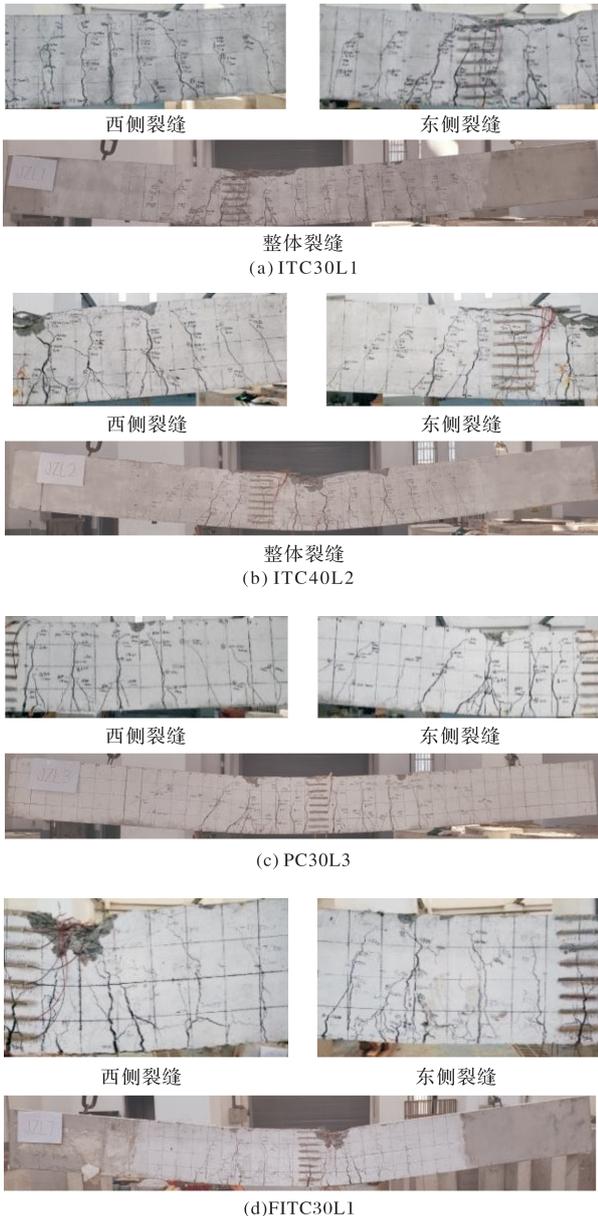


图 11 静载试验裂缝分布

Fig. 11 Crack distribution in static load test

由图 11 (a)、(b) 和 (c) 可知, 未受火梁 ITC30L1、ITC40L2、PC30L3 都是加载至 40kN 时在跨中纯弯段出现裂缝, 随着荷载的增加, 裂缝逐渐变多宽度变大, 向破坏点发展逐渐形成贯通裂缝, 最终简支梁无法持荷发生破坏。

由图 11(e)、(f)和(g)可知, 受火 45min 后的梁 FITC30L1、FITC40L2、FPC30L3, 随着荷载增加, 火灾下出现的裂缝逐渐增大; 加载至 30kN 时, 跨中纯弯段出现新的裂缝, 随着荷载增大, 裂缝向上发展至加载点, 加载点处混凝土发生压碎, 简支梁无法持荷破坏。

### 4.2 验证平截面假定

图 12 为各简支梁静载试验混凝土应变分布。试验利用布置在梁跨中的应变片测得的数据来验证平截面假定, 为防止试验后期因应变片断裂而造成的误差过大, 故选取试验前期荷载分别加至 30 kN 和 50 kN 两个测点。由图 12 可知, 随着所施加外荷载的增大, 铁尾矿砂梁跨中平均应变增大; 在同一荷载作用下, 简支梁跨中同一平面应变连线基本为一条直线, 火灾后的简支梁应变均大于常温下的简支梁。这表明, 铁尾矿砂梁的跨中应变在梁高上分布情况基本满足平截面假定。

### 4.3 荷载—挠度曲线

试验梁跨中荷载—挠度曲线如图 13 所示。采用两点加载方案时, 整个静载试验过程中加载点及跨中位置挠度基本相同, 简支梁最终在跨中区域破坏。火灾试验结束后停火降温, 自然冷却

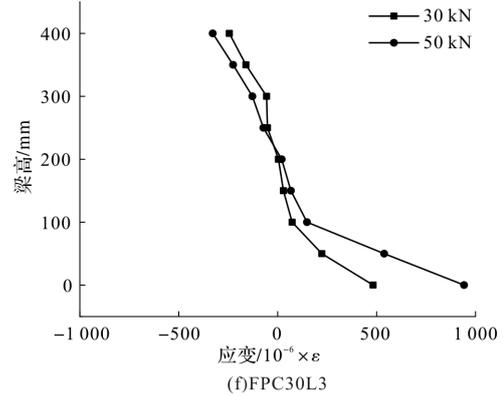
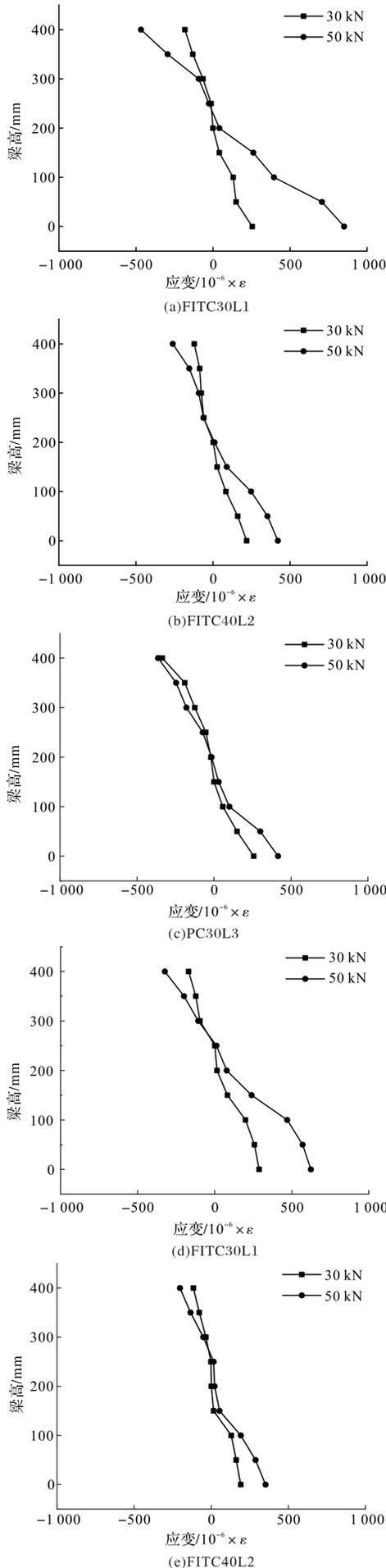


图 12 静载试验混凝土应变分布

Fig. 12 Strain distribution of concrete in static load test

至室温, 加载点及跨中位置截面恢复后刚度大致相同. 火后静载试验, 在弹性阶段, 加载点及跨中位置挠度基本相同. 图 13 所示, 对比梁 ITC30L1 与梁 PC30L3 可知, 未受火的 C30 铁尾矿砂混凝土梁破坏时跨中挠度比天然砂混凝土梁的挠度增加了 49.9%; 对比梁 ITC30L1 与梁 ITC40L2 可知, 未受火的 C30 铁尾矿砂混凝土梁破坏时跨中挠度比 C40 铁尾矿砂混凝土梁跨中挠度增加了 10.6%. 受火 45 min 后, 破坏时铁尾矿砂混凝土梁 FITC30L1 比天然砂混凝土梁 FPC30L3 跨中挠度增大了 39.6%; 对比梁 FITC30L1 与 FITC40L2 可知, 破坏时 C30 铁尾矿砂混凝土梁跨中挠度比 C40 铁尾矿砂混凝土梁跨中挠度增加了 19.3%.

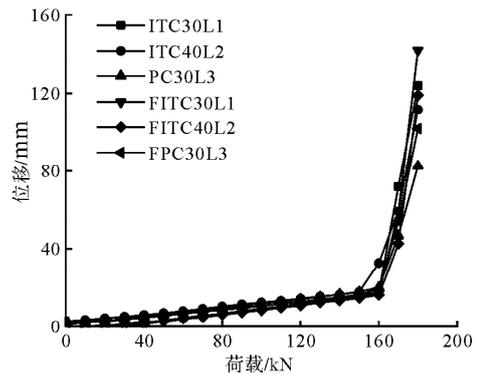


图 13 试验梁荷载—挠度曲线

Fig. 13 Load-deflection curves of beams

#### 4.4 受火后残余抗弯承载力

不同参数简支梁抗弯承载力如表 4 所示. 由表可知, 由于明火作用时间较短, 受拉钢筋及混凝土的温度较低, 自然冷却后, 其力学性能损伤较小, 对简支梁火灾后抗弯承载力影响较小. 不论是常温还是火灾后铁尾矿砂混凝土梁的极限抗弯承载力都要略大于普通混凝土梁. 常温铁尾矿砂

混凝土梁 ITC30L1 的残余抗弯承载力比普通混凝土梁 PC30L3 提升 1.66%, 火灾后铁尾矿砂混凝土梁 FITC30L1 的残余抗弯承载力比普通混凝土梁 FPC30L3 提升 2.78%, C40 铁尾矿砂混凝土梁 FITC40L2 的残余抗弯承载力比 C30 梁 FITC30L1 平均提升 1.67%。火灾后铁尾矿砂简支梁 FITC30L1 比常温铁尾矿砂简支梁 ITC30L1 残余抗弯承载力下降 0.56%。

表 4 试验梁抗弯承载力

Tab. 4 The flexural bearing capacity of beams

试件 编号	抗弯承 载力/kN	提升/%	试件 编号	残余承 载力/kN	提升/%
ITC30L1	181	—	FITC30L1	180	—
ITC40L2	184	1.66	FITC40L2	183	1.67
PC30L3	178	-1.66	FPC30L3	175	-2.78

## 5 结论

对 4 根足尺铁尾矿砂钢筋混凝土梁和 2 根天然砂钢筋混凝土梁进行了标准火灾试验和静载试验, 研究铁尾矿砂全部替代天然砂、铁尾矿砂混凝土强度对钢筋混凝土梁火灾后抗弯性能的影响, 得出以下结论:

(1) 铁尾矿砂完全替代天然砂对火灾下简支梁混凝土和钢筋的温度场几乎没有影响, 火灾后铁尾矿砂梁的跨中应变在梁高上分布情况基本满足平截面假定。铁尾矿砂混凝土梁顶部的混凝土、纵向钢筋和箍筋的温度曲线在大约 100°C 时产生了一个温度滞后平台;

(2) 受火 45 min 内, 铁尾矿砂混凝土简支梁跨中挠度与天然砂混凝土梁跨中挠度增长趋势相近。铁尾矿砂混凝土强度越高, 火灾下跨中挠度越小, C40 铁尾矿砂梁的跨中最大挠度比 C30 铁尾矿砂梁跨中挠度降低了 3.2%;

(3) 受火 45 min 后, 铁尾矿砂混凝土梁的残余抗弯承载力与天然砂混凝土梁无明显差异, 但破坏时跨中挠度显著增加。不同铁尾矿砂混凝土强度(C30、C40)对简支梁的火灾后抗弯承载力影响不大。经历相同受火时间后, 相较于 C30 铁尾矿砂简支梁, C40 铁尾矿砂简支梁的残余抗弯承载力只提升了 1.67%。

## 参考文献 References

[1] 王建超, 宋洪缘, 马光卓. 火灾后混凝土结构建筑应急加固方案优选研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2022, 54(3):331-337.

WANG Jianchao, SONG Hongyuan, MA Guangzhuo. Research on optimum selection of emergency reinforcement scheme for concrete structures after fire[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2022, 54(3): 331-337.

- [2] KHALIQ W, KHAN H A. High temperature material properties of calcium aluminate cement concrete[J]. Construction and Building Materials, 2015 (94): 475-487.
- [3] 徐玉野, 吴波, 王荣辉, 等. 高温后钢筋混凝土梁剩余承载性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013,8:20-29. XU Yuye, WU Bo, WANG Ronghui, et al. Experimental study on residual performance of reinforced concrete beams after fire [J]. Journal of Building Structures, 2013, 8:20-29.
- [4] CHOI E G, SHIN Y S, KIM H S. Structural damage evaluation of reinforced concrete beams exposed to high temperatures[J]. Journal of Fire Protection Engineering, 2013, 23 (2): 135-151.
- [5] 吕晓, 赵瑞丽, 舒赣平, 等. 中空夹层圆钢管超高强混凝土短柱火灾后承载性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2022,54(4):543-550. LÜ Xiao, ZHAO Ruili, SHU Ganping, et al. Experimental study on post-fire bearing performance of ultra-high strength concrete filled double-skin circular steel tubular column[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2022,54(4):543-550.
- [6] 许文龙, 周戟, 刘朝峰, 等. 考虑爆裂影响的钢筋混凝土梁火灾温度场数值分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(9):33-38. XU Wenlong, ZHOU Ji, LIU Chaofeng, et al. Numerical analysis on temperature field of reinforced concrete beam under fire considering spalling effect[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15 (9):33-38.
- [7] HASSAN A, KHAIRALLAH F, ELSAYED H, et al. Behaviour of concrete beams reinforced using basalt and steel bars under fire exposure[J]. Engineering Structure, 2021, 238: 112251.
- [8] 杨志年, 齐建全, 段开达, 等. 钢筋混凝土梁高温下抗剪性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(10):57-62. YANG Zhinian, QI Jianquan, DUAN Kaida, et al. Experimental study on shear properties of RC beams under high temperature[J]. Industrial Construction, 2020, 50(10): 57-62.
- [9] 杨志年, 齐建全, 段开达, 等. 钢筋混凝土梁火灾下抗剪性能的试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(6): 1520-1530. YANG Zhinian, QI Jianquan, DUAN Kaida, et al. Experimental research on shear behavior of reinforced

- concrete beams in fire[J]. Journal of Guangxi University (Nat. Sci. Ed.), 2019, 44(6): 1520-1530.
- [10] 杨志年, 陈明远, 王兴国, 等. 高温下钢筋混凝土框架梁抗剪性能研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(4): 1054-1060.
- YANG Zhinian, CHEN Mingyuan, WANG Xingguo, et al. Research on shear behavior of reinforced concrete frame beams at high temperature[J]. Journal of Guangxi University (Nat. Sci. Ed.), 2016, 41(4): 1054-1060.
- [11] PRAKASH A, SWAMINATHEN A, RAMU A, et al. Assessment of strength and durability parameters for concrete with partial replacement of coarse aggregates by iron slag and glass powder as an additive[J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2021, 1126: 012082.
- [12] KARTHIKEYAN B, KATHYAYINI R, KUMAR VA, et al. Effect of dumped iron ore tailing waste as fine aggregate with steel and basalt fibre in improving the performance of concrete[J]. Material Today Proceeding. 2021, 46: 7624-7632.
- [13] 陈虎, 沈卫国, 单来, 等. 国内外铁尾矿排放及综合利用状况探讨[J]. 混凝土, 2012(2): 88-92.
- CHEN Hu, SHEN Weiguo, SHAN Lai, et al. Situation of discharge and comprehensive utilization of iron tailings domestic and abroad[J]. Concrete, 2012(2): 88-92.
- [14] GANESH P G, HYUN J H, KIM Y Y. Effects of foundry sand as a fine aggregate in concrete production [J]. Construction and Building Materials, 2014 (70): 514-521.
- [15] 蔡基伟, 张少波, 侯桂香, 等. 铁尾矿砂对混凝土工作性和强度的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(7): 104-107.
- CAI Jiwei, ZHANG Shaobo, HOU Guixiang, et al. Effects of ferrous mill tailings as aggregates on workability and strength of concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(7): 104-107.
- [16] 刘文博, 姚华彦, 王静峰, 等. 铁尾矿资源化综合利用现状[J]. 材料导报, 2020, 34(S1): 268-270.
- LIU WENBO, YAO HUAYAN, WANG Jingfeng, et al. Current situation of comprehensive utilization of Iron tailings[J]. Materials Report, 2020, 34(S1): 268-270.
- [17] 管品武, 孟会英, 邝周飞. 掺尾矿砂混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 新型建筑材料, 2016, 43(1): 18-20, 29.
- GUAN Pinwu, MENG Huiying, KUANG Zhoufei. Experimental research on the flexural performance of concrete beams with mine tailings sand [J]. New Building Materials, 2016, 43(1): 18-20, 29.
- [18] 张龙生. 铁尾矿砂混凝土筒支梁抗弯刚度和裂缝试验研究[D]. 成都:西南交通大学, 2015.
- ZHANG Longsheng. Research on bending stiffness and crack of simply-supported beam of iron tailing concrete [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [19] 王光琦. 铁尾矿砂钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究[D]. 唐山:华北理工大学, 2015.
- WANG Guangqi. Experimental research on flexural behavior of reinforced concrete iron tailings [D]. Tangshan: Northwest University of Science and Technology, 2015.
- [20] 马卫华, 孟庆娟, 康洪震, 等. 铁尾矿砂混凝土梁受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(S1): 322-329.
- MA Weihua, MENG Qingjuan, KANG Hongzhen, et al. Experimental study on shear performance of iron tailings concrete beams[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(S1): 322-329.
- [21] 李壮. 高温后铁尾矿砂混凝土力学性能试验研究[D]. 广州:华南理工大学, 2020.
- LI Zhuang. Experiment study on mechanical properties of concrete with iron tailings after high temperature [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [22] CHEN J H, YUAN Y X, ZHU Q, et al. High-temperature resistance of high-strength concrete with iron tailing sand [J]. Journal of Building Engineering, 2022; 63(1): 105544.
- [23] ZHU Q, Yuan Y X, Chen J H, et al. Research on the high-temperature resistance of recycled aggregate concrete with iron tailing sand[J]. Construction and Building Materials, 2022, 327: 126889.
- [24] ZHOU Y L, YANG Z N, YOU Z G, et al. Experimental study on fire resistance of concrete beams made with iron tailings sand [J]. Buildings, 2022, 12(11): 1816.
- [25] 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/T 50010—2010. (2015 版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB/T 50010—2010. (2015) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012. [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China. Standard for test method of concrete structures: GB/T 50152—2012. [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.