

文章编号:1007-9629(2023)07-0716-07

混杂聚丙烯纤维-回收轮胎钢纤维增强 UHPC 高温后力学性能

陈 猛^{1,2}, 李 骛¹, 张 通^{1,*}

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819;
2. 东北大学 低碳钢铁前沿技术研究院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要:测试了混杂聚丙烯纤维(PPF)-回收轮胎钢纤维(RTSF)增强超高性能混凝土(UHPC)高温后的抗压强度,并研究了其工作性能.结果表明:PPF 体积分数达到 0.9% 后,可以防止 UHPC 发生高温爆裂;UHPC 的抗压强度随着温度的升高先增大后减小,400 °C 作用后达到最大值,比 20 °C 作用后提高了 9.2%~19.9%;相同温度作用后,UHPC 的抗压强度随着 PPF 体积分数的增大而降低;PPF 熔化前与基体有效黏结,其与 RTSF 均可发挥桥连作用,PPF 熔化后在基体中形成孔道,提高了 UHPC 的耐高温性能.

关键词:超高性能混凝土;聚丙烯纤维;回收轮胎钢纤维;高温;力学性能

中图分类号:TU528.572

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.07.003

Mechanical Properties of Hybrid Polypropylene Fiber-Recycled Tyre Steel Fiber Reinforced UHPC after Exposure to Elevated Temperatures

CHEN Meng^{1,2}, LI Ao¹, ZHANG Tong^{1,*}

(1. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Institute for Frontier Technologies of Low-Carbon Steelmaking, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The workability and compressive strength of hybrid polypropylene fiber (PPF)-recycled tyre steel fiber (RTSF) ultra-high performance concrete (UHPC) were tested after exposure to elevated temperatures. The results show that the 0.9% volume fraction of PPF can prevent from spalling of UHPC during heating process. The compressive strength increases and then decreases with the increasing temperature, reaching its maximum value after being treated at 400 °C, which is 9.2%–19.9% higher than that after being treated at 20 °C. After the same temperature effect, the compressive strength of UHPC decreases with the increases of PPF volume fraction. PPF effectively adheres to the matrix before fiber melting, and can play a bridging role with RTSF. After fiber melting, PPF forms channels in the matrix, improving the high temperature resistance of UHPC.

Key words: ultra-high performance concrete; polypropylene fiber; recycled tyre steel fiber; elevated temperature; mechanical property

超高性能混凝土(UHPC)的致密结构使内部水蒸气难以逸出^[1],导致孔隙蒸汽压力增大而产生爆

裂^[2].UHPC 中掺入聚丙烯纤维(PPF)可以缓解高温爆裂问题,这是因为在高温作用下 PPF 熔化并在基体

收稿日期:2022-09-25; 修订日期:2022-11-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178382);中央高校基本科研业务专项资金资助项目(N2201023);辽宁省自然科学基金资助项目(2020-MS-089)

第一作者:陈 猛(1981—),男,辽宁开原人,东北大学副教授,博士生导师,博士.E-mail:chenmeng@mail.neu.edu.cn

通讯作者:张 通(1995—),男,黑龙江哈尔滨人,东北大学讲师,博士.E-mail:zhangtong@mail.neu.edu.cn

内形成孔道^[3],降低了孔隙蒸汽压力^[4],研究表明体积分数为0.2%~0.9%的PPF可以防止UHPC爆裂^[5-9]. PPF与工业钢纤维(ISF)混杂掺入UHPC可以发挥协同作用^[7],可有效抑制UHPC的高温爆裂^[7,10-11],且其抗压强度随温度升高呈先增大再减小的趋势,并在300~400℃^[12-13]达到最大值,较常温时提高了15.6%~23.6%.相关研究提出了UHPC相对抗压强度随温度及PPF掺量变化的计算式^[5,13].为制备低成本UHPC,国内外学者利用废旧轮胎钢纤维(RTSF)替代ISF^[14-15],研究表明体积分数为2%的RTSF使UHPC抗折强度提高112%^[14],且RTSF对UHPC劈裂抗拉强度和断裂能的提高幅度均高于ISF^[15].RTSF的形状和几何尺寸存在差异,PPF与RTSF掺入UHPC基体后,存在长短RTSF混杂及有机无机纤维混杂的多重协同作用.目前,缺少PPF-RTSF混杂增强UHPC高温后力学性能及其计算方法的研究,2种纤维在不同温度下的协同作用机理需要进一步分析.

本文将PPF和RTSF混杂掺入UHPC基体,分析温度和PPF体积分数对UHPC工作性能、爆裂和抗压强度的影响,建立UHPC相对抗压强度的计算式.采用扫描电镜对UHPC的微观结构进行观测,揭示混杂PPF-RTSF对UHPC高温后力学性能的作用机理.

1 试验

1.1 原材料及配合比

P·O 42.5级普通硅酸盐水泥,密度为3 090 kg/m³;硅灰的粒径为0.10~0.15 μm,比表面积为15~27 m²/g;矿粉28 d活性指数为95%,比表面积为475 m²/kg;细骨料为石英砂,细度模数为2.52;减水剂为聚羧酸高效减水剂. PPF和RTSF的性能见表1.统计了1 000根RTSF的长度,得到其长度分布见图1.由图1可见,RTSF的平均长度为7.35 mm. UHPC的配合比见表2(表中 φ_{PPF} 为PPF的体积分数).

表1 PPF和RTSF的性能
Table 1 Properties of PPF and RTSF

Fiber	Length/mm	Diameter/mm	Density/(kg·m ⁻³)	Melting point/℃	Strength/MPa	Elastic modulus/GPa
PPF	12.0	0.03	910	165	486	4.8
RTSF	3.1~15.6	0.22	7 850	1 535	2 165	200.0

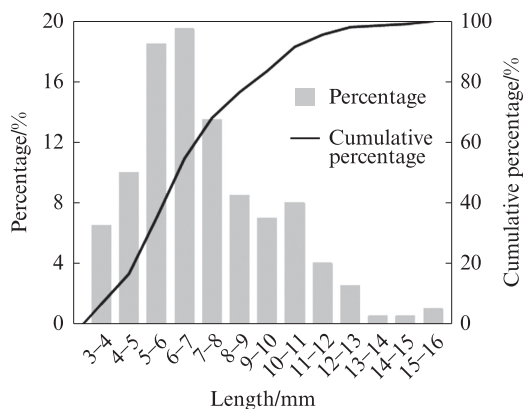


图1 RTSF的长度分布图

Fig. 1 Length distribution diagram of RTSF

1.2 试件制备

首先,按配合比将石英砂、水泥、硅灰和矿粉干拌3 min;接着,加入水和减水剂,搅拌5 min;然后,加入PPF和RTSF,继续搅拌5 min至纤维分布均匀;最后,搅拌完成后将拌和物浇筑到40 mm×40 mm×160 mm的棱柱体模具中,并在振动台上振捣密实. 24 h后脱模,放入(20±2)℃、相对湿度在95%以上的标准养护室养护至28 d.

1.3 试验方法

根据GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定

方法》测试UHPC的流动度.为避免升温过程中因含湿量过大导致试件爆裂,在高温试验前,将试件放入(105±5)℃的烘箱烘干24 h.采用高温炉对烘干后的试件进行加热,设定目标温度 T 为20、200、400、600、800℃,升温速率为4℃/min,达到目标温度后恒温2 h,避免试件因受热不均而导致试验误差;恒温后关闭高温炉,使试件在炉内自然冷却至室温.根据GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》,使用微机控制电液伺服万能试验机对试件进行抗压强度测试.利用泰思肯公司的Mira4扫描电镜(SEM)观测UHPC基体和纤维的形貌.

2 结果与讨论

2.1 流动度

PPF体积分数对UHPC流动度的影响见图2.由图2可见,UHPC的流动度随着PPF体积分数的增大而降低, φ_{PPF} 为0.6%、0.9%、1.2%、1.5%的UHPC流动度比 $\varphi_{\text{PPF}}=0.3\%$ 的UHPC分别降低了3.6%、6.8%、11.7%、15.0%.这是因为PPF体积分数的增大会使更多水泥砂浆用于包裹PPF,消耗了原用于包裹石英砂颗粒的砂浆,减弱了石英砂颗粒的滑移流动作用^[16].同时,PPF的直径与抗弯刚度较小,容

表 2 UHPC 的配合比
Table 2 Mix proportions of UHPC

Specimen	$\varphi_{PPF}/\%$	Mix proportion/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)							
		Cement	Silica fume	Slag	Quartz sand	Water	Superplasticizer	RTSF	PPF
SP03	0.3	799.00	240.00	120.00	959.00	209.00	46.34	157.00	2.73
SP06	0.6	799.00	240.00	120.00	959.00	209.00	46.34	157.00	5.46
SP09	0.9	799.00	240.00	120.00	959.00	209.00	46.34	157.00	8.19
SP12	1.2	799.00	240.00	120.00	959.00	209.00	46.34	157.00	10.92
SP15	1.5	799.00	240.00	120.00	959.00	209.00	46.34	157.00	13.65

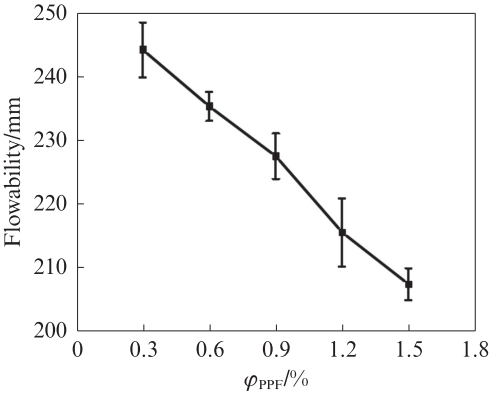


图 2 PPF 体积分数对 UHPC 流动度的影响
Fig. 2 Effect of φ_{PPF} on flowability of UHPC

易缠绕在 RTSF 周围,形成纤维网络,增大了拌和物流动的阻力^[17].

2.2 试验现象

高温试验过程中,试件 SP03、SP06 分别在 400~420、450~500 °C 发生爆裂; $\varphi_{PPF} \geq 0.9\%$ 的 UHPC 在不同温度作用后均保持完整.高温下,水泥水化反应和火山灰反应的持续进行使 UHPC 基体更致密^[18],基体内水分蒸发,部分水化产物分解,孔隙蒸汽压力持续增大,从而导致 UHPC 发生爆裂.UHPC 中掺入的 PPF 熔化后,可在基体中留下孔道,当 $\varphi_{PPF} \geq 0.9\%$ 时,UHPC 中可以形成互相连通的孔道网络,水蒸气可以从孔道逸出^[19],从而降低 UHPC 内部的孔隙蒸汽压力,达到抑制爆裂损伤的效果.

不同 PPF 体积分数的 UHPC 试件表面颜色随温度变化规律一致.随着温度的升高,试件表面颜色分别为青黑色(20 °C)、青灰色(200 °C)、黄褐色(400 °C)、黄灰色(600 °C)和灰白色(800 °C).

2.3 质量损失率

高温后 UHPC 各组分的物理及化学变化,增大了 UHPC 的内部损伤,宏观表现为质量损失率增大和力学性能变化^[12].UHPC 的质量损失率见图 3.由图 3 可见,不同 PPF 体积分数的 UHPC 在各个温度下质量损失率相近,且随着温度的升高而增大,200、

400、600、800 °C 作用后 UHPC 的质量损失率分别为 3.0%~3.7%、8.0%~8.8%、9.8%~10.7%、11.0%~11.4%.对 UHPC 而言:20~200 °C 为毛细孔内的水分蒸发^[20];105 °C 左右水化硅酸钙(C-S-H)凝胶开始脱水分解;165 °C 左右 PPF 熔化并形成相互连接的孔道网络^[21],有利于游离水蒸发和蒸汽逸出;200~400 °C 时水化产物 C-S-H 凝胶进一步脱水分解以及凝胶水蒸发,PPF 汽化逸出;400~600 °C 时水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2(\text{CH})$ 分解以及结晶水散失,C-S-H 凝胶从整体连续相转变为相对独立的分散相^[13],基体内部损伤增大;600~800 °C 时, CaCO_3 受热分解.

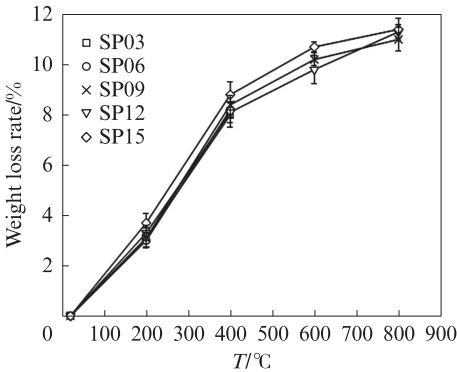


图 3 UHPC 的质量损失率
Fig. 3 Weight loss rate of UHPC

2.4 抗压强度

温度对 UHPC 抗压强度的影响见图 4(图中 PZ65-PP1.0、HRPC3 均为 PPF-ISF 增强 UHPC^[8,12]).由图 4 可见:UHPC 的抗压强度随着温度的升高呈先上升后下降的趋势,400 °C 时达到最大值;200、400 °C 作用后, φ_{PPF} 为 0.3%~1.5% 的 UHPC 抗压强度比 20 °C 作用后分别提高了 4.0%~15.3%、9.2%~19.9%;600 °C 作用后, φ_{PPF} 为 0.3%、0.6% 的 UHPC 已经发生爆裂, φ_{PPF} 为 0.9%~1.5% 的 UHPC 抗压强度较 400 °C 时降低了 18.0%~24.5%;800 °C 作用后,UHPC 抗压强度下降加剧, φ_{PPF} 为 0.9%~1.5% 的 UHPC 抗压强度较 600 °C 时降低了 45.6%~

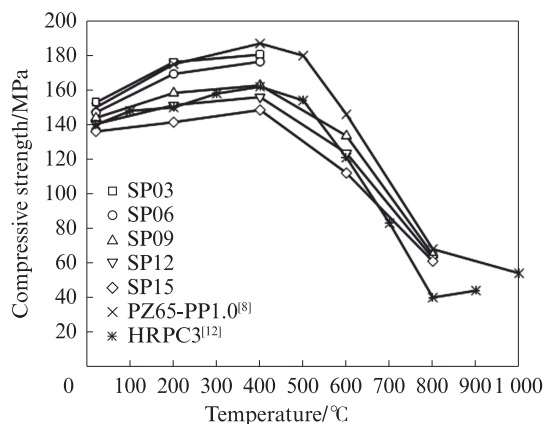


图4 温度对UHPC抗压强度的影响

Fig. 4 Effect of temperature on compressive strength of UHPC

51.6%。对比相关研究结果^[8,12]可知,混杂PPF-ISF和PPF-RTSF制备的UHPC高温后抗压强度随温度变化趋势相同,可见RTSF可以替代ISF在混杂纤维改性UHPC中与PPF发挥正混杂作用。20~400℃时,硅灰和矿渣等活性掺和料与水化产物CH发生二次水化反应,使基体更加致密,增强了基体对RTSF的握裹作用^[22],荷载下RTSF对裂缝的桥连作用加强,且PPF熔化后留下的孔道可以减轻孔隙蒸汽压力对基体的损伤^[13],使400℃作用后的UHPC抗压强度达到峰值;继续升温后,UHPC抗压强度下降,其主要原因为水化产物C-S-H和CH的分解,孔隙和裂纹网络扩展,试件高温损伤加剧,

同时高温后UHPC中水泥浆体和细骨料的热不兼容性导致两者之间黏结削弱^[23],RTSF与基体的黏结性能降低;而570℃左右α型石英(α-SiO₂)转变为β型石英(β-SiO₂),导致UHPC体积膨胀^[19],对抗压强度产生了不利影响。

由图4还可见:在相同的温度作用后,UHPC的抗压强度随着PPF体积分数的增加而降低,20、200、400℃作用后,试件SP15的抗压强度分别比试件SP03降低了11.0%、19.7%、17.7%;600℃作用后, $\varphi_{\text{PPF}} \geq 0.9\%$ 的UHPC未发生爆裂,试件SP12和SP15的抗压强度分别比SP09降低了7.4%、16.1%;800℃作用后, φ_{PPF} 对UHPC抗压强度的影响不大,试件SP12和SP15的抗压强度分别比SP09降低了2.9%、5.7%。常温下随着 φ_{PPF} 的增加,基体内部薄弱界面增多,拌和物工作性能变差,纤维带入的空气增加了内部结构的孔隙率^[17],降低了UHPC的密实度,使其抗压强度降低。高温作用后PPF熔化留下的孔道越多,孔道周围微裂纹越多,基体内部缺陷对UHPC的抗压强度产生不利影响。

高温作用后,将UHPC抗压强度 $f_{c,T}$ 与常温下抗压强度 f_c 之比记为相对抗压强度($f_{c,T}/f_c$)。Ju等^[5]和Mao等^[13]建立了UHPC相对抗压强度随温度和纤维体积分数变化的计算式。将试验结果进行回归分析,得到 φ_{PPF} 体积分数为0.3%~1.5%的UHPC相对抗压强度的计算式为:

$$\frac{f_{c,T}}{f_c} = \begin{cases} 0.96 + 0.53\left(\frac{T}{1000}\right) - 0.64\left(\frac{T}{1000}\right)^2 + 2.82\varphi_{\text{PPF}} \\ (20^\circ\text{C} \leq T \leq 400^\circ\text{C}, 0.3\% \leq \varphi_{\text{PPF}} \leq 1.5\%, R^2 = 0.922) \\ 0.78 + 1.66\left(\frac{T}{1000}\right) - 2.60\left(\frac{T}{1000}\right)^2 + 7.22\varphi_{\text{PPF}} \\ (400^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C}, 0.9\% \leq \varphi_{\text{PPF}} \leq 1.5\%, R^2 = 0.995) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中,相关系数 R^2 分别为0.922、0.995,可见试验数据与计算式相关性较高。将文献[8,24]的试验数据代入式(1),得出计算值与试验值的平均误差为8.4%。由此可见,式(1)较为可行。

3 纤维作用机理分析

根据PPF在高温下的状态变化,将加热温度分为3个阶段进行分析:(1)阶段I(20℃),PPF保持固态稳定;(2)阶段II(200℃),PPF为熔融状态;(3)阶段III(400~800℃),PPF分子汽化逸出。不同阶段混杂PPF-RTSF增强UHPC微观结构示意图见图5。不同温度作用后纤维与UHPC基体界面的SEM照片见图6。

对阶段I:常温状态下UHPC微观结构较为致

密(见图5(a)),2种纤维均可以与基体有效黏结;PPF表面有基体碎片附着并出现划痕(见图6(a)),可见纤维拔出过程中与基体存在摩擦,能发挥桥连裂缝的作用。与PPF相比,RTSF具有弹性模量大和形状不规则的特点,荷载作用下RTSF脱黏拔出且消耗大量能量。同时,PPF与RTSF存在协同效应,2种纤维相互连接形成网状结构,抑制裂缝的产生与发展^[25],分散荷载从而提高UHPC的力学性能。

对阶段II:200℃作用后,PPF熔化并吸附在孔道内壁周围(见图5(b)),并随着温度的升高而挥发,熔化后形成的孔道降低了UHPC内部孔隙蒸汽压力。由于PPF的热膨胀系数远大于混凝土^[7],PPF膨

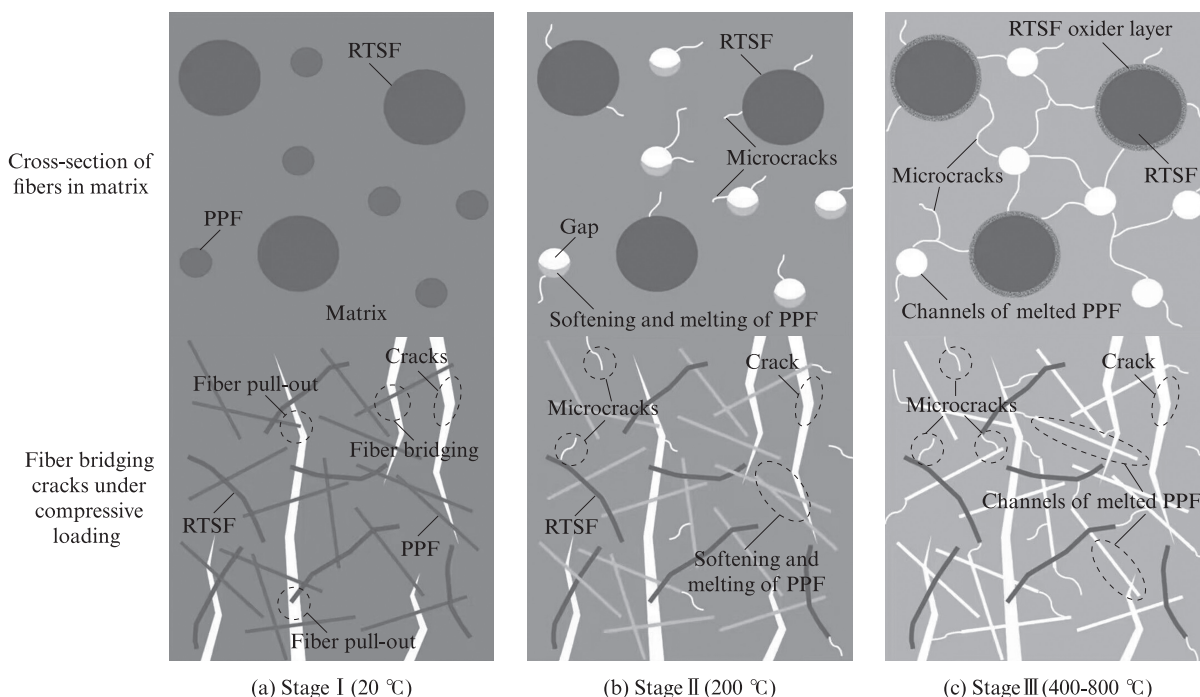


图5 不同阶段混杂PPF-RTSF增强UHPC微观结构示意图

Fig. 5 Schematic demonstration of microstructure of hybrid PPF-RTSF reinforced UHPC at different stages

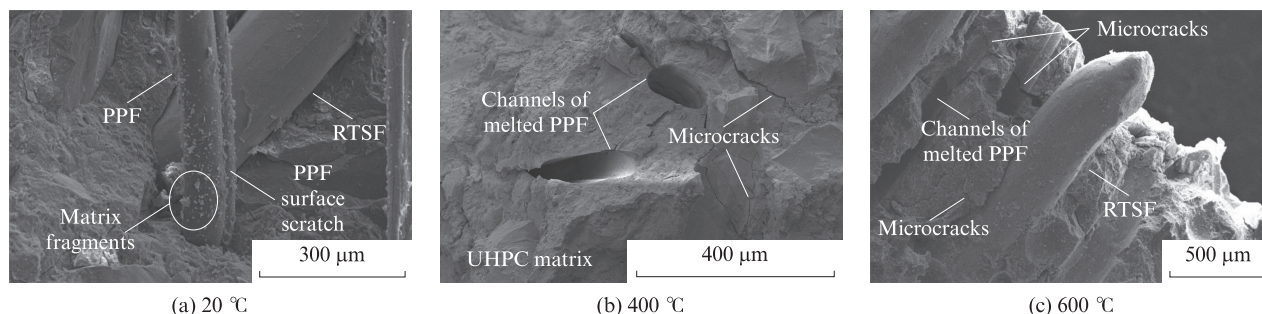


图6 不同温度作用后纤维与UHPC基体界面的SEM照片

Fig. 6 SEM images of interface between fiber and UHPC substrate after exposure to different temperatures

胀后在纤维与基体界面产生了明显的拉应力,纤维孔道周围容易产生应力集中,在温度及荷载作用下产生微裂纹.PPF体积分数的增大使UHPC内部孔隙连通性增强,但过多的裂缝和孔道会增大UHPC内部缺陷.RTSF较好的热传导性能可使UHPC在高温下更快地达到内部温度均匀^[23],从而减少由温度梯度产生的热应力损伤。

对阶段Ⅲ:400~800℃时,PPF完全汽化逸出形成纤维孔道(见图6(b)),同时导致UHPC质量损失率增大;纤维孔道与周围微裂纹相互连接形成网络,促进孔隙蒸汽压力的降低,600℃作用后RTSF氧化脱碳现象严重^[19],与基体黏结程度减弱,RTSF和UHPC基体的热不相容性导致黏结界面出现应力,RTSF周围微裂纹增多(见图6(c)).2种纤维周围的微裂纹与PPF熔化后的孔道连接起来形成更大的孔道网络,抑制了UHPC的爆裂。

4 结论

(1)超高性能混凝土(UHPC)的流动度随着聚丙烯纤维(PPF)体积分数的升高而降低,PPF体积分数为0.6%~1.5%的UHPC流动度比PPF体积分数为0.3%的UHPC降低了3.6%~15.0%。UHPC的质量损失率随着温度的升高而增大,各温度下不同PPF体积分数UHPC的质量损失率相近。

(2)温度从20℃升至800℃时,UHPC的抗压强度呈先增大后减小的趋势.400℃时UHPC的抗压强度达到最大值,比20℃时提高了9.2%~19.9%;400℃后UHPC的抗压强度急剧下降.20~400℃水化产物的增多使纤维和基体的黏结更紧密,400~800℃作用后废旧轮胎钢纤维(RTSF)与基体的黏结程度减弱,基体内孔隙和裂纹网络扩展增加了内部缺陷。

(3) PPF 体积分数 0.3% 和 0.6% 的 UHPC (RTSF 体积分数为 2.0%), 在 400~500 °C 发生爆裂, PPF 体积分数达到 0.9% 可以防止 UHPC 高温爆裂. 各个温度作用后 UHPC 的抗压强度随着 PPF 体积分数的增大而减小; 高温作用后 PPF 熔化可以缓解 UHPC 高温爆裂, 同时增大了内部缺陷.

(4) 常温下 PPF 和 RTSF 可以在 UHPC 基体中发挥协同作用, 有效抑制裂纹产生和发展. 高温作用后 RTSF 良好的导热性使 UHPC 的温度传递更加均匀, PPF 熔化后的孔道可以释放孔隙蒸汽压力, 缓解爆裂损伤. 同时, 高温后 RTSF 与基体界面黏结力逐渐减弱, RTSF 周围出现的微裂纹与 PPF 熔化后形成的孔道相连形成网络, 增大了基体的内部损伤.

参考文献:

- [1] 朋改非, 杨娟, 石云兴, 等. 超高性能混凝土抗高温爆裂性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(2):229-233.
PENG Gaifei, YANG Juan, SHI Yunxing, et al. Explosive spalling resistance of ultrahigh performance concrete[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(2):229-233. (in Chinese)
- [2] LI Y, ZHANG D. Effect of lateral restraint and inclusion of polypropylene and steel fibers on spalling behavior, pore pressure, and thermal stress in ultra-high-performance concrete (UHPC) at elevated temperature[J]. Construction and Building Materials, 2021, 271:121879.
- [3] BANERJI S, KODUR V, SOLHMIRZAEI R. Experimental behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete beams under fire conditions[J]. Engineering Structures, 2020, 208:110316.
- [4] QIN H, YANG J C, YAN K, et al. Experimental research on the spalling behaviour of ultra-high performance concrete under fire conditions[J]. Construction and Building Materials, 2021, 303:124464.
- [5] JU Y, WANG L, LIU H B, et al. An experimental investigation of the thermal spalling of polypropylene-fibered reactive powder concrete exposed to elevated temperatures[J]. Science Bulletin, 2015, 60(23):2022-2040.
- [6] 郑文忠, 李海艳, 王英. 高温后不同聚丙烯纤维掺量活性粉末混凝土力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(9):119-126.
ZHENG Wenzhong, LI Haiyan, WANG Ying. Mechanical properties of reactive powder concrete with different dosage of polypropylene fiber after high temperature[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(9):119-126. (in Chinese)
- [7] LI Y, TAN K H, YANG E H. Synergistic effects of hybrid polypropylene and steel fibers on explosive spalling prevention of ultra-high performance concrete at elevated temperature[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 96:174-181.
- [8] JANG H S, SO H S, SO S Y. The properties of reactive powder concrete using PP fiber and pozzolanic materials at elevated temperature[J]. Journal of Building Engineering, 2016, 8:225-230.
- [9] KAHANJI C, ALI F, NADJAI A, et al. Effect of curing temperature on the behaviour of UHPFRC at elevated temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2018, 182:670-681.
- [10] FOŘT J, TRNÍK A, ČÍTEK D, et al. Residual mechanical properties of hybrid fiber reinforced HPC exposed to high temperatures[J]. Key Engineering Materials, 2016, 722:52-58.
- [11] LI H Y, LIU G. Tensile properties of hybrid fiber-reinforced reactive powder concrete after exposure to elevated temperatures[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2016, 10(1):29-37.
- [12] ZHENG W Z, LI H Y, WANG Y. Compressive behaviour of hybrid fiber-reinforced reactive powder concrete after high temperature[J]. Materials and Design, 2012, 41:403-409.
- [13] MAO Z H, ZHANG J C, LUO Z Z, et al. Behavior evaluation of hybrid fibre-reinforced reactive powder concrete after elevated temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2021, 306:124917.
- [14] ISA M N, PILAKOUTAS K, GUADAGNINI M, et al. Mechanical performance of affordable and eco-efficient ultra-high performance concrete (UHPC) containing recycled tyre steel fibres[J]. Construction and Building Materials, 2020, 255:119272.
- [15] 杨娟, 朋改非, 税国双. 再生钢纤维增韧超高性能混凝土的力学性能[J]. 复合材料学报, 2019, 36(8):1949-1956.
YANG Juan, PENG Gaifei, SHUI Guoshuang. Mechanical properties of recycled steel fiber reinforced ultra-high-performance concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(8):1949-1956. (in Chinese)
- [16] 侯永强, 尹升华, 赵国亮, 等. 聚丙烯纤维增强尾砂胶结充填体力学及流动性能研究[J]. 材料导报, 2021, 35(19):19030-19035.
HOU Yongqiang, YIN Shenghua, ZHAO Guoliang, et al. Study on the mechanical and flow properties of polypropylene fiber reinforced cemented tailings backfill[J]. Materials Reports, 2021, 35(19):19030-19035. (in Chinese)
- [17] ZHONG H, ZHANG M Z. Experimental study on engineering properties of concrete reinforced with hybrid recycled tyre steel and polypropylene fibres[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 259:120914.
- [18] 朋改非, 杨娟, 石云兴. 超高性能混凝土高温后残余力学性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(4):73-79.
PENG Gaifei, YANG Juan, SHI Yunxing. Experimental study on residual mechanical properties of ultra-high performance concrete exposed to high temperature[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(4):73-79. (in Chinese)
- [19] 龚建清, 邓国旗, 单波. 活性粉末混凝土高温后超声研究及微观分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(1):68-76.
GONG Jianqing, DENG Guoqi, SHAN Bo. Ultrasonic test and

- microscopic analysis of reactive powder concrete exposed to high temperature[J]. Journal of Hunan University(Natural Science), 2018, 45(1):68-76. (in Chinese)
- [20] 何越骁, 黄维蓉, 郭江川, 等. 共聚甲醛纤维超高性能混凝土高温后残余力学性能[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(3):839-848. HE Yuexiao, HUANG Weirong, GUO Jiangchuan, et al. Residual mechanical properties of ultra-high performance concrete doped with copolymer formaldehyde fiber exposed to high temperature[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022, 50(3):839-848. (in Chinese)
- [21] 杜咏, 严奥宇, 戚洪辉. 纤维增强超高强混凝土防高温爆裂研究[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(1):216-223. DU Yong, YAN Aoyu, QI Honghui. Spalling prevention of fibre reinforced ultra-high strength concrete (FRUHSC) subject to high temperature[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(1):216-223. (in Chinese)
- [22] 袁明, 吴晓娟, 颜东煌, 等. 加载速率对钢纤维与超高性能混凝土黏结性能的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2022, 42(5):62-72. YUAN Ming, WU Xiaojuan, YAN Donghuang, et al. Effect of loading rate on bond properties of steel fiber and ultra-high performance concrete[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science), 2022, 42(5):62-72. (in Chinese)
- [23] SULTAN H K, ALYASERI I. Effects of elevated temperatures on mechanical properties of reactive powder concrete elements[J]. Construction and Building Materials, 2020, 261:120555.
- [24] HIREMATH P N, YARAGAL S C. Performance evaluation of reactive powder concrete with polypropylene fibers at elevated temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2018, 169:499-512.
- [25] 王龙, 池寅, 徐礼华, 等. 混杂纤维超高性能混凝土力学性能尺寸效应[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(8):781-788. WANG Long, CHI Yin, XU Lihua, et al. Size effect of mechanical properties of hybrid fiber ultra-high performance concrete[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(8):781-788. (in Chinese)