

高温对不同钢纤维掺量超高性能混凝土性能及 钢纤维拔出机制的影响

韩方玉¹, 吉旭平^{2,3}, 刘加平¹, 潘亭宏⁴, 赵文昊^{2,3}, 汤金辉¹, 沙建芳^{2,3}, 刘建忠^{2,3}

(1. 东南大学材料科学与工程学院, 南京 2111031; 2. 江苏苏博特新材料股份有限公司, 南京 211103; 3. 高性能土木工程材料国家重点实验室, 南京 211103; 4. 昆明理工大学建筑工程学院, 昆明 650000)

摘 要: 为揭示高温对超高性能混凝土(UHPC)性能及钢纤维拔出机制的演变规律, 研究了 25~800 °C 钢纤维对 UHPC 力学/热工性能的影响规律, 并基于纤维拔出以及 SEM 测试揭示了钢纤维的高温拔出机制。结果表明: 钢纤维会提高 UHPC 的导热系数, 但不改变其随温度升高而降低的基本规律, 比热容则相反; UHPC 的抗压强度和弹性模量随温度升高先增后减, 钢纤维可改善其高温残余抗压强度, 但对弹性模量影响较小; 温度改变钢纤维拔出模式, 25~200 °C 时, 钢纤维拔出时表面光滑, UHPC 抗拉强度变化不大; 400 °C 时, 钢纤维拔出会附带部分基体, UHPC 抗拉强度开始显著下降; 600 °C 及以后钢纤维表现为拔断破坏, 钢纤维掺量对 UHPC 抗拉强度影响较小。

关键词: 超高性能混凝土; 高温; 钢纤维; 力学性能; 热工参数; 拔出机制

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2024)11-3565-07

网络出版时间: 2024-04-25



超高性能混凝土(UHPC)作为一种先进的水泥基纤维增强复合材料, 因其致密基体和掺有大量钢纤维具有高强、高韧性、高耐久的特点, 常作为承力构件被广泛应用于各类大跨及高层结构的关键部位^[1-2]。然而, 日益频发的火灾灾害对 UHPC 的安全服役性提出了巨大挑战。其中, 钢纤维作为 UHPC 实现超高韧性的关键因素, 其在高温环境中的裂化机制将直接影响 UHPC 的高温残余性能。

有研究表明^[3], 钢纤维显著影响 UHPC 高温后的力学性能, Bhat 等^[4]发现 2% 体积掺量钢纤维的 UHPC 在 300 °C 时高温残余抗拉强度仍高于常温值, 但随着温度升高至 800~1 000 °C 时, 钢纤维对 UHPC 的抗折和抗压强度的影响逐渐减小^[5]; 郑文忠等^[6]研究了 UHPC 高温后的单轴受压应力应变关系, 结果表明 UHPC 高温后弹性模量降幅较抗压强度更大; Tai 等^[7]则研究了常温工况时钢纤维掺量对

于 UHPC 弹性模量的影响。除力学性能外, 热工性能也是影响 UHPC 建筑物火灾工况损伤程度的关键因素。UHPC 因其致密结构, 其导热系数往往大于普通混凝土, 其对火灾环境中的热传递无疑更为敏感, 这也增加了 UHPC 在高温环境中服役的不确定性^[8-9]。可以发现, 尽管已有部分学者开展了关于 UHPC 高温后残余性能的研究, 但关于钢纤维在高温环境下对 UHPC 力学及热工性能影响规律的系统研究较少, 尤其关于钢纤维在高温环境中的自身劣化机制更是鲜有报道。

鉴于此, 本工作系统地研究了钢纤维对 UHPC 在高温环境中力学以及热工性能的影响规律, 并建立了钢纤维掺量-温度-力学性能/热工性能之间的数学模型。除此之外, 首次研究了不同温度下钢纤维从 UHPC 基体中的拔出行为变化, 并基于 SEM 测试阐明了钢纤维在高温环境中的劣化机制。该研

收稿日期: 2023-11-22。 修订日期: 2024-02-18。

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2601002); 江苏省基础研究计划自然科学基金-前沿引领技术基础研究专项(BK20222004); 中交科技研发项目(K22096-2); 工程咨询项目(8512008540)。

第一作者: 韩方玉(1988—), 男, 博士, 高级工程师。

通信作者: 吉旭平(1995—), 男, 硕士, 工程师。

刘加平(1967—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2023-11-22. Revised date: 2024-02-18.

First author: HAN Fangyu (1988—), male, Ph.D., Senior Engineer.

E-mail: hanfanyu@cnjsjk.cn

Correspondent author: JI Xuping (1995—), male, Master, Engineer.

LIU Jiaping (1967—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: jixuping@cnjsjk.cn; 101011659@seu.edu.cn

究结果可为 UHPC 建筑物的高温温度场模拟及高温残余力学性能评估提供理论参考。

1 实验

1.1 原材料及配比

水泥选用小野田 P·II 52.5 水泥, 平均粒径为 12.1 μm , 密度为 3.08 kg/m^3 , 其化学组成见表 1; 掺合料为江苏苏博特新材料股份有限公司生产的复合掺合料(HDC), 密度为 2.58 g/cm^3 , 比表面积为 3.1 g/cm^3 ; 砂为粒径 ≤ 1.17 mm 的石英砂, 细度模数为 2.7, 其 SiO_2 含量大于 98%, 莫氏硬度大于 7.0; 钢纤维采用直径 0.2 mm、长度 13 mm 的平直型镀铜钢纤维, 抗拉强度大于 3 000 MPa; 同时, 掺入适量聚丙烯纤维(PPF)以降低 UHPC 高温爆裂风险, 其密度为 0.91 g/cm^3 , 熔点为 165 $^{\circ}\text{C}$; 减水剂采用江苏苏博特新材料有限公司生产的聚羧酸高性能减水剂, 减水率为 40%。

制备钢纤维体积掺量分别为 0%、1.0%、2.0% 和 2.5% 的 UHPC, 具体配合比如表 2 所示。

1.2 高温试验

将养护至 28 d 龄期的试件擦干表面水分, 放置于干燥通风处进行同等条件养护, 待其含湿量不再变化后进行高温试验。试验时, 采用电加热高温炉进行高温试验, 炉内放置耐高温不锈钢笼以防止混凝土试件高温爆裂损坏加热棒。升温时控制其升温速率为 1 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以尽可能降低过快的升温速率产生的热应力对混凝土性能的影响, 恒温时间为 4 h, 目标温度设置为 200、400、600 $^{\circ}\text{C}$ 和 800 $^{\circ}\text{C}$, 待试件在高温炉内自然冷却至常温后进行相关测试。

1.3 力学性能测试

UHPC 力学性能测试采用万能试验机进行, 其中抗压试件尺寸为 100 mm $\times$ 100 mm $\times$ 100 mm, 加载方式为力加载, 加载速率为 1.2 MPa/s; 弹性模量试件尺寸为 100 mm $\times$ 100 mm $\times$ 300 mm, 具体按 GB/T50081《混凝土物理力学性能试验方法标准》相关规定进行; 抗拉试件为狗骨头状, 长度为 400 mm, 宽度为 100 mm, 腰部尺寸为 50 mm $\times$ 100 mm $\times$ 220 mm, 标距为 300 mm, 加载方式为位移加载, 加载速率为 0.03 mm/min。

1.4 热工参数测试

热工参数(导热系数、比热容)采用 HotDisk TPS2500S 热常数分析仪测量, 该仪器测量热工参数时可直接连接到加热炉, 试件尺寸为 50 mm $\times$ 50 mm $\times$ 10 mm。

1.5 钢纤维拔出试验

参照 CECS13:2009《纤维混凝土试验方法标准》进行钢纤维拔出试验。另外, 浇筑时埋置 2 根钢纤维以减少数据误差。测量时, 加载速率控制为 0.5 mm/min。

钢纤维粘结强度按式(1)计算:

$$\tau = \frac{P_m}{2\pi d_f l_f} \quad (1)$$

式中: P_m 为钢纤维拔出时的最大荷载, N; d_f 为钢纤维直径, 取 0.2 mm; l_f 为钢纤维埋入深度, 为 5 mm。

钢纤维拔出能按式(2)计算:

$$W = \int P dx \quad (2)$$

式中: P 为荷载, N; x 为拔出位移, mm。

1.6 微结构测试

采用仪器型号为 Zeiss Sigma 300 的扫描电子显微镜(SEM)研究不同温度下钢纤维拔出时的形貌特征。

表 1 水泥的化学组成

Table 1 Chemical composition of cement

w/%

CaO	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Others
65.5	19.8	1.2	3.5	4.4	3.2	0.1	0.5	0.3	1.5

w is mass fraction.

表 2 不同钢纤维掺量超高性能混凝土配比

Table 2 Mix proportions of different steel fiber content UHPC

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$

Type	Cement	HDC	Sand	Superplasticizer	PPF	Water	Steel Fiber
SF0	700	350	1 180	30	2	150	0
SF1	700	350	1 180	30	2	150	78
SF2	700	350	1 180	30	2	150	156
SF2.5	700	350	1 180	30	2	150	195

HDC is Product model code for composite admixtures produced by Jiangsu Subote New Materials Co., Ltd. PPF is Polypropylene fiber.

2 结果与讨论

2.1 UHPC 力学性能

2.1.1 抗压强度 图 1 为不同钢纤维掺量 UHPC 高温后抗压强度变化规律。随着温度的提高, UHPC 抗压强度先增后减, 并在 200 °C 达到峰值, 这是因为此时毛细管水的蒸发使 UHPC 相当于经历了“自蒸”过程, 有效地促进了活性掺合料的火山灰反应以及水泥颗粒的水化作用^[10]; 另外, 钢纤维的掺入不仅提高了 UHPC 常温状态下的抗压强度, 并且随着温度提升其改善作用逐渐明显, 相比于 SF0 与 SF1, SF2 和 SF2.5 可以使得 UHPC 在 400 °C 时仍高于常温抗压强度, 这是因为钢纤维是热的良性导体, 减少了因内外温度差形成的温度应力, 但此时 SF2 与 SF2.5 差异不大, 说明 2% 钢纤维掺量即可保证 UHPC 具有优异的高温残余抗压强度。

将温度 T 、钢纤维掺量 η 和 UHPC 抗压强度 $f_c(T, \eta)$ 进行回归分析, 并拟合其相关关系如式(3)所示:

$$f_c(T, \eta) = -3.41 \times 10^{-4} T^2 + 8.02 \times 10^{-3} T \eta + 0.14 T + 5.06 \eta + 131.2, R^2 = 0.99 \quad (3)$$

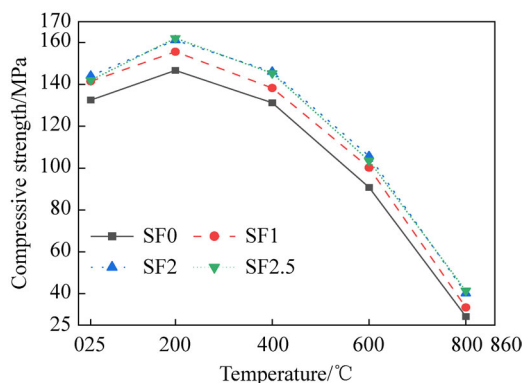


图 1 抗压强度随温度的变化

Fig. 1 Effect of temperature on compressive strength

2.1.2 抗拉强度 图 2 为高温后不同钢纤维掺量 UHPC 抗拉强度(极限抗拉强度)的变化规律。不同于 UHPC 抗压强度随温度升高先增后减的规律, 其抗拉强度随着温度升高几乎呈单调递减规律, 且损失率程度更大。其中, 钢纤维掺量的提升能明显提高 UHPC 在常温以及 200 °C 的抗拉强度, 但其提升程度随着温度的升高逐渐减弱, 到 800 °C 时已区别不大。这是因为尽管钢纤维是实现 UHPC 在常温工况下超高韧性的关键因素, 但钢纤维自身的力学性能极易受高温影响, 最终严重劣化了 UHPC 抗拉性能, 关于钢纤维在高温环境中的拔出性能变化规律

可见下节报道。

将温度 T 、钢纤维掺量 η 和 UHPC 抗拉强度 $f_T(T, \eta)$ 进行回归分析, 并拟合其相关关系如式 4 所示:

$$f_T(T, \eta) = -4.04 \times 10^{-6} T^2 - 2.73 \times 10^{-3} T \eta - 2.27 \times 10^{-3} T + 2.29 \eta + 5.62, R^2 = 0.98 \quad (4)$$

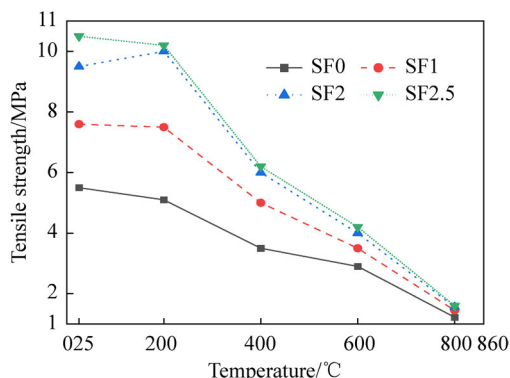


图 2 抗拉强度随温度的变化

Fig. 2 Effect of temperature on tensile strength

2.1.3 弹性模量 图 3 为高温后不同钢纤维掺量 UHPC 弹性模量的变化规律, 可以发现 UHPC 弹性模量随温度的升高先增后降, 其整体变化规律与抗压强度类似。不同的是, 弹性模量在 200 °C 达到峰值后的下降程度更大, 其对高温的敏感性要大于其他力学性能指标, 比如在 400 °C 时仅有常温下弹性模量的 50% 左右, 这是因为 300~400 °C 的高温会导致水化硅酸钙(C-S-H)失去层间水和部分化学结合水, 使得 C-S-H 的微观结构遭到破坏, 导致 UHPC 弹模迅速下降^[11]。另外, 钢纤维的掺入不影响 UHPC 弹性模量在高温作用后的整体变化趋势, 且不同钢纤维掺量对 UHPC 弹性模量的影响较小, 尤其在 600 °C 后这种差异性更小。这主要是因为混凝土弹性模量的高温损伤从根本上是受大量纳米级孔隙存在的影响^[12], 而钢纤维主要是在微观尺度上改变了基体的孔结构^[13], 因此掺入钢纤维的 UHPC 与 SF0 相比没有显著改善。

将温度 T 、钢纤维掺量 η 和 UHPC 弹性模量 $f_c(T, \eta)$ 进行回归分析, 并拟合其相关关系如式(5)所示:

$$f_c(T, \eta) = -6.32 \times 10^{-2} T + 1.33 \eta + 50.75, R^2 = 0.97 \quad (5)$$

2.2 UHPC 热工性能

2.2.1 导热系数 图 4 为不同钢纤维掺量 UHPC 导热系数随温度变化的规律。可以发现钢纤维的掺入有效地提高了 UHPC 的导热系数, 这是因为

UHPC 属于纤维复合材料,其内部搭接的钢纤维(导热系数达到 $50\sim 60\text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$)易形成传热通路从而更易导热;另外,钢纤维掺入未对 UHPC 导热系数整体变化规律产生影响,其导热系数随着温度的提升呈现单调递减规律,这主要是因为高温使得 UHPC 中的有机纤维融化、自由水持续蒸发、水化产物持续分解等降低了体系的表观密度,从而降低了导热系数^[14],而这些仅与 UHPC 基体特性相关。

将温度 T 、钢纤维掺量 η 和 UHPC 导热系数 $f_h(T, \eta)$ 进行回归分析,并拟合其相关关系如式(6)所示:

$$f_h(T, \eta) = 7.6 \times 10^{-7} T^2 - 1.38 \times 10^{-4} T \eta - 1.6 \times 10^{-3} T + 0.16 \eta + 1.65, R^2 = 0.98 \quad (6)$$

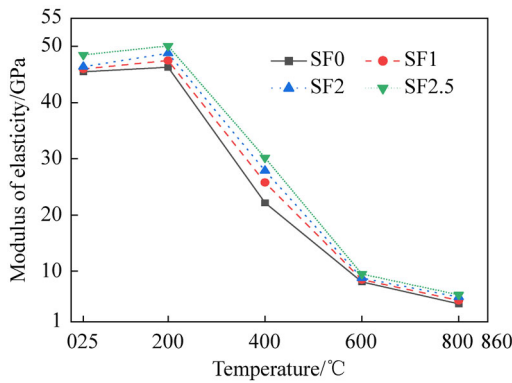


图3 弹性模量随温度的变化

Fig. 3 Effect of temperature on elasticity modulus

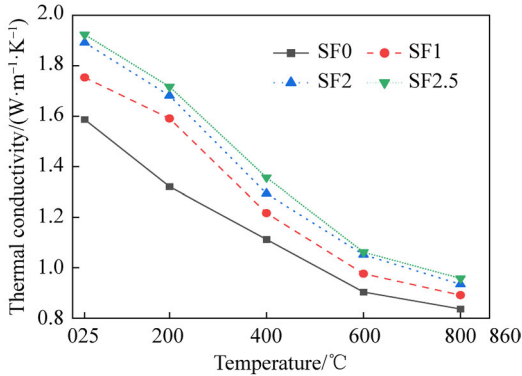


图4 导热系数随温度的变化

Fig. 4 Effect of temperature on thermal conductivity

2.2.2 比热容 图5为不同钢纤维掺量 UHPC 比热容随温度变化的规律。可以发现比热容随着温度的增长而增加,尤其在 200°C 附近时增幅较大,这主要是因为此时 UHPC 体系中有有机纤维的融化以及游离水的蒸发吸收了大量热量,而水的比热容达到了 $4.2 \times 10^3\text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$,远大于 UHPC 基体自身的储热性能;另外,钢纤维的掺入不会影响 UHPC 比热

容的整体变化规律,随着钢纤维掺量的增加, UHPC 的比热容逐渐降低,这是由于钢纤维的比热容远小于 UHPC 基体比热容所导致^[15]。

将温度 T 、钢纤维掺量 η 和 UHPC 比热容 $f_s(T, \eta)$ 进行回归分析,并拟合其相关关系如式(7)所示:

$$f_s(T, \eta) = -1.8 \times 10^{-7} T^2 - 6.19 \times 10^{-6} T \eta + 2.49 \times 10^{-4} T - 0.11 \eta + 1.08, R^2 = 0.99 \quad (7)$$

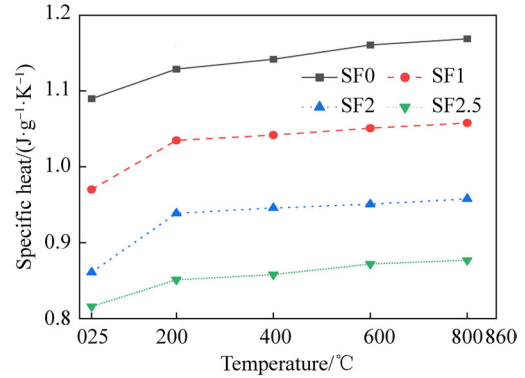


图5 比热容随温度的变化

Fig. 5 Effect of temperature on specific heat capacity

2.3 钢纤维拔出机制

图6和图7为不同温度下钢纤维被拔出时的位移-荷载曲线及相关参数统计结果。可以发现,钢纤维的最大拔出荷载,拔出功与粘结强度在 200°C 时相比于常温有不同程度提高,但在 400°C 时开始有较大幅度下降, 600°C 及以后,钢纤维的失效模式由拔出转变为拔断模式,其最大拔出荷载等参数也明显下降。可以发现,上述规律与 UHPC 高温后的抗拉强度变化十分相似,即 200°C 不会对钢纤维粘结强度以及 UHPC 抗拉强度有较大负面影响,甚至有积极作用,但 400°C 成为了 UHPC 抗拉强度及钢纤维粘结强度显著下降的转折温度,并随着温度的升高, UHPC 抗拉强度及钢纤维粘结强度持续下降。

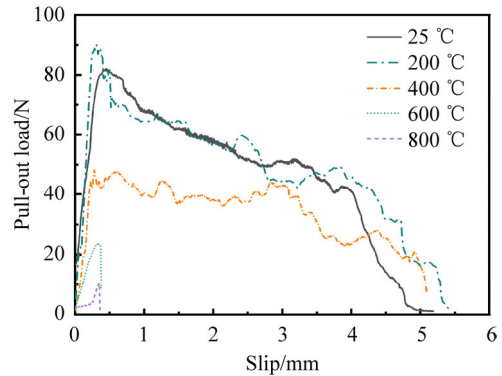


图6 各温度下钢纤维拔出的位移-荷载曲线

Fig. 6 Displacement-load curves for steel fiber pull-out at various temperatures

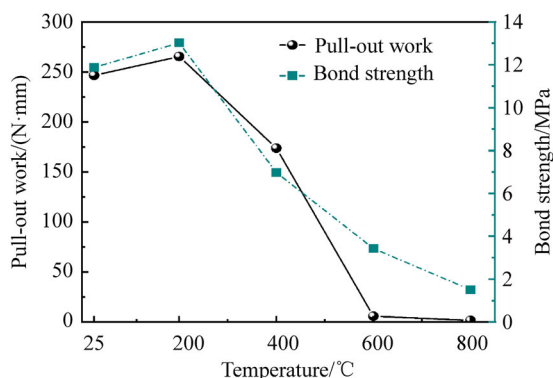


图 7 各温度下钢纤维的拔出功与粘结强度

Fig. 7 Pull-out work and bond strength of steel fibers at various temperatures

图 8 为不同温度下钢纤维拔出时的 SEM 照片。可以发现, 未经高温处理的样品中, 拔出的钢纤维表面光滑、完整, 几乎没有基体附着, 这是因为常温下钢纤维在拔出过程中, 主要沿着纤维-基体界面过渡区剪切破坏, 但是该剪切力不足以损坏纤维及基体^[16]; 200 °C 时, 钢纤维表面仍然较为光滑, 并

观察到沿纤维径向的划痕, 这是因为钢纤维在高温下产生膨胀, 于纤维-基体界面过渡区处产生应力集中, 并一定程度上促进了纤维与基体之间的粘结, 导致拔出过程中产生的剪切力增大, 但是该剪切力依然不足以损坏基体(200 °C 起到类似对 UHPC 基体的热养护作用, 增强了基体相强度); 400 °C 时, 钢纤维在拔出时开始携带部分基体, 这是因为随着温度升高至 400 °C, 钢纤维与基体间愈发严重的热不相容性以及 UHPC 基体相的部分高温劣化, 降低了纤维-基体之间的界面粘结力, 使得基体不能克服钢纤维拉拔过程中产生的剪切力, 导致一部分基体附着在拔出的纤维表面; 600 °C 时, 钢纤维开始发生明显氧化作用, 大量铁锈在表面生成, 导致其自身的力学性能发生明显退化, 且其劣化程度大于纤维-基体界面过渡区, 最终导致钢纤维被拔断^[17]; 800 °C 时, 尽管 UHPC 基体也遭遇水化产物分解等严重劣化, 但钢纤维自身组织形貌的劣化程度更为严重, 使得其破坏模式仍为钢纤维被拔断。

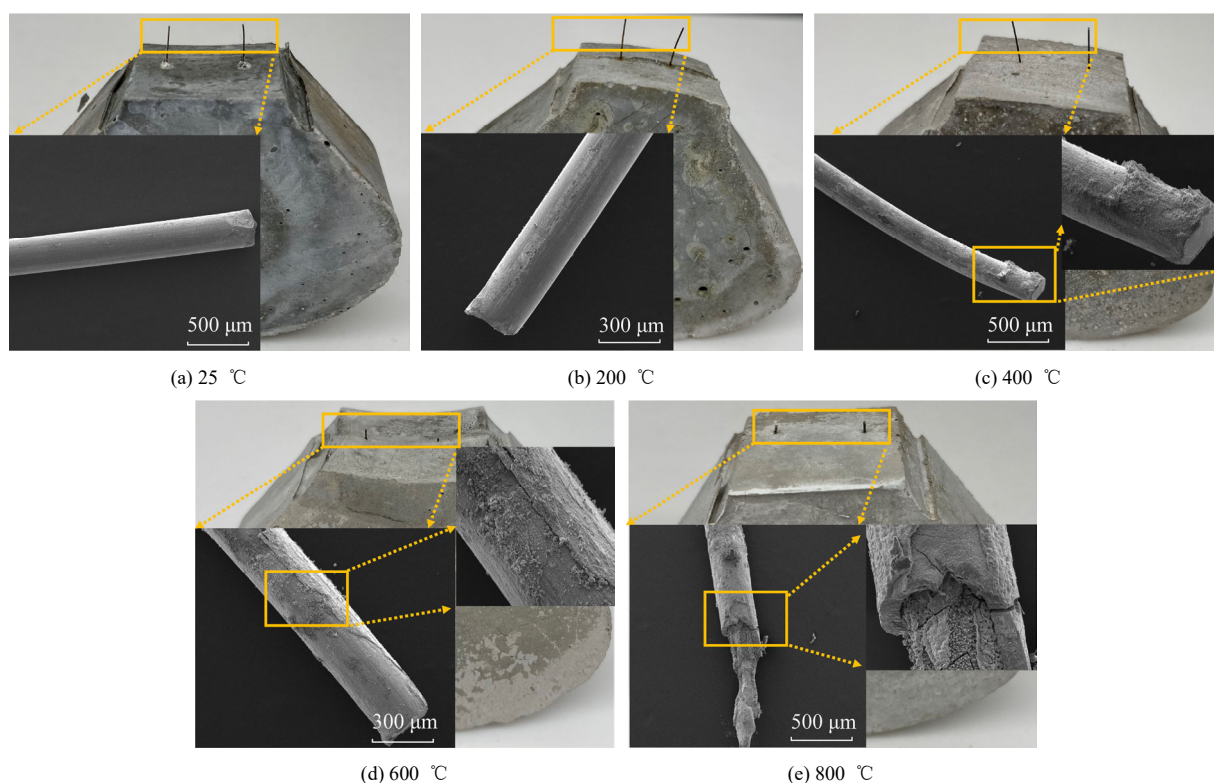


图 8 不同温度下的钢纤维拔出状态

Fig. 8 Extraction state of steel fibers at different temperatures

3 结论

1) UHPC 抗压强度随温度升高先增后减, 并在

200 °C 达到峰值。钢纤维的掺入不影响 UHPC 高温残余抗压强度变化趋势, 但提高其残余强度绝对值, 其中 2% 钢纤维掺量可保证 UHPC 抗压强度在

400 °C 时仍大于常温抗压强度。

2) 温度改变钢纤维拔出模式, 25~200 °C 时, 钢纤维拔出时表面光滑, UHPC 抗拉强度变化不大; 400 °C 时, 钢纤维拔出会附带部分基体, UHPC 抗拉强度开始显著下降; 600 °C 及以后钢纤维表现为拔断破坏, 不同钢纤维掺量 UHPC 的抗拉强度持续下降, 且差异值逐渐缩小。

3) UHPC 弹性模量在 200 °C 达到峰值后便开始急速下降, 其对高温作用的敏感性要远大于抗压以及抗拉强度变化, 该值建议可作为相关建筑火灾后安全性评估的重要指标, 钢纤维的掺入不影响其整体发展规律。

4) 钢纤维能明显提高 UHPC 基体的导热系数, 但不会改变导热系数随温度升高而逐渐降低的整体变化趋势; 比热容则表现出与导热系数相反的发展规律。

5) 镀铜型钢纤维作为 UHPC 常用金属纤维, 可在 400 °C 之前保持良好力学性能并发挥增韧阻裂作用; 600 °C 及以后时, 镀铜型钢纤维自身的劣化程度要大于纤维-基体界面过渡区, 并导致 UHPC 的抗拉与抗压下降不协调, 建议此工况下可重点关注钢纤维自身耐高温性能提升。

参考文献:

- [1] ZHANG Y, ZHANG S Q, JIANG X, et al. Insights into the thermal effect on the fracture toughness of calcium silicate hydrate grains: A reactive molecular dynamics study[J]. *Cem Concr Compos*, 2022, 134: 104824.
- [2] HUANG H H, GAO X J, LI L S, et al. Improvement effect of steel fiber orientation control on mechanical performance of UHPC[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 188: 709–721.
- [3] 李海艳. 活性粉末混凝土高温爆裂及高温后力学性能研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2012.
LI Haiyan. Study on high-temperature bursting and post-high-temperature mechanical properties of activated powder concrete[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [4] BHAT M D, REHMAN M U, SHAFI I, et al. The effect of polypropylene and steel fibers on the properties of concrete at normal and elevated temperatures—A review[J]. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*, 2022, 46(3): 1805–1823.
- [5] CITEK D, RYDVAL M, REHACEK S, et al. Material properties of ultra - high performance concrete in extreme conditions[J]. *Key Eng Mater*, 2016, 711: 157–162.
- [6] 郑文忠, 李海艳, 王英. 高温后混杂纤维RPC单轴受压应力-应变关系[J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(3): 388–395.
ZHENG Wenzhong, LI Haiyan, WANG Ying. J Build Mater, 2013, 16(3): 388–395.
- [7] TAI Y S, PAN H H, KUNG Y N. Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800°C[J]. *Nucl Eng Des*, 2011, 241(7): 2416–2424.
- [8] VARONA F B, BAEZA F J, BRU D, et al. Influence of high temperature on the mechanical properties of hybrid fibre reinforced normal and high strength concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 159: 73–82.
- [9] CHEN Y B, ZHANG Y, ZHANG S Q, et al. Experimental study on the thermal properties of a novel ultra-high performance concrete reinforced with multi-scale fibers at elevated temperatures[J]. *Constr Build Mater*, 2023, 366: 130229.
- [10] PENG G F, NIU X J, SHANG Y J, et al. Combined curing as a novel approach to improve resistance of ultra-high performance concrete to explosive spalling under high temperature and its mechanical properties[J]. *Cem Concr Res*, 2018, 109: 147–158.
- [11] 华培成, 彭磊, 韩宇栋, 等. 纳米压痕表征水泥基材料高温后微观力学性能[J]. *工业建筑*, 2019, 49(6): 136–140.
HUA Peicheng, PENG Lei, HAN Yudong, et al. *Ind Constr*, 2019, 49(6): 136–140.
- [12] 史金华, 史才军, 欧阳雪, 等. 超高性能混凝土受压弹性模量研究进展[J]. *材料导报*, 2021, 35: 3067–3075.
SHI Jinhua, SHI Caijun, OUYANG Xue, et al. *Mater Rev*, 2021, 35: 3067–3075.
- [13] XUE C C, YU M, XU H M, et al. Compressive performance and deterioration mechanism of ultra-high performance concrete with coarse aggregates under and after heating[J]. *J Build Eng*, 2023, 64: 105502.
- [14] 刘志勇, 夏溪芝, 张云升, 等. 荷载-温度耦合作用下超高性能混凝土的损伤行为[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49: 1238–1246.
LIU Zhiyong, XIA Xizhi, ZHANG Yunsheng, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2021, 49: 1238–1246.
- [15] 朱德, 韩阳, 沈雷, 等. 高温后钢纤维混凝土热学性能试验研究[J]. *消防科学与技术*, 2020, 39(11): 1477–1481.
ZHU De, HAN Yang, SHEN Lei, et al. *Fire Sci Technol*, 2020, 39(11): 1477–1481.
- [16] QI J N, WU Z M, MA Z J, et al. Pullout behavior of straight and hooked-end steel fibers in UHPC matrix with various embedded angles[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 191: 764–774.
- [17] ZHANG D, JIANG J W, WENG Y W, et al. Pull-out behaviour of steel fibres embedded in ultra-high-performance concrete after exposure to high temperatures[J]. *Constr Build Mater*, 2023, 408: 133630.

Mechanical Properties and Pull-out Behavior of Steel Fibers of Ultra-High Performance Concrete Exposed to High Temperature

HAN Fangyu¹, JI Xuping^{2,3}, LIU Jiaping¹, PAN Tinghong⁴, ZHAO Wenhao^{2,3}, TANG Jinhui¹, SHA Jianfang^{2,3}, LIU Jianzhong^{2,3}
(1. Southeast University, Nanjing, 211103, China; 2. Jiangsu Sobute New Materials Co. Ltd., Nanjing 211103, China; 3. State Key Laboratory of High Performance Civil Engineering Materials, Nanjing 211103, China; 4. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000, China)

Extended Abstract

Introduction Ultra-high performance concrete (UHPC), as an advanced cementitious fiber-reinforced composite material, is often widely used as a load-bearing member in the critical parts of various types of large-span and high-rise structures. However, the increasingly frequent fire disasters have posed a great challenge to the safe serviceability of UHPC. Steel fiber, as an important factor for UHPC to achieve ultra-high toughness, the cracking mechanism of steel fibers exposed to high-temperature will directly affect the high-temperature residual properties of UHPC. Although some scholars have carried out studies on the residual properties of UHPC after high temperature, there are less systematic studies on the influence of steel fibers on the mechanical and thermal properties of UHPC, especially on the deterioration mechanism of steel fibers exposed to high temperature. In view of this, this work systematically investigates the influence of steel fiber on the mechanical and thermal properties of UHPC exposed to high temperature. The mathematical model between steel fiber dosage-temperature-mechanical properties/thermal properties was established. In addition, the changes in the pull-out behavior of steel fibers from the UHPC matrix at different temperatures were investigated for the first time, and the deterioration mechanism of steel fibers exposed to high temperature was elucidated based on SEM tests.

Methods The Onoda P.II 52.5 cement and the blending material produced by Jiangsu Sobute New Material Co. were used, respectively. At the same time, an appropriate amount of polypropylene fiber was mixed to reduce the risk of explosive spalling of UHPC. UHPC with 0%, 1.0%, 2.0% and 2.5% steel fiber volume mixing were prepared. The concrete molding size was 100 mm×100 mm×100 mm, and 28 d standard curing was carried out after the casting was completed. Then the mechanical and thermal properties were tested after high temperature. The changes in the pull-out mechanism of steel fibers after high temperature were also investigated.

Results and discussion The compressive strength of UHPC after high temperature with different steel fiber dosage increases and then decreases with temperature. The addition of steel fibers can improve its overall compressive strength to different degrees. The tensile strength of UHPC shows almost monotonically decreasing with the increase of temperature, and the degree of loss rate is greater. Among them, the enhancement of steel fiber addition can obviously improve the tensile strength of UHPC at room temperature as well as at 200 °C, but the degree of its enhancement with the increase in temperature gradually weakened. The elasticity modulus of UHPC with the increase in temperature first increased and then decreased, and the overall rule of change is similar to the compressive strength. The thermal conductivity of UHPC shows a monotonically decreasing law with temperature, which is mainly because the high temperature makes the organic fiber in UHPC melt, free water continues to evaporate, and the hydration products continue to decompose and so on to reduce the apparent density of the system. The addition of the steel fibers effectively improves the thermal conductivity of UHPC. The specific heat capacity showed the opposite law to the thermal conductivity. In addition, the maximum pull-out load, pull-out work and bond strength of steel fibers at 200 °C increased to varying degrees, compared to room temperature. At 400 °C, relevant parameters began to have a substantial decline. When the temperature reached 600 °C, the failure mode of steel fibers changed from pull-out to pull-off mode.

Conclusions The compressive strength of UHPC increases at the beginning and then decreases with the increase of temperature, and reaches the peak value at 200 °C. The addition of steel fiber does not affect the trend of UHPC residual compressive strength exposed to high temperature, but improve absolute value of its residual strength. Temperature changes pull-out mode of steel fiber. At 25–200 °C, the surface of the steel fibers was smooth when they were pulled out, and the tensile strength of UHPC did not change much. At 400 °C, steel fibers were attached to part of the matrix when they were pulled-out, UHPC tensile strength began to drop significantly. At 600 °C, the failure mode of steel fibers changed from pull-out to pull-off mode. The tensile strength of UHPC with different steel fibers continues to decline, and the difference gradually narrowed. The elasticity modulus of UHPC reached its peak at 200 °C and began to decline rapidly, and its sensitivity to high temperature is much greater than the compressive and tensile strength changes, the value of the proposal can be used as an important indicator for the assessment of the safety of the relevant building after the fire, and the incorporation of steel fibers does not affect the overall development of its law. Steel fiber can significantly increase the thermal conductivity of UHPC, but will not change the overall trend of thermal conductivity with the increase in temperature. The thermal conductivity of UHPC decrease with the increase of temperature and the gradual decrease in the overall trend of change; specific heat capacity shows the opposite development law with the thermal conductivity. Copper-plated steel fiber as UHPC commonly used metal fiber, can maintain good mechanical properties and play a toughening crack resistance before 400 °C. When the temperature reached at 600 °C and later, the degree of deterioration of copper-plated steel fiber itself is greater than the fiber-matrix interface transition zone, which leads to UHPC tensile and compressive drop in coordination, it is recommended that the steel fiber's own high-temperature performance enhancement should be focused on under this condition.

Keywords ultra-high performance concrete; high temperature; steel fiber; mechanical property; thermal property; pull-out