文章编号:1007-9629(2025)02-0118-09

超高性能混凝土高温后动态劈裂抗拉性能

陈猛^{1,2},冯珺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:为了研究高温和应变率对超高性能混凝土(UHPC)劈裂抗拉性能的影响,对不同温度(20、105、200、300、400 °C)作用后UHPC的质量损失率、抗压强度、弹性模量、静态和动态(应变率为1.8~ $6.8 \, {\rm s}^{-1}$)劈裂抗拉强度进行了测试.结果表明:以2~10 °C/min的加热速率升温至400 °C后,所有试件均在保温期间发生爆裂性剥落;UHPC的抗压强度、弹性模量、静态劈裂抗拉强度均随温度增大而提高,300 °C作用后比常温时分别提高了13.2%、19.1%和17.3%;动态劈裂抗拉强度和耗散能均具有明显的应变率效应,当应变率从1.8~2.2 ${\rm s}^{-1}$ 增加到 $6.3 \sim 6.8 \, {\rm s}^{-1}$ 时,20~300 °C作用后的UHPC 动态 劈裂抗拉强度和耗散能分别提高了 $69.1\% \sim 74.1\%$ 和 $146.7\% \sim 177.6\%$;高温作用后 UHPC 中 C-S-H表面的吸附水、孔隙内自由水和凝胶结合水先后分解,增大了试件的质量损失率;基体内高温和高压环境促进了水泥水化反应和硅灰火山灰反应,提升了UHPC的致密程度,增强了钢纤维的桥 连作用;在冲击荷载作用下,基体开裂速度的加快和由钢纤维拔出所致基体摩擦效应的增强导致耗散能增大.

关键词:超高性能混凝土;高温;动态劈裂抗拉;力学性能;爆裂性剥落 中图分类号:TU528.572 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.02.004

Dynamic Splitting Tensile Behavior of Ultra-High Performance Concrete after Exposition to Elevated Temperature

CHEN Meng^{1,2}, Feng Jun¹, ZHANG Tong^{1,*}

(1. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Engineering Research Center of Frontier Technologies for Low-Carbon Steelmaking, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: To investigate the effects of elevated temperature and strain rate on the splitting tensile properties of ultra-high performance concrete(UHPC), the mass loss rate, compressive strength, elastic modulus, static and dynamic splitting tensile tests (strain rate increases from 1.9 s^{-1} to 6.8 s^{-1}) were carried out at different temperatures (20, 105, 200, 300, 400 °C). Results reveal that all specimens experienced explosive spalling during the temperature holding period after heating at a rate of 2–10 °C/min to 400 °C. The compressive strength, elastic modulus and static splitting strength of UHPC increase with the increase of temperature, and the strength of UHPC at 300 °C increases by 13.2%, 19.1% and 17.3%, respectively, relative to that at room temperature. The dynamic splitting strength and dissipated energy show an obvious strain rate effect. When the strain rate increases from about 2.0 s⁻¹ to 6.5 s⁻¹, the dynamic splitting strength and dissipated energy of UHPC increase by 69.1% - 74.1% and

收稿日期:2024-02-08;修订日期:2024-05-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52308395,52178382);博士后创新人才支持计划项目(BX20230063);中国博士后科学基金面上项目(2023M730526);中央高校基本科研业务专项资金资助项目(N2301023);辽宁省博士科研启动基金计划项目(2023-BS-058)

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,硕士生导师,博士.E-mail:zhangtong@mail.neu.edu.cn

146.7%-177.6%, respectively, within the measured temperature range. After exposed to elevated temperatures, the adsorbed water on C-S-H gel surface, the free water in pores and the gel-bound water in UHPC are gradually decomposed, result in increase of the mass loss rate of UHPC. The high-temperature and high-pressure environment in UHPC matrix promotes cement hydration reaction and pozzolanic reaction, improving the density of UHPC matrix and the bridging effect of steel fiber. At the higher strain rate, the crack propagation in UHPC specimen is faster and the friction effect of steel fiber pulling out is enhanced, which leads to the increase of dissipated energy.

Key words : ultra-high performance concrete (UHPC) ; elevated temperature; dynamic splitting tension; mechanical property; explosive spalling

超高性能混凝土(UHPC)在火灾或高温后易发 生爆裂破坏,主要原因是UHPC基体致密难以释放 孔隙蒸汽压力,同时各组分存在热不相容性,会导致 高温后基体内产生裂纹损伤[1].基体配合比、升温速 率和作用温度是影响高温剥落损伤的主要因素.Li 等^[2]对钢纤维体积分数 φ_{sF}为 1.0%~3.0% 的 UHPC 试件以1℃/min的升温速率进行加热,所有试件均在 200 ℃下保温 10 h 过程中发生爆裂性剥落. Sanchayan 等^[3]对 φ_{sF} =2.0%的 UHPC 试件以 5 ℃/ min的升温速率加热,试件在400℃下保温20min时 发生了爆裂性剥落. Hou等^[4]研究表明:UHPC的抗 压强度、弹性模量和劈裂抗拉强度随温度升高出现 先增大后减小的趋势;抗压强度和劈裂抗拉强度在 300 ℃时达到峰值,较常温下分别提高了24.0%和 20.0%;弹性模量在120℃作用后较常温下提高了 0.4%,在300、400℃作用后分别比常温下降低了 0.4%、32.0%. Liang 等^[5] 研究发现, $\varphi_{sr}=2.0\%$ 的 UHPC抗压强度在120、300℃作用后分别比常温下 提高了 5.5% 和 2.5%. 现有研究主要关注 UHPC 高 温后的静态力学性能,而应变率对UHPC高温后力 学性能的影响仍需进行试验研究和机理分析.

本文对钢纤维体积分数 $\varphi_{sr}=2.0\%$ 的 UHPC 试 件进行高温剥落试验,设置升温速率为 2、4、10 °C/ min,对 20、105、200、300 °C作用后的试件进行质量损 失率、抗压强度、弹性模量、静态和动态劈裂抗拉强 度测试,结合微观分析和现有理论研究温度和应变 率对 UHPC 相关性能的作用机理.

1 试验

1.1 原材料及配合比

水泥为P·II 52.5 硅酸盐水泥,化学组成(质量分数,文中涉及的组成、水胶比等除特别说明外均为质量分数或质量比)见表1. 硅灰的比表面积为15~27 m²/kg.采用相对密度为2.65的石英砂作为细骨料.水泥、硅灰、石英砂的粒径分布见图1.减水剂采

用聚羧酸高效减水剂.钢纤维的物理及力学性能见表2.UHPC的水胶比为0.18,钢纤维体积分数 $\varphi_{sr}=2.0\%$,其余配合比见表3.

表 1 水泥的化学组成 Table 1 Chemical composition(by mass) of cement



表 2 钢纤维的物理及力学性能 Table 2 Physical and mechanical properties of steel fibers

Length/	Diameter/	Density/	Strength/	Elastic
mm	mm	(kg•m ⁻³)	MPa	modulus/GPa
13	0.2	7 850	2 000	220

表	3	UHPC的配合比
Table 3	Mi	x proportion of UHPC

* * ·	• /
I nit.	$k\sigma/m$
ome.	16/111

Cement	Silica fume	Sand	Water	Superplasticizer	Steel fiber
788	200	1 100	182	21	156

1.2 试件制备

首先按照配合比将水泥、硅灰和细骨料放入搅 拌机中干拌2min,然后倒入称量好的水和减水剂搅 拌2min,最后缓慢加入钢纤维,继续搅拌至钢纤维均 匀分散.将搅拌完成的浆料装入模具中,振捣至表面 浮浆泛起后用保鲜膜密封,静置24h后脱模,在 (20±2)℃、相对湿度95%以上的标准养护环境中养 护至28d.

1.3 测试方法

在升温前先将试件放入烘箱内在(105±5)℃下 烘干 24 h,采用 2、4、10 ℃/min 的升温速率对直径 100 mm、高度 50 mm 的圆柱体试件进行加热,高温 剥落试验目标温度为 105、200、300、400 ℃.达到目标 温度后保温 2 h,观察试件损伤状态.自然冷却至室温 后进行力学性能测试.利用 X 射线衍射仪(XRD)进行 物相分析,通过手持显微镜观测不同温度作用后 UHPC基体与钢纤维界面处的形貌.依据GB/T 17671— 2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》,使用 100 kN 微机控制万能试验机对尺寸为40 mm× 40 mm×40 mm的立方体试件进行抗压试验,加载速 率为2.4 kN/s.根据GB/T 50081—2019《混凝土物理 力学性能试验方法标准》对直径100 mm、高度 200 mm的圆柱体试件进行弹性模量测试.静态和动 态劈裂抗拉试验均选用直径100 mm、高度50 mm的 圆柱体试件.静态劈裂抗拉强度f_s通过公式计算^[6]. 采用分离式霍普金森杆(SHPB)试验装置(见图2)对 UHPC试件进行动态劈裂抗拉试验.使用手持显微 镜观测试件断裂后钢纤维的形貌.SHPB试验装置主 要由撞击杆、入射杆、透射杆和吸收杆组成,在入射 杆及透射杆上分别粘贴应变片,并根据公式^[6]计算动 态劈裂抗拉强度f_a和应变率 έ.



Fig. 2 Schematic diagram of SHPB testing system(size:mm)

2 结果与讨论

2.1 高温剥落现象和质量损失率

表4为不同升温速率下UHPC发生高温剥落的试 件数量,其中N表示试件总数,Ns表示发生非爆裂性剥 落的试件数,Nε表示发生爆裂性剥落的试件数.图3为 不同升温速率下400℃时UHPC试件的高温爆裂实物 图.结合表4和图3可见,当升温速率为2℃/min时,加 热至300℃后有2个试件出现轻微的非爆裂性剥落,加 热至400℃后所有试件均在保温过程中(23~27 min) 发生爆裂性剥落;当升温速率为4℃/min时,加热至 300℃后有3个试件发生非爆裂性剥落,且剥落程度强 于2℃/min时,加热至400℃后所有试件均在保温过程 中(15~21 min)发生爆裂性剥落;当升温速率为10℃/ min时,加热至200℃后有2个试件出现了轻微的非爆 裂性剥落,加热至300℃后所有试件均出现了较强的非 爆裂性剥落,加热至400℃后所有试件均出现了较强的非

综上,当升温速率较小时,UHPC内孔隙蒸汽压 力较均匀地分布在试件中部,温度梯度较低且随温 度升高变化幅度较小;当孔隙蒸汽压力积聚产生的 拉应力超过UHPC极限抗拉强度后,试件发生程度 较轻的爆裂性剥落^[7];较高的升温速率导致UHPC内 水分蒸发产生的孔隙蒸汽压力迅速增大且集中分布 在试件表层^[8],试件内部的温度梯度产生了较大的温 度应力并从试件表层向中心逐渐扩大,当温度梯度 引起的应力远超孔隙蒸汽压力引起的拉应力后,试 件发生严重的爆裂性剥落^[9].同时,UHPC各组成材 料的热不相容性容易导致升温过程中在接触界面处 产生微裂纹^[10],影响剥落速度和程度.结合高温剥落 试验结果,采用2℃/min的升温速率对UHPC试件 进行升温处理,目标温度设定为105、200、300℃.

图 4 为 105、200、300 ℃作用后 UHPC 试件的质量损失率.由图 4 可见,UHPC 质量损失率随温度升高而增大,此变化趋势与以往研究趋势相似^[3,11].因在

表 4 不同升温速率下 UHPC 发生高温剥落的试件数量 Table 4 Number of spalling UHPC specimens at different heating

Tates									
Torrestore /°C	2 °C/min		4 ℃/min			10 °C/min			
Temperature/ C	Ν	$N_{\rm s}$	$N_{\rm E}$	Ν	$N_{\rm s}$	$N_{\rm E}$	Ν	$N_{\rm s}$	$N_{\rm E}$
105	6	0	0	6	0	0	6	0	0
200	6	0	0	6	0	0	6	2	0
300	6	2	0	6	3	0	6	6	0
400	6	0	6	6	0	6	6	0	6











高温试验前的准备阶段试件经过烘干处理,毛细孔 内的自由水和凝胶颗粒表面的吸附水已经部分蒸 发,故在105℃时的质量损失率较低.已有研究表明 150℃时UHPC内的自由水基本完全蒸发,同时 105℃后水化硅酸钙(C-S-H)随温度升高而不断分解 释放出化学结合水^[12],因此当温度为200、300℃时, 基体内的自由水已完全消失,质量损失主要来源于 化学结合水的蒸发^[13],而化学结合水蒸发速率随温 度升高而加快.

2.2 抗压强度和弹性模量

图 5 为不同温度下 UHPC 的抗压强度和弹性模 量.由图 5 可见,UHPC 试件的抗压强度和弹性模量均 随温度升高而增大,与 20 ℃时相比,105、200、300 ℃作 用后试件的抗压强度分别提高了 5.9%、10.5%、 13.2%,弹性模量分别提高了 4.3%、12.8%、19.1%. 这是因为:(1)高温作用下 UHPC 基体的孔隙蒸汽压 力形成了高温高压的养护环境^[14],未参与火山灰反应 的硅灰与 Ca(OH)₂继续反应生成新的 C-S-H凝胶,进 一步增大了 UHPC 的均质性和致密程度^[15].(2)此外, 试件内凝胶颗粒表面的吸附水在 70 ℃时开始蒸发,吸 附水的相变提高了颗粒表面的干燥程度,增强了颗粒 间的范德华力,进而提升了 UHPC 的抗压强度^[3,12].(3) 密实的基体增强了对钢纤维的握裹能力,钢纤维可有 效抑制基体裂缝的产生并延缓裂缝发展^[4],减小压缩 荷载作用下试件的变形⁶⁶,从而提升UHPC的抗压强 度和弹性模量.



图 5 不同温度下 UHPC 试件的抗压强度和弹性模量 Fig. 5 Compressive strength and elastic modulus of UHPC specimens at different temperatures

2.3 静态劈裂抗拉强度

图 6 为不同温度下 UHPC 试件的静态劈裂抗拉 强度.由图 6 可见,105、200、300 ℃作用后试件的静态 劈裂抗拉强度比 20 ℃时分别提高了 1.2%、8.8% 和 17.3%.其原因与 UHPC 抗压强度与弹性模量增大 的机理类似.另外,在劈裂抗拉荷载作用下试件出现 主裂纹,裂纹处的钢纤维从基体中拔出,可消耗能量 并延缓裂纹扩展^[16],最终出现一端脱离基体或者整 体桥连裂纹的损伤状态,见图 7.







图 7 主裂纹处钢纤维的微观形貌 Fig. 7 Microscopic morphology of steel fibers at the major crack

2.4 动态劈裂抗拉性能

2.4.1 破坏形态

不同温度和应变率下的UHPC试件在动态劈裂 抗拉荷载下的破坏形态见表5.由表5可见:沿冲击载 荷方向出现贯穿试件中心的主裂纹,主裂纹的宽度随 着应变率的增大而增大;在加载点(即试件与入射杆 和透射杆的接触点)处出现了三角形破坏,这是由于 局部压力产生了应力集中^[17];三角形破坏区的面积随 应变率增大而增大,是由于冲击荷载的能量转化为主 裂纹和加载点附近的断裂损伤^[18];相近应变率下试件 的损伤程度随温度升高略有减小,表明300℃之内的 高温作用缓解了UHPC的动态劈裂抗拉损伤^[16].

2.4.2 应力-时程曲线

不同温度作用后UHPC在应变率为1.8~6.8 s⁻¹ 时的应力-时程曲线如图8所示,曲线可分为峰值前 的近似线性上升阶段和峰值后的波动下降阶段,曲 线的峰值即为UHPC的动态劈裂抗拉强度.由图8 可见:曲线上升阶段动态劈裂抗拉应力逐渐增大,此 时钢纤维与基体协同发挥作用共同抵抗冲击荷载, 直至试件达到弹性极限时沿载荷方向出现主裂 纹^[19],同时,随着应变率的增加曲线上升阶段到达峰 值的时间缩短;达到峰值应力后,钢纤维随主裂纹扩 大而逐渐拔出基体,脱离基体的钢纤维丧失桥连作 用,劈裂抗拉应力降低;冲击荷载下钢纤维从基体中 拔出的摩擦作用增强,桥连在裂纹处的钢纤维有利 于控制裂纹的扩展并耗散冲击能量,因此曲线下降 阶段出现多重波动^[16].

2.4.3 动态劈裂抗拉强度

图 9 为不同温度和应变率下 UHPC 试件的动态 劈裂抗拉强度.由图 9 可见,经历相同温度作用后, UHPC 试件的动态劈裂抗拉强度随应变率增大而升 高,当应变率从 $1.8 \sim 2.2 \text{ s}^{-1}$ 增加到 $6.3 \sim 6.8 \text{ s}^{-1}$ 时, $20 \setminus 105 \setminus 200 \setminus 300 \ \mathbb{C}$ 作用后 UHPC 试件的动态劈裂抗 拉强度分别提高了 $69.1\% \setminus 74.1\% \setminus 70.8\%$ 和 69.1%. 即不同温度作用后 UHPC 的动态劈裂抗拉强度均具

表 5 不同温度和应变率下 UHPC 试件的破坏形态 Table 5 Failure patterns of UHPC specimens at different temperatures and strain rates

Temperature/ ℃	$1.8-2.2 \text{ s}^{-1}$	$3.4-3.7 \mathrm{s}^{-1}$	$4.9-5.2 \mathrm{s}^{-1}$	6. 3–6. 8 s ^{-1}
20	Major crack	Triange failure		
105				8
200			and the second sec	
300				









有明显的应变率效应,这与高温对UHPC基体的强 化效应(见2.2)、钢纤维与基体的相互作用直接相关. 冲击荷载作用下UHPC劈裂抗拉主裂纹迅速开展, 基体握裹钢纤维能力更强^[17],提升了UHPC的抗拉 性能.

动态增强因子(DIF)为动态劈裂抗拉强度与静态劈裂抗拉强度的比值.不同温度和应变率下UHPC试件的DIF值见图10.由图10可见,相同温度作用后DIF随应变率增加而增大,当应变率为1.8~6.8 s⁻¹时,20、105、200、300℃作用后试件的DIF分别

为 1.05~1.17、1.33~1.53、1.47~1.77 和 1.77~1.98. 表明在 300 ℃范围内温度对 DIF 具有显著影响.主要 原因是高温作用后的 UHPC 动态劈裂抗拉强度具有 应变率效应,即高温作用对 UHPC 的动态劈裂抗拉 强度提升效果更显著^[16].





2.4.4 耗散能

图 11 为不同温度和应变率下 UHPC 试件的耗 散能.由图 11 可见,当应变率从 1.8~2.2 s⁻¹增加到 6.3~6.8 s⁻¹时,20、105、200、300 ℃作用后 UHPC 试 件的耗散能分别提高了177.6%、154.1%、146.7%、 152.4%.动态劈裂抗拉荷载作用下试件端部受压区 的三角形损伤、沿中心主裂纹的产生和扩展、钢纤维 与基体的摩擦以及钢纤维变形是能量耗散的主要原 因^[20].应变率增大后基体开裂和钢纤维拔出速度增 大,能够消耗更多能量^[17].



图 11 不同温度和应变率下 UHPC 试件的耗散能 Fig. 11 Dissipated energy of UHPC specimens at different temperatures and strain rates

3 作用机理分析

图 12 展示了高温和应变率对 UHPC 劈裂抗拉

性能的作用机理.图13给出了不同温度下UHPC的 XRD图谱.图14为不同温度作用后UHPC与基体钢 纤维界面图像.结合图12~14可得:

(1)当温度为20~105℃时,只有毛细孔间的自 由水和水化产物凝胶颗粒表面的吸附水蒸发,且高 温试验前试件经烘干处理,部分自由水已经蒸发,因 此温度为105℃时UHPC试件的质量损失率仅为 0.42%.C-S-H凝胶在熟料颗粒间可发挥桥连作用填 充孔隙与微裂纹,使UHPC基体堆积更紧密^[17].在冲 击荷载作用下,试件呈现典型的动态劈裂破坏模式. 图14(a)中钢纤维表面附着基体碎片且出现划痕, 这表明:一方面,钢纤维与基体有效黏结可发挥桥连 作用将应力传递给周围的基体;另一方面,钢纤维还 可能脱黏从UHPC基体中拔出而消耗能量^[17].此外, 钢纤维在UHPC基体内部杂乱分布可构成三维骨 架,并与UHPC基体共同承受冲击荷载,约束UHPC 变形并抑制裂纹的扩展^[20].

(2)当温度为105~300℃时,凝胶颗粒分解释 放出化学结合水,水分蒸发速率随温度升高而加 快,因此当温度为200、300℃时试件质量损失率分 别达到了1.34%、4.23%.水泥的水化反应和硅灰的 火山灰反应继续生成C-S-H凝胶^[13],这与图13中



Fig. 12 Mechanism of high temperature and strain rate on the splitting tensile properties of UHPC

7	$\Box C-S-H \nabla SiO_2$ $\diamond C_3S \triangle Ca(OH)_2$	o CaCO₃ ★ C₂S
400 °C		
<u>300 ℃</u>		° * °
200 °C		
105 °C		* <u></u>
20 °C		° ★ œ
10 20	30 40 50 2 θ /(°)	60 70



C-S-H衍射峰值随温度升高而增大的结果一致.凝 胶颗粒增多提升了UHPC基体的致密性,增强了 钢纤维与基体间的黏结性能^[2].抗压强度、弹性模 量和静态劈裂抗拉强度比常温时分别提升了 $5.9\% \sim 13.2\%$ 、 $4.3\% \sim 19.1\%$ 和 $1.2\% \sim 17.3\%$.随 着应变率的增大,基体开裂和钢纤维拔出都需要消 耗更多能量^[17],因此当应变率从 $1.8 \sim 2.2 \text{ s}^{-1}$ 增长到 $6.3 \sim 6.8 \text{ s}^{-1}$ 时,105、200、 $300 \degree$ C时UHPC试件的动 态劈裂抗拉强度和耗散能分别提高了 $69.1\% \sim$ 74.1%、146.7%~154.1%.此时由于钢纤维热膨胀 系数远大于混凝土热膨胀系数^[11],钢纤维受热膨胀 后在钢纤维与基体间产生拉应力导致界面处出现 微裂纹,见图14(b).

(3) 当温度达到 400 ℃时, Ca(OH)₂开始分解 为 CaO 和水^[6],这与图 13 所示 XRD 图谱中 400 ℃ 时Ca(OH)。衍射峰值降低的结果一致.C-S-H凝胶 继续分解[14],基体抗拉强度不断降低.受热不相容 性影响,钢纤维热膨胀程度随温度升高而增大[21], 钢纤维与基体间的黏结强度降低,微裂纹不断扩展 (见图14(c)),钢纤维桥连作用减弱^[11].由于孔隙蒸 汽压力和温度梯度产生的拉应力超过UHPC基体 的极限抗拉强度,试件发生爆裂性剥落[3].另外,升 温速率影响孔隙蒸汽压力的累积速率,随着升温速 率的增加,自由水、吸附水和分解后的化学结合水 蒸发速率加快,而UHPC致密的基体会阻碍水分 迁移,导致孔隙蒸汽压力快速积聚并超过基体的极 限拉应力^[22],因此UHPC在较高升温速率(4、 10 ℃/min)下更易发生爆裂性剥落^[8](见2.1).虽 然钢纤维较好的热传导性有助于UHPC基体内温 度的均匀分布^[12],但是钢纤维无法增加UHPC的 孔隙蒸汽渗透性^[2],因此UHPC试件在此温度下发 生爆裂性剥落.



图 14 不同温度作用后 UHPC 基体与钢纤维界面图像 Fig. 14 Images of UHPC matrix and steel fiber interfaces exposed to different temperatures

4 结论

(1)当温度不超过 300 ℃时,超高性能混凝土 UHPC的高温损伤随温度升高而增大;当温度达到 400 ℃后,试件均在保温阶段发生爆裂性剥落.升温 速率为2、4、10 ℃/min时试件发生爆裂性剥落的平均 保温时间分别为25、18、8 min.高温作用后C-S-H凝 胶表面的吸附水、孔隙内自由水、凝胶结合水先后蒸 发,增大了试件的质量损失.

(2)温度从 20 ℃上升到 300 ℃, UHPC 的抗压强 度、弹性模量和静态劈裂强度均增大, 分别提高了 13.2%、19.1%和17.3%.300℃以内的高温作用可以 促进水泥水化反应和硅灰火山灰反应,有利于提升 UHPC基体的致密程度和增强钢纤维的桥接作用.

(3)UHPC的劈裂抗拉损伤程度随温度升高而降低,主裂纹宽度和端部三角形破坏区面积均随应 变率升高而增大,动态劈裂抗拉强度和耗散能均具 有明显的应变率效应.当应变率从1.8~2.2 s⁻¹增加 到6.3~6.8 s⁻¹时,20~300℃作用后UHPC的动态劈 裂抗拉强度和耗散能分别提高了 69.1%~74.1%、 146.7%~177.6%.高温和动态劈裂抗拉荷载作用均 增强了基体对钢纤维的握裹作用,基体开裂、钢纤维 变形、钢纤维拔出基体的摩擦效应增大了冲击荷载 下的耗散能.

参考文献:

- [1] AMRAN M, MURALI G, MAKUL N, et al. Fire-induced spalling of ultra-high performance concrete: A systematic critical review [J]. Construction and Building Materials, 2023, 373: 130869.
- 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.
- [3] SANCHAYAN S, FOSTER S J. High temperature behaviour of hybrid steel-PVA fibre reinforced reactive powder concrete[J]. Materials and Structures, 2016, 49(3):769-782.
- [4] HOU X M, ABID M, ZHENG W Z, et al. Evaluation of residual mechanical properties of steel fiber-reinforced reactive powder concrete after exposure to high temperature using nondestructive testing[J]. Procedia Engineering, 2017, 210:588-596.
- [5] LIANG X W, WU C Q, SU Y, et al. Development of ultra-high performance concrete with high fire resistance[J]. Construction and Building Materials, 2018, 179:400-412.
- [6] CHEN M, YANG F, ZHANG T, et al. Effect of elevated temperatures on behaviour of recycled steel and polypropylene fibre reinforced ultra-high performance concrete under dynamic splitting tension[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 84: 108586.
- [7] KANÉMA M, PLIYA P, NOUMOWÉ A, et al. Spalling, thermal, and hydrous behavior of ordinary and high-strength concrete subjected to elevated temperature [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(7):921-930.
- [8] 陈明阳,侯晓萌,郑文忠,等. 混凝土高温爆裂临界温度和防爆
 裂纤维掺量研究综述与分析[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(1):
 161-170.

CHEN Mingyang, HOU Xiaomeng, ZHENG Wenzhong, et al. Review and analysis on spalling critical temperature of concrete and fibers dosage to prevent spalling at elevated temperatures[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(1): 161-170. (in Chinese)

- [9] 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):229-233,238.
 PENG Gaifei, YANG Juan, SHI Yunxing, et al. Explosive spalling resistance of ultrahigh performance concrete[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(2):229-233,238. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] KODUR V, BANERJI S, SOLHMIRZAEI R. Effect of temperature on thermal properties of ultrahigh-performance

concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32
(8):04020210.

- [12] 陈猛,李骜,张通. 混杂聚丙烯纤维-回收轮胎钢纤维增强UHPC 高温后力学性能[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(7):716-722. CHEN Meng, LI Ao, ZHANG Tong. Mechanical properties of hybrid polypropylene fiber-recycled tyre steel fiber reinforced UHPC after exposure to elevated temperature [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(7):716-722. (in Chinese)
- [13] 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. Compressive stress-strain relationship of hybrid fiber-reinforced reactive powder concrete after exposure to high temperature [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(3):388-395. (in Chinese)
- [14] CHEN M, SUN Z H, TU W L, et al. Behaviour of recycled tyre polymer fibre reinforced concrete at elevated temperatures [J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 124:104257.
- [15] 欧阳雪,史才军,史金华,等.超高性能混凝土受压力学性能及 其弹性模量预测[J].硅酸盐学报,2021,49(2):296-304.
 OUYANG Xue, SHI Caijun, SHI Jinhua, et al. Compressive mechanical properties and prediction for elastic modulus of ultra-high performance concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(2):296-304. (in Chinese)
- [16] YANG Y, WU C Q, LIU Z X, et al. Experimental investigation on the dynamic behaviors of UHPFRC after exposure to high temperature[J]. Construction and Building Materials, 2019, 227: 116679.
- [17] CHEN M, ZHONG H, WANG H, et al. Behaviour of recycled tyre polymer fibre reinforced concrete under dynamic splitting tension [J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 114: 103764.
- [18] SU Y, LI J, WU C, et al. Mesoscale study of steel fibre-reinforced ultra-high performance concrete under static and dynamic loads[J]. Materials and Design, 2017, 116:340-351.
- [19] GURUSIDESWAR S, SHUKLA A, JONNALAGADDA K
 N, et al. Tensile strength and failure of ultra-high performance concrete(UHPC) composition over a wide range of strain rates
 [J]. Construction and Building Materials, 2020, 258:119642.
- [20] YOO D Y, KIM S, LEE S H. Self-sensing capability of ultra-high-performance concrete containing steel fibers and carbon nanotubes under tension[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 276:125-136.
- [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] ZHU Y P, HUSSEIN H, KUMAR A, et al. A review : Material and structural properties of UHPC at elevated temperatures or fire conditions[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 123: 104212.