

椰壳纤维增强超高性能混凝土抗火性能试验研究

单波^{1,2†}, 唐帅浩¹, 曾维³, 秦培成¹, 傅新林⁴

(1. 海南大学 土木建筑工程学院, 海南 海口 570228;

2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;

3. 海口西建筑发绿色建材有限公司, 海南 海口 570228;

4. 海南威特建设科技有限公司, 海南 海口 571157)

摘要:采用电炉开展了椰壳纤维超高性能混凝土(UHPC)的高温爆裂试验与高温后的抗压试验, 试验参数包括控制温度、椰壳纤维长度与纤维体积掺量。结果表明, 掺入体积掺量为 1% 的椰壳纤维(2 cm)可以有效抑制 UHPC 高温爆裂现象的发生; 微观分析显示, 椰壳纤维高温下产生收缩、分解、碳化, 使得椰壳纤维与 UHPC 基体之间形成沿切向的孔隙网, 从而为内部水蒸气的逸出提供了通道, 是其改善 UHPC 抗火性能的主要机理; 在 200 °C、400 °C、600 °C 和 800 °C 下, 椰壳纤维 UHPC(长度 2 cm、体积掺量 1%) 的抗压强度与弹性模量随控制温度升高而显著退化, 且在控制温度范围内, 轴心抗压强度与立方体抗压强度比在 0.62~0.92 之间变化; 在相同的控制温度下, 抗压强度与弹性模量随椰壳纤维体积掺量提高而下降; 轴心抗压强度与立方体抗压强度的比值并不恒定; 从 UHPC 抗火性能的改善效应来看, 椰壳纤维优于钢纤维, 与黄麻纤维、亚麻纤维接近; 基于试验数据对现有计算公式进行修正, 提出了椰壳纤维 UHPC 高温后轴心抗压强度的计算公式。

关键词:超高性能混凝土(UHPC); 椰壳纤维; 高温试验; 高温爆裂; 抗压强度

中图分类号:TU528

文献标志码:A

Experimental research on fire resistance of coir fiber reinforced ultra-high performance concrete

SHAN Bo^{1,2†}, TANG Shuaihao¹, ZENG Wei³, QIN Peicheng¹, FU Xinlin⁴

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. Haikou Xijian Tongfa Green Building Materials Co., Ltd., Haikou 570228, China;

4. Hainan Weite Construction Technology Co., Ltd., Haikou 571157, China)

Abstract: A series of explosive thermal spalling tests at elevated temperature and compression tests after high temperature were conducted on coir fiber reinforced ultra-high performance concrete (UHPC) by using an electric

* 收稿日期:2024-12-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52268040), National Natural Science Foundation of China (52268040); 海口市重大科技专项(2024-039), Key Science and Technology Program of Haikou City (2024-039)

作者简介:单波(1976—), 男, 湖南益阳人, 海南大学教授, 博士

† 通信联系人, E-mail:supershanb@163.com

furnace in this study, aiming to shed light on the influence of the length and volume dosage of coir fiber on the fire resistance of UHPC exposed to different high temperatures. The results indicate that incorporating 1% of coir fibers with a length of 2 cm in UHPC can effectively suppress the high-temperature spalling. Microscope analysis reveals that a tangential pore network is generated between coir fibers and UHPC matrix due to shrinkage, decomposition, and carbonization of coir fibers at high temperature, which provides channels for the escape of internal water vapor as well as improving the thermal spalling resistance of UHPC. At 200 °C, 400 °C, 600 °C, and 800 °C, compressive strength and elastic modulus of UHPC, incorporating 1% of coir fibers with 2 cm long, significantly decrease with an increase in control temperature. Also, within the range of the control temperature, the ratio of the axial compressive strength to the cubic compressive strength varies between 0.62 and 0.92. On the other hand, compressive strength and elastic modulus decrease with the increasing volume dosage of coir fiber under the same control temperature, and the ratio of uniaxial compressive strength and cubic compressive strength varies with control temperatures. In terms of the improvement effect on fire resistance of UHPC, coir fiber is superior to steel fiber and is comparable to jute and flax fibers. Based on the test data and the existing formula, a special formula is proposed for evaluating the residual compressive strength of coir fiber reinforced UHPC exposed to high temperatures.

Key words: ultra-high performance concrete (UHPC); coir fiber; elevated temperature test; explosive thermal spalling; compressive strength

超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 是一种高性能的水泥基复合材料, 具有超高强度、高韧性与高耐久性^[1]. 因其性能优异, UHPC 在大跨度桥梁、超高层建筑、海洋基础设施及抗爆、抗冲击等防护工程中得到了较为广泛的应用^[2]. 相比普通混凝土, UHPC 基体密实、孔隙率极低, 在高温下基体中的水蒸气难以外逸, 更容易发生爆裂, 导致严重的高温损伤与性能退化^[1]. 试验表明, 基体中掺入钢纤维可以减小 UHPC 内部的温度梯度, 有利于缓解 UHPC 高温下的爆裂现象^[3]. 相对而言, 掺入合成纤维对于抑制 UHPC 的高温爆裂更为有效, 常用纤维包括聚乙烯 (PE)、聚丙烯 (PP)、聚乙烯醇 (PVA) 等^[4-7]. 合成纤维熔点低, 熔化后可以在 UHPC 基体中形成大量孔道, 便于水蒸气的逸出, 有效降低蒸汽压, 从而有效减少高温爆裂现象的发生^[4,6]. 然而, 采用钢纤维与合成纤维来提高 UHPC 抗火性能的同时, UHPC 的成本显著增加, 且这两种纤维的生产会产生大量温室气体, 不利于 UHPC 的碳排放计算与绿色化评价^[8].

植物纤维是可再生的天然纤维, 具有价格低廉、来源广泛、绿色环保等优势. 掺入植物纤维可以有效降低水泥基材料的开裂风险、提高延性, 因而在普通

混凝土和砂浆中得到广泛应用, 常见的植物纤维包括剑麻、黄麻、亚麻、竹、椰壳等^[6,9-12]. 此外, 植物纤维在高温下发生收缩、分解、碳化, 能够在混凝土基体中形成孔道, 有利于水蒸气的逸出, 因而能够改善混凝土的抗火性能. 近年来, 植物纤维受到一些研究者的关注, 并开展了植物纤维 UHPC 的相关研究, 主要集中在亚麻纤维、黄麻纤维对 UHPC 流变性能和力学性能影响等方面, 个别研究者还对植物纤维 UHPC 的抗火性能开展了初步试验^[10,13], 但相关成果很有限.

椰壳纤维是由椰壳经浸泡、脱脂等过程生产的一种植物纤维, 作为热带地区 (如我国海南) 经济林的副产物, 其产量大, 但在建材领域未得到有效利用. 相比其他天然纤维, 椰壳纤维具有突出的耐磨性能和耐盐腐蚀能力^[14], 这一特性使其特别适用于海工混凝土, 如取代钢纤维掺入 UHPC 用于海洋工程. 目前, 已有文献报道了椰壳纤维 UHPC 力学性能试验的初步成果^[11], 但椰壳纤维 UHPC 抗火性能方面的研究还处于空白. 针对这一研究的盲区, 本文开展了椰壳纤维 UHPC 高温下的抗爆裂与高温后的力学性能试验, 为椰壳纤维 UHPC 的材料设计, 以及椰壳纤维 UHPC 构件火灾后的安全性能评估与加固设计提供基础性数据^[1].

1 试验设计

1.1 原材料

UHPC 原材料的基本情况为:海南产 P.O 52.5 普通硅酸盐水泥;巩义产硅灰,比表面积为 $18\,600\text{ m}^2/\text{kg}$;长沙产 40~70 目石英砂;长沙产 325 目石英粉;石家庄产粉煤灰(Ⅰ级);减水剂采用聚羧酸类高效减水剂(粉剂).经过试配,UHPC 的基准配合比为水泥:硅灰:粉煤灰:石英粉:石英砂:高效减水剂=1:0.25:0.1:0.1:1.1:0.01,水胶比(W/B)为 0.18.

椰壳纤维为海南文昌生产,直径为 $21\sim63\text{ }\mu\text{m}$,密度为 $1.15\sim1.46\text{ g}/\text{cm}^3$,拉伸模量为 $2.8\sim4.7\text{ GPa}$,拉伸强度为 $95\sim154\text{ MPa}$.椰壳纤维原料为原状长纤维(未经表面处理),手工切断为 2 cm、4 cm 和 6 cm 三种长度规格,如图 1 所示.

1.2 试件设计

本试验设计两种规格的试件,包括边长 100 mm



图 1 椰壳纤维

Fig.1 Coir fibers

的立方体试件和尺寸为 $100\text{ mm}\times100\text{ mm}\times300\text{ mm}$ 的棱柱体试件,且每组 3 个试件,前者用于 UHPC 高温爆裂试验以及高温后的质量损失与立方体抗压强度测试,后者用于 UHPC 高温后的轴心抗压强度和弹性模量测试.试验参数包括椰壳纤维长度、椰壳纤维体积掺量(下文简称掺量)和控制温度.各组试件的试验参数分别如表 1、表 2 所示.对于掺有椰壳纤维的 UHPC 试件,其命名规则如下:试件类型(P 为棱柱体,C 为立方体)-椰壳纤维长度-椰壳纤维掺量.如 C2-1 表示该组为立方体试件,椰壳纤维的长度为 2 cm,且掺量为 1%.此外,C0 表示不掺椰壳纤维的对比组.

表 1 UHPC 立方体试件试验参数

Tab.1 Test parameters of UHPC cubes

编号	纤维长度/ cm	$V_{\text{nf}}/\%$	20 °C		200 °C		400 °C		600 °C		800 °C	
			$f_{\text{cu}}^{\text{T}}/\text{MPa}$	$D_{\text{m}}/\%$	$f_{\text{cu}}^{\text{T}}/\text{MPa}$	$D_{\text{m}}/\%$	$f_{\text{cu}}^{\text{T}}/\text{MPa}$	$D_{\text{m}}/\%$	$f_{\text{cu}}^{\text{T}}/\text{MPa}$	$D_{\text{m}}/\%$	$f_{\text{cu}}^{\text{T}}/\text{MPa}$	$D_{\text{m}}/\%$
C0	—	—	151.6	0.0	172.6	—	—	—	—	—	—	—
C2-0.5	2	0.5	141.8	0.0	150.0	1.1	132.5	3.7	110.3	4.6	—	—
C2-1	2	1.0	138.6	0.0	141.7	1.5	128.1	4.6	104.4	5.5	53.6	5.8
C2-1.5	2	1.5	133.4	0.0	137.2	1.6	119.9	5.2	100.5	6.1	48.7	6.4
C2-2	2	2.0	128.2	0.0	130.9	1.7	106.0	5.5	91.1	6.7	42.1	6.9
C2-2.5	2	2.5	124.5	0.0	128.9	1.9	99.0	6.0	83.0	7.3	40.3	7.6
C2-3	2	3.0	120.5	0.0	125.4	2.2	85.0	6.3	72.3	7.8	38.6	8.1
C4-1	4	1.0	135.3	0.0	137.2	1.1	125.1	4.9	101.0	7.2	48.9	7.5
C6-1	6	1.0	130.6	0.0	133.1	2.4	120.9	5.5	94.1	7.5	39.4	7.6

注: V_{nf} 为椰壳纤维体积掺量; f_{cu}^{T} 为高温后的立方体抗压强度; D_{m} 为高温后的立方体质量损失率.

表 2 UHPC 棱柱体试件试验参数

Tab.2 Test parameters of UHPC prisms

编号	纤维长度/ cm	$V_{\text{nf}}/\%$	20 °C		200 °C		400 °C		600 °C		800 °C	
			$f_{\text{co}}^{\text{T}}/\text{MPa}$	$E_{\text{c}}^{\text{T}}/\text{GPa}$	$f_{\text{co}}^{\text{T}}/\text{MPa}$	$E_{\text{c}}^{\text{T}}/\text{GPa}$	$f_{\text{co}}^{\text{T}}/\text{MPa}$	$E_{\text{c}}^{\text{T}}/\text{GPa}$	$f_{\text{co}}^{\text{T}}/\text{MPa}$	$E_{\text{c}}^{\text{T}}/\text{GPa}$	$f_{\text{co}}^{\text{T}}/\text{MPa}$	$E_{\text{c}}^{\text{T}}/\text{GPa}$
P2-0.5	2	0.5	131.5	41.5	138.0	38.8	113.8	36.7	73.9	24.7	—	—
P2-1	2	1.0	126.5	41.0	130.5	37.2	105.4	32.7	65.1	17.9	42.5	8.9
P2-1.5	2	1.5	121.7	40.6	126.2	36.3	100.2	30.4	59.6	15.2	38.1	8.2
P2-2	2	2.0	116.1	39.7	120.5	35.8	90.2	28.8	54.7	13.7	33.5	8.0

注: f_{co}^{T} 为高温后的轴心抗压强度; E_{c}^{T} 为高温后的弹性模量.

1.3 试件制作

UHPC 采用单卧轴强制搅拌机进行拌制.首先,将石英砂与粉体材料倒入搅拌机干拌 6 min;随后加

入溶有减水剂的一半用水量,搅拌 3 min 后加入剩余拌和水搅拌 3 min;均匀撒入椰壳纤维,再搅拌 6 min 后出料. UHPC 拌和物浇入试模,并在振动台振动成

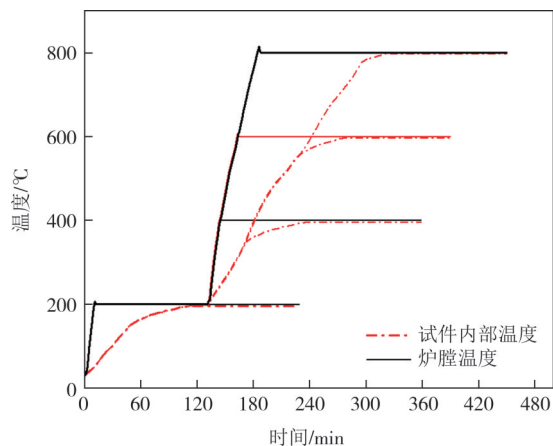
型,在室内放置 24 h 后拆模,再将试件移入 90 °C 的热水箱中养护 48 h,完成养护.所有试件在室内放置 14 d 后进行高温试验.每一组立方体试件中,在其中一个试件的中心位置预埋铠装热电偶,用于测量高温试验过程中试件内部实际温升.

1.4 高温试验方法

高温试验采用高温试验电炉进行,如图 2(a)所示.试验过程中的控制温度分别为 20 °C(室温)、200 °C、400 °C、600 °C 和 800 °C.高温试验采用等速率升温,炉膛的升温速率为 5 °C/min.为了减小试件含水率差异对高温爆裂的影响,升温过程中,在炉温到达 200 °C 时,试件恒温 2 h^[15];随后,再按照设定的升温速率继续试验,直至炉膛温度达到控制温度,并恒温 2 h 以上,保证试件中心温度与炉膛温度基本一致,如图 2(b)所示;关闭电源,待炉膛温度降至 100 °C 后,打开炉门,自然冷却至室温,取出试件进行外观检查与测试.



(a) 高温试验电炉



(b) 温升曲线

图 2 高温试验方法

Fig.2 High temperature test method

2 试验结果

2.1 试件外观与爆裂现象

高温试验后的 UHPC 立方体试件外观出现明显变化.以 C2-1.5 系列试件为例,如图 3 所示,经过 200 °C 高温作用后,与常温试件相比较,外观没有明显变化,呈青灰色,敲击声音清脆,表面无裂缝、掉皮、缺角破损等现象[图 3(b)];经过 400 °C 高温作用后,试件呈现浅褐色[图 3(c)],敲击声音明显变钝;经过 600 °C 高温作用后,试件外观呈灰白色,敲击声音较为低沉,表面可以观察到细微裂缝[图 3(d)];经过 800 °C 高温作用后,试件外观呈现黄白色,敲击声音低沉,表面出现明显的网状裂纹,并出现掉皮现象[图 3(e)].

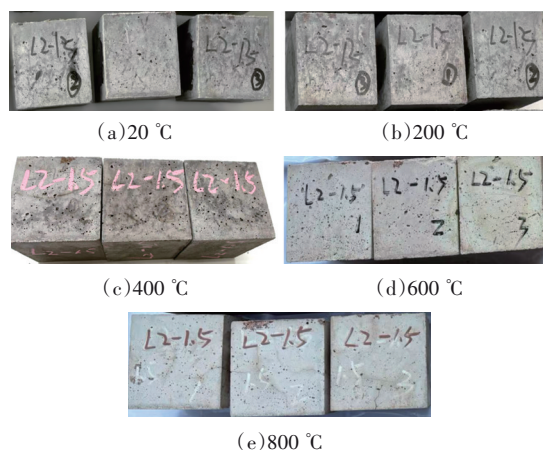


图 3 高温后试件外观(C2-1.5)

Fig.3 UHPC cubes after elevated temperature tests(C2-1.5)

高温试验过程中,部分 UHPC 立方体试件发生爆裂,爆裂温度与椰壳纤维掺量密切相关.对于不掺椰壳纤维的对比试件(C0 系列),在 400 °C 控制温度下的恒温过程中发生强烈的爆裂,试件破碎成大小不一的碎块,如图 4(a)所示. C2-0.5 的椰壳纤维掺量为 0.5%,在炉温接近 700 °C 时,传出爆裂声,冷却后,试件表面出现了一条贯穿性裂纹,但未碎裂成小块,如图 4(b)所示.当椰壳纤维掺量达到 1% 后, UHPC 试件在 800 °C 高温下未发生明显的爆裂现象,冷却后,试件表面出现了细裂纹网,但外观完整,如图 4(c)所示.

掺入的椰壳纤维可以提高 UHPC 高温下的抗爆裂性能,从机理上分析,椰壳纤维的主要成分为木质

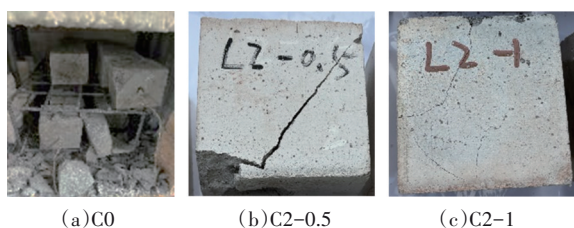


图4 椰壳纤维 UHPC 高温爆裂现象

Fig.4 Explosive thermal spalling phenomenon of coir fiber UHPC cubes

素、半纤维素和纤维素^[11]. 其中,木质素与半纤维素在 250~300 °C 发生分解,而纤维素在 350~400 °C 发生分解^[11]. 典型椰壳纤维 UHPC 试件高温后的微观形貌如图 5 所示,可以看到,与常温试件相比,经历 200 °C 高温作用后,椰壳纤维与 UHPC 基体之间未出现明显的间隙[图 5(b)],表明椰壳纤维的高温分解现象并不明显. 经历 400 °C 高温作用后,椰壳纤维因高温分解而产生明显收缩,可以看到椰壳纤维与 UHPC 基体之间形成可见的切向间隙[图 5(c)],这为 UHPC 内部水蒸气的逸出提供了通道,降低了高温引起的蒸汽压,从而有效抑制了 UHPC 高温下的爆裂行为. 经历 600 °C 高温作用后,椰壳纤维进一步收缩,纤维与基体之间的间隙增大,且纤维表面出现明显的剥落现象[图 5(d)]. 经历 800 °C 高温作用后,椰壳纤维完全碳化,其与基体之间的间隙非常明显,且 UHPC 基体也出现大量裂纹,较为疏松[图 5(e)],这些现象均有利于在 UHPC 基体中形成互相连通的孔道网,从而降低内部的蒸汽压. 从试验结果来看,掺入 1% 的椰壳纤维(2 cm)可以抑制 UHPC 高温爆裂现象的发生.

2.2 高温后质量损失

高温试验的主要结果列于表 1 和表 2,且每个数据均为每组 3 个试件测试结果的平均值. UHPC 试件高温后的质量损失采用质量损失率(D_m)来衡量,即高温试验后的剩余质量与初始质量之差的百分比,结果如图 6(a)所示. 可以看到,试件的质量损失率随控制温度的上升而显著增大. 一般而言,在 200 °C 范围内, UHPC 内部自由水大量蒸发,从而产生质量损失;在 200~400 °C 范围内, UHPC 基体中水化硅酸钙凝胶的吸附水蒸发,是导致 UHPC 质量损失的主要来源,且质量损失率的增长幅度明显高于 200 °C 范围内;在 400~600 °C 范围内,水化产物中的化学结合水出现损失以及氢氧化钙脱水分解等,是 UHPC 产生质量损失的主要原因;在 600~800 °C 控制温度下,

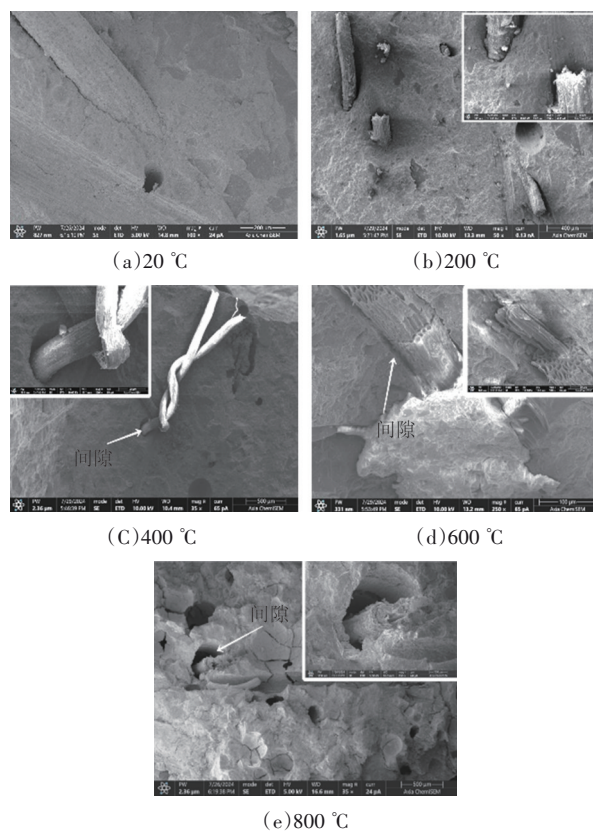


图5 高温后椰壳纤维 UHPC 微观形貌

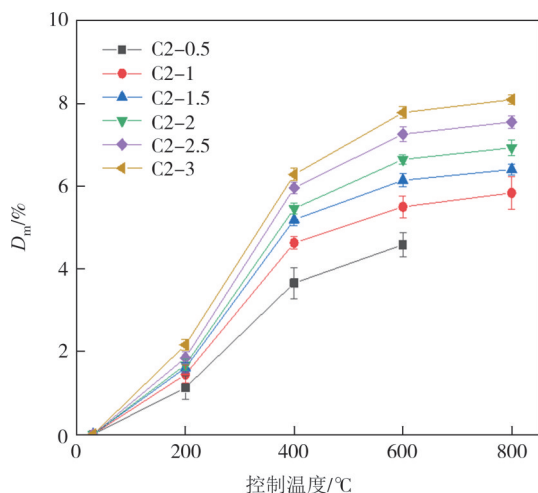
Fig.5 SEM images of UHPC specimens after high temperatures

碳酸钙发生分解,使得 UHPC 的剩余质量进一步减小^[16],但其质量损失率增长幅度较小,曲线趋于平缓. 此外,在相同的控制温度下, UHPC 的质量损失率随椰壳纤维掺量提高而增大,应该是由椰壳纤维高温下分解、碳化导致的,这也从另一方面印证了椰壳纤维抑制 UHPC 高温爆裂的机理.

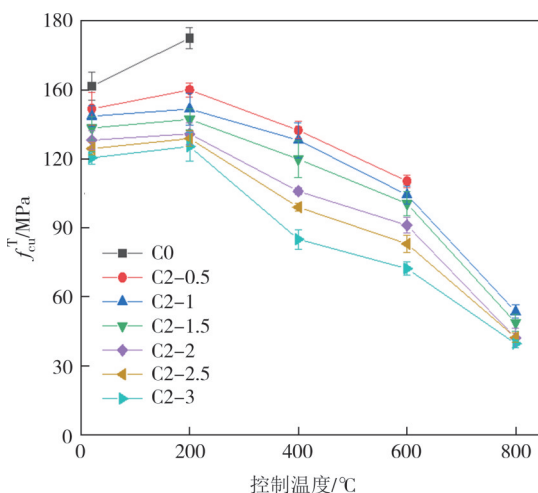
2.3 高温后立方体抗压强度

各组试件高温后的立方体抗压强度(f_{cm}^T)列于表 1,立方体试件抗压强度与控制温度的相关性也在图 6(b)中给出. 对比试件 C0 系列,由于发生高温爆裂,故只获得 200 °C 高温作用后的抗压强度值. 相比于常温试件, C0 组高温后剩余抗压强度有一定程度提高,这归结于 UHPC 经历一次 200 °C 的高温养护后,内部水化反应更加充分,因而对抗压强度发展有促进作用^[16]. 对于椰壳纤维 UHPC 试件,各系列试件高温后的立方体抗压强度发展趋势类似. 经历 200 °C 高温作用后,抗压强度稍有提高,但随着控制温度继续升高,其剩余抗压强度呈加速降低趋势,主要原因是 UHPC 内部水化产物高温分解,使得其微结构趋于疏松,导致抗压强度显著退化^[17]. 从图 6(b)

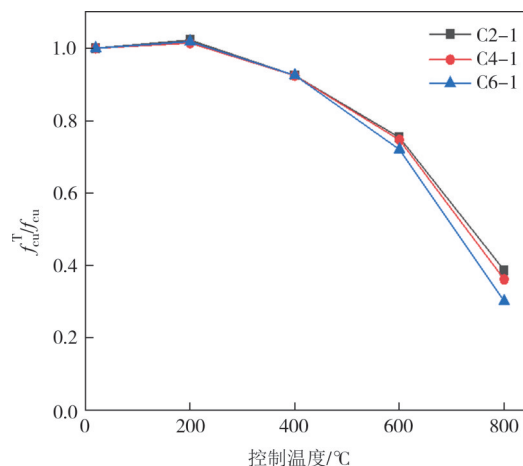
可以发现,经历相同高温作用后,UHPC的抗压强度随椰壳纤维掺量的增加而降低,其原因可能是:掺入的椰壳纤维增大了UHPC基体中的孔隙(如图5所示),使得UHPC基体在高温后的缺陷更显著^[13],这也与高温后的质量损失结果相吻合. C2-1、C4-1与C6-1三组试件所掺入椰壳纤维长度有差异,其经历不同控制温度作用后的立方体抗压强度退化如图6(c)所示,其中,剩余强度率用来量化强度退化程度,即高温后抗压强度与室温下抗压强度的比值(f_{cu}^T/f_{cu}). 结果显示,各组试件高温下的抗压强度退化趋势基本一致,但在控制温度超过400℃后,椰壳纤维长度大的试件,抗压强度降低幅度也较大. 一般而言,天然纤维越长,其在UHPC基体中的分散效果也越差,更容易发生结团现象,导致UHPC内部孔隙增加,对抗压强度产生不利影响^[18]. 因此,在掺量一定的条件下,采用相对较短的椰壳纤维有利于减小UHPC高温后的强度退化程度.



(a)质量损失率



(b)不同椰壳纤维掺量试件



(c)不同椰壳纤维长度试件

图6 UHPC立方体试验结果

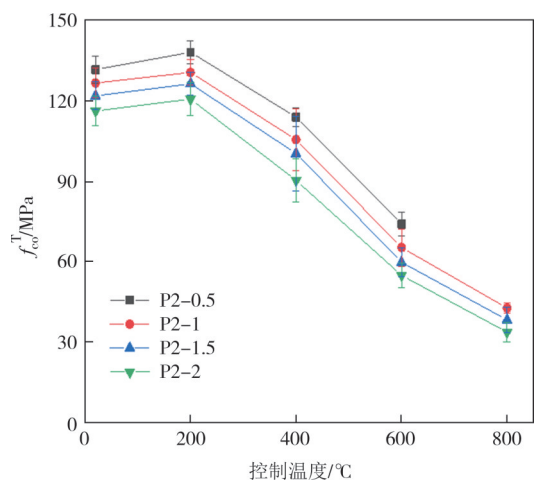
Fig.6 Test results of UHPC cubic specimens

2.4 高温后轴心抗压强度

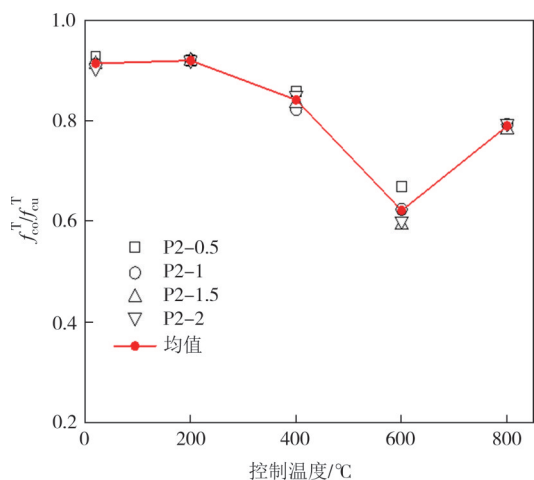
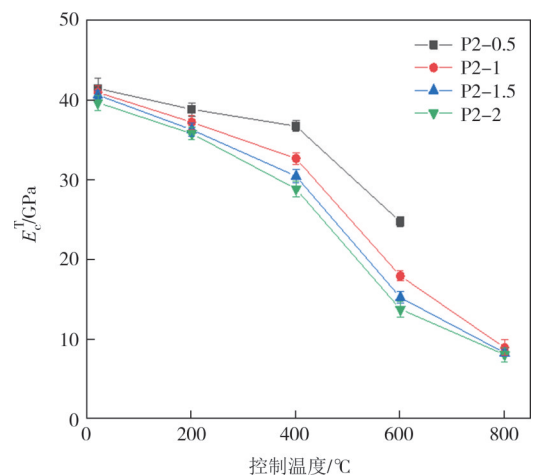
UHPC轴心抗压强度(f_{co}^T)与控制温度的相关性如图7(a)所示,可以看到,UHPC高温后的轴心抗压强度退化趋势与立方体抗压强度类似,即经历200℃高温后的轴心抗压强度稍有提高,而此后,随着控制温度升高,轴心抗压强度显著降低. 基于试验数据,图7(b)给出了高温后椰壳纤维UHPC轴心抗压强度与立方体抗压强度之比(f_{co}^T/f_{cu}^T)的相关性曲线. 可以发现, f_{co}^T/f_{cu}^T 并不维持恒定,随温度产生明显波动. 在200℃范围内,比值基本稳定,约为0.92;在200~600℃范围内, f_{co}^T/f_{cu}^T 随温度升高呈加速下降趋势,经历600℃高温后的比值约为0.62,且不同掺量试件之间试验结果的离散性也相对较大,这应该与椰壳纤维高温下的分解有关. 在此高温下,椰壳纤维中的有机成分基本完全分解,则椰壳纤维掺量差异对高温后抗压强度的影响幅度也有所增大,导致 f_{co}^T/f_{cu}^T 离散性增大;而经历800℃高温作用后,UHPC基体发生烧结使得部分孔隙熔融闭合,故 f_{co}^T/f_{cu}^T 有一定程度的恢复. 试验表明,基于高温后立方体抗压强度与常温下轴心抗压强度与立方体抗压强度之比,并不适合预测UHPC高温后的剩余强度,其预测结果偏于危险.

2.5 高温后弹性模量

对于棱柱体试件,在进行强度试验前,按照《超高性能混凝土试验方法标准》(T/CECS 864—2021)^[19]进行UHPC弹性模量(E_c^T)测试,结果列于表2中. 高温后弹性模量的退化情况如图7(c)所示,在试验范围内,椰壳纤维掺量对UHPC的初始弹性模量



(a) 轴心抗压强度-控制温度的相关性

(b) f_{cu}^T / f_{cu}^T -控制温度的相关性

(c) 弹性模量-控制温度的相关性

图7 UHPC棱柱体试件试验结果

Fig.7 Test results of UHPC prismatic specimens

E_c (20 °C) 的影响很小,但随着控制温度升高,高温后的弹性模量持续退化,这与高温后抗压强度的发展趋势不同,且在 400 °C 范围内,弹性模量的退化幅度相对较小;当控制温度超过 400 °C 后,弹性模量退化幅度显著增大.此外,在分别经历 200 °C、400 °C 和

600 °C 高温作用后,相同的控制温度下, E_c^T 随椰壳纤维掺量增加而减小,特别是低椰壳纤维掺量试件 P2-0.5 ($V_m=0.5\%$),其 E_c^T 明显高于其他试件.如经历 600 °C 高温作用后, P2-0.5、P2-1、P2-1.5 和 P2-2 的剩余弹性模量率 (E_c^T/E_c) 分别为 59.5%、43.7%、37.4% 和 34.5%,这应该与椰壳纤维掺量增加导致高温后 UHPC 基体孔隙等缺陷增多有关.而在经历 800 °C 高温作用后,各组试件的剩余弹性模量几乎一致,其主要原因是:经历 800 °C 高温作用后, UHPC 基体中产生大量微裂缝,导致基体疏松[图 5(e)],因而由椰壳纤维掺入所导致的高温缺陷所占总缺陷的比重显著降低,因此,椰壳纤维掺量对剩余弹性模量的影响不再明显.

3 分析与讨论

3.1 高温后力学性能评估

为评估椰壳纤维 UHPC 的抗火性能,参考近年来多种纤维 UHPC 高温后的抗压强度试验结果,与本文试验数据进行对比,包括常见的钢纤维(SF)^[15]和聚丙烯纤维(PP)^[20],也包括植物纤维类的黄麻纤维(JF)^[21]和亚麻纤维(FF)^[10],各类试件的基本情况如表 3 所示.

图 8(a) 给出了掺入钢纤维(SF)、聚丙烯纤维(PP)与椰壳纤维(CF)的三类 UHPC 高温后抗压强度与控制温度的相关性曲线,图中,采用剩余抗压强度率 (f_{cu}^T/f_{cu}) 来表征强度退化.当控制温度在 400 °C 以内,椰壳纤维 UHPC 与钢纤维 UHPC 的剩余抗压强度率基本一致,而超过 400 °C 以后,椰壳纤维 UHPC 的剩余抗压强度率明显高于对应的钢纤维 UHPC,如经历 600 °C 和 800 °C 高温作用后,前者的剩余抗压强度率分别高出后者约 14% 和 16%,表明椰壳纤维对 UHPC 抗火性能的改善效应优于钢纤维,且椰壳纤维具有极为突出的价格优势.相对而言,聚丙烯纤维对 UHPC 抗火性能的改善效应最为显著,在相同的控制温度下,聚丙烯纤维 UHPC 的剩余抗压强度率最高.这主要得益于聚丙烯纤维直径细小,因而,即使在较低的掺量下(0.2%),熔化后的聚丙烯纤维依然能够形成更高密度的孔道网,从而显著减小由蒸汽压所导致的 UHPC 热损伤.值得注意的是,在 800 °C 控制温度下,椰壳纤维 UHPC 与聚丙烯纤维 UHPC 的剩余抗压强度率接近,这表明在极端高温下,更能体现出椰壳纤维对于 UHPC 抗火性能的改善效应.

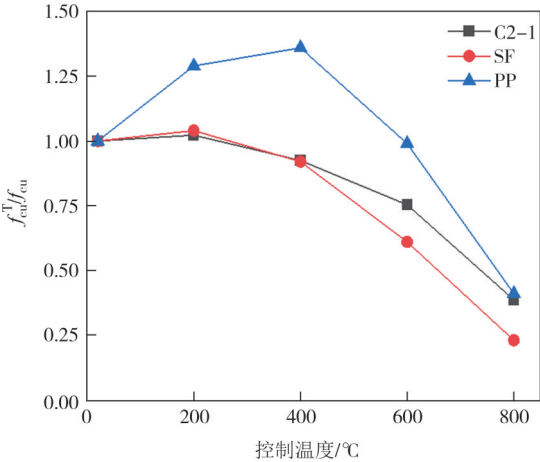
表3 各类纤维UHPC高温后的抗压强度试验情况
Tab.3 Comparison of compressive strength of UHPC with different fibers after high temperature

试件编号	纤维类型	试件规格/mm× mm×mm	水胶比	纤维掺量	纤维特性			预处理
					直径/μm	长度/mm	弹性模量/GPa	
PP ^[20]	聚丙烯纤维	70×70×70	0.24	0.2%	45	20	0.38	—
SF ^[15]	钢纤维	100×100×100	0.18	3%	0.12	8	200	镀铜纤维
JF ^[21]	黄麻纤维	50×50×50	0.20	10 kg/m ³	10~30	12	13.0	碱溶液浸泡
FF ^[10]	亚麻纤维	50×50×50	0.20	6 kg/m ³	40~80	12	27.6~103	碱溶液浸泡
C2-1	椰壳纤维	100×100×100	0.18	1%	20~60	20	2.8~4.7	原状纤维

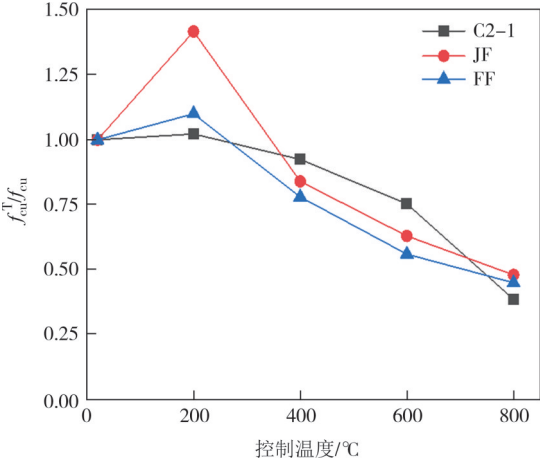
椰壳纤维(CF)与黄麻纤维(JF)、亚麻纤维(FF) UHPC试件高温后抗压强度退化情况如图8(b)所示. 其中,参考文献[10,21]中的亚麻纤维和黄麻纤维的掺量是以质量计,分别为6 kg/m³和10 kg/m³,按照其平均密度进行换算,黄麻纤维与亚麻纤维的体积掺量约为0.91%与0.86%,与本试验中C2-1系列试件较为接近. 可以看到,在经历200℃高温作用后,黄麻纤维与亚麻纤维UHPC的剩余抗压强度率高于椰壳纤维UHPC,这应该与文献[11]中对黄麻纤维和亚麻纤维采用5%的NaOH溶液预处理有关. 通过碱溶液浸泡,可以有效去除植物纤维表面附着的杂质、蜡和油等残留物,增加纤维与UHPC基体的黏结力,有利于UHPC抗压强度的提高. 而本试验中采用的是未经处理的原状椰壳纤维,故经过200℃高温作用后,其与UHPC基体黏结力低于经过预处理的黄麻纤维和亚麻纤维,因而剩余抗压强度率相对较低. 当控制温度达到400℃以后,三种植物纤维UHPC的剩余抗压强度率发展趋势大体类似,且经过800℃高温作用后,三者的剩余抗压强度率也较为接近,其主要原因是植物纤维在400℃下已发生高温分解,因而纤维表面预处理所带来的差异也就不再明显. 总的来看,在体积掺量接近的条件下,椰壳纤维与黄麻纤维、亚麻纤维对UHPC抗火性能的改善效应差别不大. 因此,从经济性角度来看,通过表面预处理来改善植物纤维UHPC的抗火性能,似乎并无必要,但需要开展椰壳纤维表面处理的对比试验进行验证.

3.2 高温后抗压强度预测

对高温后UHPC抗压强度进行合理预测,是火灾后UHPC构件安全性评估的重要依据,这方面已有学者开展了相关研究. Ozawa等^[6]、Zhang等^[10]和Ridha^[13]提出了一个掺有天然纤维UHPC高温后轴心抗压强度的计算公式,如下:



(a) 椰壳纤维、聚丙烯纤维、钢纤维



(b) 椰壳纤维、黄麻纤维、亚麻纤维

图8 不同纤维UHPC高温后抗压强度对比
Fig.8 Comparison of compressive strength of UHPC with different fibers after high temperature

$$\frac{f_{co}^T}{f_{co}} = 1.17 + 0.25V_{nf} - 0.79(\frac{T}{1\,000}), \quad 20\,^{\circ}\text{C} < T \leq 200\,^{\circ}\text{C} \tag{1a}$$

$$\frac{f_{co}^T}{f_{co}} = 1.65 + 0.09V_{nf} - 1.65(\frac{T}{1\,000}), \quad 200\,^{\circ}\text{C} < T \leq 800\,^{\circ}\text{C} \tag{1b}$$

式中: f_{co}^T 为高温后掺植物纤维的UHPC轴心抗压强度,MPa; f_{co} 为常温掺植物纤维的UHPC轴心抗压强

度,MPa; T 为控制温度, $^{\circ}\text{C}$; V_{nf} 植物纤维体积掺量,%.

采用式(1)对本文椰壳纤维UHPC高温后的轴心抗压强度进行预测,结果如图9所示.可以看到,预测结果显著高估椰壳纤维UHPC高温后的轴心抗压强度,特别是在 600°C 下,计算结果高出试验结果46%~78%,因此,该公式并不适用于椰壳纤维UHPC.基于试验数据,对式(1)进行修正,提出椰壳纤维UHPC高温后轴心抗压强度的计算公式,如下:

$$\frac{f_{\text{co}}^T}{f_{\text{co}}} = 0.991 + 0.004V_{\text{nf}} + 0.196\left(\frac{T}{1000}\right), \quad 20^{\circ}\text{C} < T \leq 200^{\circ}\text{C} \quad (2a)$$

$$\frac{f_{\text{co}}^T}{f_{\text{co}}} = 1.344 - 0.042V_{\text{nf}} - 1.243\left(\frac{T}{1000}\right), \quad 200^{\circ}\text{C} < T \leq 800^{\circ}\text{C} \quad (2b)$$

式(2)的适用范围为:椰壳纤维长度2 cm、纤维体积掺量2%以内,控制温度 800°C 以内.

公式(2)的计算结果也列于图9,可以看到,相比于式(1),式(2)的预测精度有显著改善.在试验范围内,计算结果与实测数据的误差均在10%以内,且离散也较小.该公式的预测结果可为椰壳纤维UHPC构件火灾后的安全性评估与加固设计提供参考.

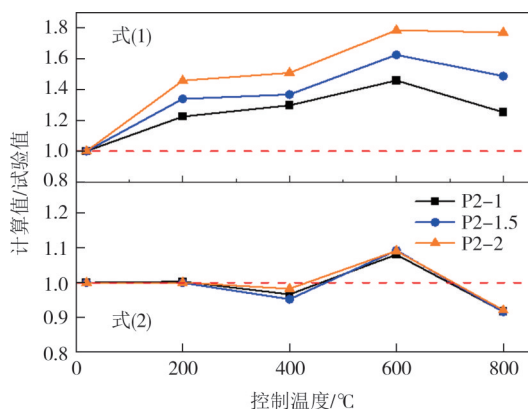


图9 计算结果与试验结果对比

Fig.9 Comparison of calculating results with test results

4 结论

1) 掺入椰壳纤维可以显著提高UHPC高温下的抗爆裂性能.在试验条件下,掺入1%的椰壳纤维(2 cm)可以有效抑制UHPC高温下的爆裂;电镜微观分析证实,椰壳纤维高温下产生收缩、分解、碳化,使得椰壳纤维与UHPC基体之间形成沿切向的孔隙网,为内部水蒸气的逸出提供了通道,有效降低了蒸汽压,从而避免了UHPC高温爆裂的发生,这也与高

温后的质量损失测试结果相吻合.

2) 经历 200°C 高温后,椰壳纤维UHPC的抗压强度稍有增加,而控制温度超过 200°C 后,抗压强度随温度升高而显著退化,且在相同的控制温度下,高温后的剩余强度随椰壳纤维掺量提高而下降;椰壳纤维UHPC高温后轴心抗压强度的下降幅度明显高于立方体抗压强度,且两者的比值随温度产生明显波动,因此,高温后的立方体抗压强度并不适用于椰壳纤维UHPC高温后的承载力评估.

3) 随着控制温度升高,椰壳纤维UHPC高温后的弹性模量降低,特别是控制温度超过 400°C 后,弹性模量大幅度降低;椰壳纤维掺量对UHPC初始弹性模量的影响小,但高温后的弹性模量随椰壳纤维掺量增加而降低,这与椰壳纤维掺量增加导致高温后UHPC基体缺陷增多有关,但经历 800°C 高温作用后,UHPC的剩余弹性模量基本上不受椰壳纤维掺量的影响.

4) 基于相关文献的试验数据,开展了不同纤维UHPC高温后抗压强度的对比分析,与常用的钢纤维和聚丙烯纤维相比较,椰壳纤维UHPC高温后剩余抗压强度率以及经济性,均显著优于钢纤维UHPC,且在极端高温下,椰壳纤维UHPC与聚丙烯纤维UHPC的剩余抗压强度率接近;在体积掺量接近的情况下,椰壳纤维与黄麻纤维、亚麻纤维对UHPC抗火性能的改善效应基本相当.

5) 已有的天然纤维UHPC高温后轴心抗压强度计算公式并不适用于椰壳纤维UHPC,基于试验数据对现有公式进行了修正,提出了新的椰壳纤维UHPC高温后轴心抗压强度计算公式,可为椰壳纤维UHPC构件火灾后的安全性能评估与加固设计提供参考.

参考文献

- [1] 单波,刘其元,吕哲玮,等. 钢筋RPC梁高温全过程抗弯性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(3): 92-101.
SHAN B, LIU Q Y, LÜ Z W, et al. Experimental study on flexural performance of reinforced RPC beams at the whole process of high temperature[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(3): 92-101. (in Chinese)
- [2] 邵旭东,邱明红,晏班夫,等. 超高性能混凝土在国内外桥梁工程中的研究与应用进展[J]. 材料导报, 2017, 31(23): 33-43.
SHAO X D, QIU M H, YAN B F, et al. A review on the research and application of ultra-high performance concrete in bridge engineering around the world[J]. Materials Reports, 2017, 31(23): 33-43. (in Chinese)

- [3] LI Y W, HUANG Y, ZHENG Y Y, et al. Facile and efficient synthesis of α -Fe₂O₃ nanocrystals by glucose-assisted thermal decomposition method and its application in lithium ion batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 416: 62–71.
- [4] 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.
- [5] ZHANG D, DASARI A, TAN K H. On the mechanism of prevention of explosive spalling in ultra-high performance concrete with polymer fibers [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 113: 169–177.
- [6] OZAWA M, SUBEDI PARAJULI S, UCHIDA Y, et al. Preventive effects of polypropylene and jute fibers on spalling of UHPC at high temperatures in combination with waste porous ceramic fine aggregate as an internal curing material [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 206: 219–225.
- [7] LI Y, ZHANG Y, YANG E H, et al. Effects of geometry and fraction of polypropylene fibers on permeability of ultra-high performance concrete after heat exposure [J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 116: 168–178.
- [8] GONG F, JIANG X, GAMIL Y, et al. An overview on spalling behavior, mechanism, residual strength and microstructure of fiber reinforced concrete under high temperatures [J]. *Frontiers in Materials*, 2023, 10: 1258195.
- [9] REN G S, YAO B, HUANG H H, et al. Influence of sisal fibers on the mechanical performance of ultra-high performance concretes [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 286: 122958.
- [10] ZHANG D, TAN G Y, TAN K H. Combined effect of flax fibers and steel fibers on spalling resistance of ultra-high performance concrete at high temperature [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 121: 104067.
- [11] WANG B, YAN L B, KASAL B. A review of coir fibre and coir fibre reinforced cement-based composite materials (2000 – 2021) [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 338: 130676.
- [12] 陈季荷, 顾少华, 李明鹏, 等. 竹纤维增强聚合物基复合材料性能及应用 [J]. *世界竹藤通讯*, 2022, 20(4): 18–23.
- CHEN J H, GU S H, LI M P, et al. Properties and applications of bamboo fiber reinforced polymer matrix composites [J]. *World Bamboo and Rattan*, 2022, 20(4): 18–23. (in Chinese)
- [13] RIDHA M M S. Combined effect of natural fibre and steel fibre on the thermal-mechanical properties of UHPC subjected to high temperature [J]. *Cement and Concrete Research*, 2024, 180: 107510.
- [14] ALI B, HAWREEN A, BEN KAHLA N, et al. A critical review on the utilization of coir (coconut fiber) in cementitious materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 351: 128957.
- [15] 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 J Q, DENG G Q, SHAN B. Ultrasonic test and microscopic analysis of reactive powder concrete exposed to high temperature [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2018, 45(1): 68–76. (in Chinese)
- [16] CHEN B, LIU J Y. Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(6): 1065–1069.
- [17] 郑文忠, 罗百福, 王英. 高温下复掺纤维 RPC 立方体抗压性能研究 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2012, 39(11): 13–19.
- ZHENG W Z, LUO B F, WANG Y. Compressive properties of cubes reactive powder concrete with hybrid fibers at elevated temperature [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2012, 39(11): 13–19. (in Chinese)
- [18] BOULEKBACHE B, HAMRAT M, CHEMROUK M, et al. Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material [J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(9): 1664–1671.
- [19] 超高性能混凝土试验方法标准: T/CECS 864—2021 [S]. 北京: 中国建筑工程工业出版社, 2021.
- Standard for test method of ultra-high performance concrete: T/CECS 864—2021 [S]. Beijing: China Architecture Engineering Press, 2021. (in Chinese)
- [20] 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 W Z, LI H Y, WANG Y. 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)
- [21] ZHANG D, TAN K H, DASARI A, et al. Effect of natural fibers on thermal spalling resistance of ultra-high performance concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 109: 103512.