



超高性能混凝土高温后性能试验研究

杨婷¹, 刘中宪¹, 杨焯凯², 吴成清³

(1. 天津城建大学 土木工程学院, 天津 300384; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072;

3. 悉尼科技大学 土木与环境工程学院, 悉尼 NSW 2007)

摘要:通过对超高性能混凝土进行高温加热和高温作用后立方体抗压强度试验,研究了超高性能混凝土高温作用后的表观特征、质量损失及力学性能。对比了单掺钢纤维、单掺聚丙烯纤维和混掺钢纤维和聚丙烯纤维对超高性能混凝土高温爆裂的抑制效果,考察了温度、纤维种类和掺量、骨料(石英砂和钢渣)对超高性能混凝土强度的影响。试验结果表明:混掺1%钢纤维和2%聚丙烯纤维能有效抑制超高性能混凝土高温爆裂,在高温作用后依旧保持完整形态;钢渣骨料混杂纤维超高性能混凝土具有优异的高温力学性能,在1000℃高温作用后仍能保持67%的残余强度;随着温度的升高,超高性能混凝土立方体抗压强度整体上表现出先升高后降低的规律;在目标温度超过600℃时,高温增强了超高性能混凝土的延性。

关键词:超高性能混凝土;高温;质量损失;力学性能

中图分类号:TU541 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2020)03-0115-12

Experimental investigation on behavior of ultra-high performance concrete after high temperature

Yang Ting¹, Liu Zhongxian¹, Yang Yekai², Wu Chengqing³

(1. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, P. R. China; 2. School of Civil Engineering,

Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China; 3. School of Civil and Environmental

Engineering, University of Technology Sydney, Sydney NSW 2007, Australia)

Abstract: The apparent characteristics, mass loss and mechanical properties of ultra-high performance concrete after exposure to high temperature were studied through the high temperature heating test and the cubic compressive strength test. The effects of steel fiber, polypropylene fiber, steel fiber and polypropylene fiber on cracking suppression of ultra-high performance concrete were compared. The effects of temperature, fiber type and content, aggregate (quartz sand and steel slag) on the strength of ultra-high performance concrete were investigated. The test results show that 1% steel fibers and 2% polypropylene fibers can effectively restrain high temperature explosion behavior, and the specimen remains intact after

收稿日期:2019-09-22

基金项目:国家自然科学基金(51978186);天津市科技支撑计划(19YFZCSN01180,17YFZCSF01140)

作者简介:杨婷(1995-),女,主要从事建筑结构工程防灾减灾研究,E-mail:921818805@qq.com.

杨焯凯(通信作者),男,博士生,E-mail:yekai_yang@tju.edu.cn.

Received:2019-09-22

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51978186); Tianjin City Science and Technology Support Program (No. 19YFZCSN01180, 17YFZCSF01140)

Author brief: Yang Ting (1995-), main research interests: disaster prevention and mitigation in building structure engineering, E-mail: 921818805@qq.com.

Yang Yekai (corresponding author), PhD candidate, E-mail: yekai_yang@tju.edu.cn.

high temperature. Ultra-high performance concrete with steel slag aggregate and hybrid fiber has excellent high temperature mechanical properties, the residual strength of 67% can still be maintained after being exposed to high temperature at 1 000 °C. With the increase of temperature, the cubic compressive strength of ultra-high performance concrete increases first and then decreases. High temperature enhances the compressive ductility of ultra-high performance concrete when the target temperature is more than 600 °C.

Keywords: ultra-high performance concrete; high temperature; mass loss; mechanical property

超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete,简称UHPC)因高强度、高韧性、高耐久性等优异的力学性能而被逐步应用到实际工程中。UHPC致密的微观结构和较低的渗透性,在提升自身力学性能的同时,受热爆裂的风险也相应提高^[1-2]。近年来,世界范围内火灾频繁发生,造成的损失不可估量,而UHPC往往用在重要结构或关键节点,其防火性能的优劣将直接影响建筑物的安全性。因此,有必要对UHPC高温性能进行系统研究,以解决其高温爆裂和力学性能退化问题。

21世纪初,学者们^[3-5]对UHPC开展了高温损伤爆裂数值模拟,发现UHPC在火灾条件下易发生爆裂。Liu等^[6]对大扩展度UHPC进行了一系列抗火试验,得出UHPC抗压强度随温度作用时间的延长而不断降低,500 °C高温持续作用120 min后,抗压强度降为常温时的55%。李传习等^[7]研究发现,钢纤维可以改善混凝土力学性能。Tai等^[8]研究表明:UHPC中钢纤维掺量越大,其弹性模量越大,且弹性模量随温度的升高单调降低。杨少伟等^[9]发现钢纤维UHPC与无钢纤维UHPC高温作用后动态应力-应变曲线类似。刘红彬等^[10]发现增加钢纤维掺量不能抑制UHPC爆裂的发生。而杨娟等^[11]通过对不同纤维类型UHPC的研究表明,钢纤维可以改善UHPC高温爆裂性能,端钩型普通工业钢纤维最有利于提高UHPC高温抗爆裂性能。学者们^[12-17]发现聚合物纤维显著影响UHPC高温爆裂性能。Sun等^[14]研究表明,在UHPC中掺入0.2%聚丙烯纤维可有效抑制高温爆裂现象发生。Poon等^[16]研究表明,在温度超过600 °C时,聚丙烯纤维UHPC抗压强度急剧下降,聚丙烯纤维失去其积极影响作用。Sanchayan等^[17]研究发现,体积掺量为2%的混杂纤维(钢纤维、PVA纤维)对UHPC高温爆裂抑制作用最显著。学者们^[18-19]还对不同纤维和骨料的UHPC高温后残余力学性能做了研究,发现在800 °C高温作用后,试件残余抗压强度百分率最高为40%。

目前,已有学者对UHPC高温性能进行了一定研究,但高温后UHPC残余强度的维持能力表现不足。笔者从材料制备入手,通过改变骨料类型和纤维掺加方式制备一种性能优越且耐高温的UHPC,并对其进行高温试验,系统分析骨料类型和纤维掺加方式对UHPC在不同目标温度下外观特征、质量损失及力学性能的影响。

1 试验材料及方案

1.1 试验材料

试验制备UHPC的主要原材料有:42.5硅酸盐水泥、平均粒径0.1~0.3 μm的硅灰粉、粉煤灰、钢渣、石英砂、钢纤维、聚丙烯纤维、聚羧酸减水剂(如图1(a)所示)。其中,钢纤维和聚丙烯纤维的基本物理特性如表1、表2所示,外貌形态如图1(b)、(c)所示;石英砂和钢渣的物理特征如表3、表4所示,主要材料的化学成分如表5所示。

表1 钢纤维的基本物理特性

Table 1 Basic physical properties of steel fiber

长度/ mm	直径/ mm	密度/ (g·cm ⁻³)	形态	抗拉强 度/MPa
10	0.12	7.8	平直光滑	>2 500

表2 聚丙烯纤维的基本物理特性

Table 2 Basic physical properties of polypropylene fiber

长度/ mm	直径/ μm	密度/ (g·cm ⁻³)	熔点/ °C	燃点/ °C	抗拉强 度/MPa	弹性模 量/GPa	断裂延 伸率/%
10	31	0.91	165	580	≥400	≥3.5	30

表3 石英砂的物理特性

Table 3 Physical properties of quartz sand

颜色	主要成分	密度/ (g·cm ⁻³)	硬度	熔点/°C	堆积密度/ (g·cm ⁻³)
乳白色	SiO ₂	2.65	7	1 650	1.5

表4 钢渣的物理特性

Table 4 Physical properties of steel slag

颜色	平均粒径/mm	密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	抗压性/MPa	比表面积/(kg·m ⁻²)
灰黑色	2	3.2	2.7	25.6	387

表5 主要材料的化学成分

Table 5 Chemical composition of main materials %

材料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	烧失量
水泥	21.86	4.25	2.66	63.59	2.19	1.75
硅灰	93.95	0.5	0.59	1.95	0.27	1.3
粉煤灰	52	22	4	12	0.62	<1
石英砂	98.5	极微	0.06	极微	极微	0.7
钢渣	17.03	5.64	22.69	43.38	5.98	1.56

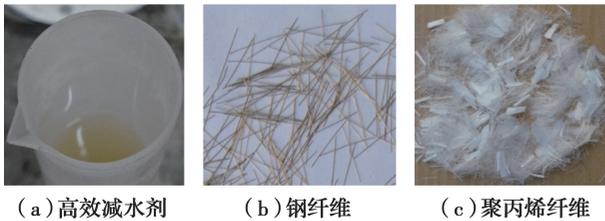


图1 材料外貌形态

Fig. 1 Material appearance

1.2 试验方案

设计制备了6组材料UHPC,研究纤维和骨料对UHPC在不同目标温度作用后表现特征、质量损失及力学性能的影响:1)温度:设定目标温度分别为常温(25℃)、200、400、600、800、1 000℃;2)纤维:设置单掺2%钢纤维、单掺2%聚丙烯纤维、混掺2%聚丙烯纤维和1%钢纤维3种纤维掺法;3)骨料:研究石英砂和钢渣分别作为骨料对试验结果的影响。试验配合比如表6所示,在各目标温度下UHPC立方体抗压强度如表7、表8所示。

有学者^[20]研究发现,UHPC试件的尺寸效应对其在高温下的变化规律影响较小,为避免高温试验过程中UHPC试件的爆裂对加热设备以及人员造成危害,试验前期采用50 mm×50 mm×50 mm立方体试件对UHPC高温性能进行研究,在确定最优耐高温UHPC配合比后,采用《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)规范中150 mm×150 mm×150 mm立方体试件对最优耐高温UHPC材料进行力学性能研究。

表6 试验配合比

Table 6 Test mix ratio

系列	水泥	硅灰	粉煤灰	石英砂	钢渣	钢纤维	聚丙烯纤维	水	减水剂
UHPC1	850	137.5	112.5	1 100	0	0	0	176	8
UHPC2	850	137.5	112.5	1 100	0	156	0	176	8
UHPC3	850	137.5	112.5	1 100	0	0	18.2	176	8
UHPC4	850	137.5	112.5	1 100	0	78	18.2	176	8
UHPC5	850	137.5	112.5	0	1 100	0	0	176	8
UHPC6	850	137.5	112.5	0	1 100	78	18.2	176	8

表7 各温度条件下UHPC立方体抗压强度

Table 7 Cubic compressive strength of UHPC after different temperatures

系列	试件	25℃	200℃	400℃	600℃	800℃	1 000℃
UHPC1	1	112.6	168.3				
	2	119.8	171.5				
	3	113.7	168.8				
	4	109.1	169.7				
UHPC2	1	190.0	212.3				
	2	185.6	210.3				
	3	184.0	209.6				
	4	176.4	199.8				

续表 7

系列	试件	25 °C	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C	1 000 °C
UHPC3	1	123.8	171.7	163.1	111.2	39.5	38.1
	2	124.1	172.4	165.0	112.5	40.9	38.4
	3	122.9	170.9	161.4	111.6	38.7	37.8
	4	129.2	169.0	160.5	110.7	36.9	37.7
UHPC4	1	165.3	176.4	231.7	153.7	39.9	39.2
	2	164.9	175.2	231.0	152.9	41.1	38.7
	3	165.0	176.5	229.6	153.6	40.0	40.5
	4	164.8	171.9	227.7	153.8	39.0	37.6
UHPC5	1	96.1	204.8				
	2	95.3	202.9				
	3	94.9	202.5				
	4	93.7	201.8				
UHPC6	1	169.6	183.8	224.3	211.1	150.0	112.3
	2	168.4	182.6	223.7	210.6	149.6	112.1
	3	167.9	182.1	223.0	209.8	148.9	111.8
	4	172.1	189.5	231.0	214.5	153.5	113.8
UHPC6-150	1	140.2	156.6	192.3	176.3	125.7	94.3
	2	144.3	166.7	189.1	175.7	123.6	92.1
	3	139.4	154.8	193.2	175.8	129.0	91.8
	4	142.9	156.6	191.7	175.6	128.8	94.6

表 8 各温度条件下 UHPC 立方体抗压强度平均值及标准差

Table 8 Average cubic compressive strength of UHPC and standard deviation after different temperatures MPa

系列	25 °C		200 °C		400 °C		600 °C		800 °C		1 000 °C	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
UHPC1	113.8	3.9	169.5	1.2								
UHPC2	184	4.9	208	4.9								
UHPC3	125	2.5	171	1.3	162.5	1.7	111.5	0.7	39	1.5	38	0.4
UHPC4	165	0.2	175	1.9	230	1.6	153.5	0.4	40	0.8	39	1.0
UHPC5	95	0.9	203	1.1								
UHPC6	169.5	1.6	184.5	3.0	225.5	3.2	211.5	1.8	150.5	1.8	112.5	0.8
UHPC6-150	141.7	2.0	158.7	4.7	191.8	1.5	175.9	0.3	126.4	2.3	93.2	1.3

注:UHPC6-150 试件尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm,其余试件尺寸均为 50 mm×50 mm×50 mm。

考虑到高温爆裂的随机性,试验每种情况下设置 4 个试件。试验采用 30 L 单轴卧式强制式搅拌机拌和 UHPC,在搅拌机中分批次加入各种配合比材料,依次搅拌。充分搅拌,浇筑以及振捣后用薄膜覆盖,静置 24 h 拆模,并按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)进行正常标准养护,养护完成后进行高温加热试验。

试验采用 1 400 °C 快速升温箱式电炉进行升温。国际采用标准升温速率为 ISO834^[21],用以反映

火灾发生的真实情况。而文献表明^[22] 5 °C/min 的升温速率对纤维混凝土高温性能测试仍然具有良好的可靠性。由于 UHPC 高强低渗,有学者^[23]发现平均升温速率为 4 °C/min 更有利于研究 UHPC 高温性能。因此,选择平均升温速率为 4 °C/min,升温曲线如图 2 所示。混凝土类材料为温度惰性材料,为保证高温后试件内外温度一致,试件达到目标温度后恒温 2 h,再从高温炉中取出,自然冷却至常温后进行 UHPC 立方体抗压强度试验。

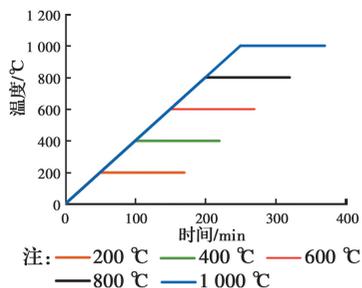
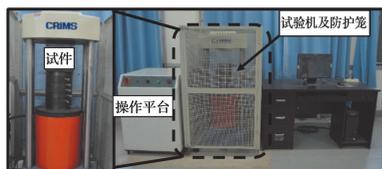


图2 试验升温曲线

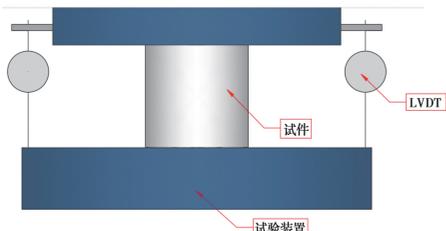
Fig. 2 Temperature-time curves in tests

试件经过高温加热后,按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)的要求在YNS-Y1000型电液伺服压力试验机上进行立方体抗压强度试验,如图3(a)所示。试验加载速度为0.2 mm/min,加载过程中设备自动结束试验,记录并保存试验数据。利用位移传感器(LVDT)对试件变形进行测量,进而计算出应变。由于试验机承压板与试件之间有摩擦力,立方体试件是复杂受力,非单轴受力,LVDT所测非单轴变形。位移计布置如图3(b)所示。立方体抗压强度按式(1)计算。

$$f_{cu} = \frac{F}{A} \quad (1)$$



(a) YNS-Y1000型电液伺服压力试验机



(b) 位移计布置图

图3 试验装置图

Fig. 3 Testing setup

式中: f_{cu} 为混凝土立方体试件抗压强度,MPa; F 为试件破坏荷载,N; A 为试件承压面积, mm^2 。

由表8可知,所测试件离散性小,因此,试件的立方体抗压强度取4个试件测值的算术平均值。

2 试验现象与分析

2.1 UHPC 高温后外观评价

表9为各试验系列UHPC典型表现特征随温

度升高变化情况。由表9可知:温度越高,试件劣化越严重;纤维和骨料影响着试件的表现特征。经历200℃高温后,各系列试件外观完整,无掉皮、裂纹、缺角、炸裂等现象;掺入聚丙烯纤维的UHPC(UHPC3、UHPC4、UHPC6)表面有油渍产生,这是由于聚丙烯纤维在165℃时开始溶解,经200℃高温作用冷却至常温后,聚丙烯纤维重新固化形成依附在UHPC基体上的热塑性树脂。无纤维UHPC(UHPC1、UHPC5)和单掺钢纤维UHPC(UHPC2)在目标温度400℃的加热过程中发生了粉碎性爆裂破坏,而掺入聚丙烯纤维的UHPC外观完整,颜色灰白,由于聚丙烯纤维受热挥发^[24],试件表面油渍基本消失。各系列试件在600℃高温作用后呈乳白色;单掺聚丙烯纤维的石英砂UHPC(UHPC3)出现了明显掉皮、缺角及局部爆裂现象;而混杂纤维UHPC(UHPC4、UHPC6)外观相对完整。经历800℃高温后,石英砂UHPC(UHPC3、UHPC4)呈现灰茶色,而钢渣UHPC(UHPC6)颜色泛白;混杂纤维UHPC表面开始出现网状龟裂细纹且有黑丝出现,有明显疏松现象,但无明显破坏。经历1000℃高温后,混杂纤维UHPC表面布满黑丝,这是因为钢纤维在高温下脱氧碳化变黑所致;单掺聚丙烯纤维UHPC在1000℃高温作用下掉皮缺角及局部爆裂现象加重,而混杂纤维UHPC试件虽然疏松现象加重,但保持了较完整的形态。

UHPC产生高温爆裂现象是因为其高强、质密、低孔隙率,在高温下,试件中的水分很难逸出。随着温度升高,水气积聚,UHPC试件内部形成蒸汽压并逐渐积累。当蒸汽压力超过UHPC抗拉强度时,试件开始从外部薄弱处层层爆裂,水蒸汽随着爆裂的发生而逸出,爆裂威力越大,水蒸汽逸出越多,这也证实了蒸汽压机理^[25-26]。然而,混杂纤维UHPC的表现高温作用后基本保持完整形态,这是由于UHPC内部掺入的聚合物纤维在高温作用下熔化、气化,在混凝土内部留下微通道,提供了混凝土内部水分散失的有效通道,减缓了UHPC内部蒸汽压的堆积,避免蒸汽压力超过UHPC抗拉强度而爆裂^[27]。同时,利用钢纤维与UHPC基体的粘结作用抑制混凝土在高温作用下发生体积膨胀,进而减弱裂缝的开展。

综上所述,聚丙烯纤维和钢纤维的共同作用极大改善了UHPC高温抗爆裂性能。

表 9 各系列 UHPC 高温冷却后外观

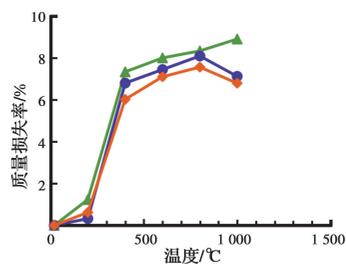
Table 9 Appearance of UHPC after high temperatures

温度/°C	UHPC1	UHPC2	UHPC3	UHPC4	UHPC5	UHPC6
常温 (25)						
200						
400						
600						
800						
1 000						

2.2 UHPC 高温后质量损失

混凝土在高温作用后,其质量会有损失,主要包括水分的蒸发、C—S—H 凝胶的脱水分解、Ca(OH)₂ 和 CaCO₃ 的分解、未水化水泥和掺合料的损失以及试件表面爆裂或剥落带来的质量损失^[28-29]。因此,混凝土高温下的质量损失规律在一定程度上反映了混凝土内部结构的变化。对各系列 UHPC 在不同目标温度下进行了质量损失测量,图 4 为测得的各系列聚丙烯纤维 UHPC 质量损失率随温度变化关系图。

由图 4 可见,掺有混杂纤维 UHPC 高温后的质量损失可分为 4 个阶段:1)200 °C 高温以下,质量损失逐渐增大,其主要来源于试件内部自由水、毛细水的蒸发及聚丙烯纤维的熔解,未水化水泥和掺合料的损失。2)200~400 °C 期间,质量损失急剧增加,



注: —▲— UHPC3 —●— UHPC4 —◆— UHPC6

图 4 各系列纤维 UHPC 质量损失率与温度关系
Fig. 4 The relationship between mass loss rate and temperature of UHPC with fibers

主要由于试件内部 C—S—H 凝胶中水分开始蒸发,聚丙烯纤维熔解挥发。3)400~800 °C 高温期间,质量损失继续缓慢增长,此阶段的质量损失来源于结晶水的散失;C—S—H 凝胶持续分解,800 °C 时分解完成。4)800~1 000 °C,质量损失率有所下降,这主要是因为 Ca(OH)₂ 和 CaCO₃ 大量分解产生 CaO,

试件在冷却时吸收空气中的水和 CO_2 重新生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 CaCO_3 [28]。此外,由图 4 可知,在纤维含量相同的情况下,钢渣骨料 UHPC 高温作用后的质量损失较小。由表 5 可知,钢渣骨料与水泥的化学成分相近,且表面粗糙,与混凝土水泥基粘结程度较好,因而相对于石英砂骨料 UHPC 而言,钢渣骨料 UHPC 具有更紧密的分子结构,质量损失较小。

单掺聚丙烯纤维 UHPC 在 400 °C 高温作用后质量损失持续增长,并没有出现下降段,除了上述原因外,还有 UHPC 在高温作用后试件产生局部爆裂、剥落带来的质量损失,且其效应大于试件在冷却时重新生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 CaCO_3 。

试验测得无聚丙烯纤维 UHPC 在目标温度 200 °C 时质量损失仅有 0.34%,在目标温度 400 °C 时均发生粉碎性爆裂,无法测得更高温度后的质量损失。说明无聚丙烯纤维 UHPC 在高温作用下,由于其高强、低孔隙率,内部水气很难逸出,导致试件层层爆裂。再次证明聚丙烯纤维的掺入提高了 UHPC 高温抗爆裂性能。

2.3 UHPC 高温后力学性能

2.3.1 UHPC 高温后立方体抗压强度

对不同温度下 6 组材料 UHPC 进行立方体抗压强度试验,各系列 UHPC 在不同目标温度下立方体抗压强度值如表 7、表 8 所示,UHPC1、UHPC2、UHPC5 在目标温度 400 °C 时均发生了粉碎性爆裂,未能采集到其 400 °C 及更高温度下立方体抗压强度试验数据。

为便于研究与分析,给出了立方体抗压强度相对值,即相同条件下,UHPC 高温后立方体抗压强度与常温立方体抗压强度的百分比,用以对比不同类型 UHPC 在高温作用后强度的维持能力。各系列 UHPC 在不同目标温度下立方体抗压强度相对值如图 5 所示。

由图 5 和表 8 可知,在 200 °C 高温后,各系列 UHPC 的立方体抗压强度都有不同程度提升。其中 UHPC5 立方体抗压强度提升程度最大,从常温的 95 MPa 增长到 203 MPa,立方体抗压强度提高了 113.7%。

UHPC 经高温作用,试件内部自由水和毛细水蒸发,而 UHPC 密实度高、孔隙率低,导致水分散失通道不畅,水分无法逸出,在 UHPC 中营造出近似

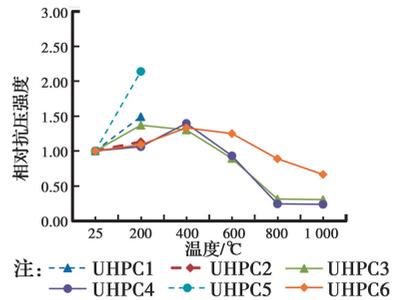


图 5 UHPC 不同温度作用后立方体抗压强度相对值

Fig. 5 Relative values of cubic compressive strength of UHPC after different temperatures

高温蒸汽养护的环境,使得水泥水化反应和火山灰反应互相促进,硅灰、粉煤灰中的活性二氧化硅与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成了更多的 C—S—H 凝胶,C—S—H 凝胶在高温高压环境下转变成硬硅钙石和托勃莫来石,使得内部结构更加密实,抗压强度得以提高(正效应) [30];同时,自由水、毛细水的相继散失在试件内部形成毛细裂缝和空隙,试件内部不断积聚的蒸汽压对周围固体介质产生张力,促使裂缝扩展(负效应) [30-31]。

由试验结果可知,在 200 °C 高温作用下,正效应占主导地位,导致 UHPC 宏观上表现为立方体抗压强度较常温时明显增强,其中,钢渣骨料素 UHPC (UHPC5) 增强效果最显著,高温增强了钢渣骨料素 UHPC 试件内部结构的密实性,进而提高 UHPC 立方体抗压强度。

UHPC3、UHPC4、UHPC6 这 3 组试件在不同高温作用后,立方体抗压强度变化规律相似,整体上表现为高温后立方体抗压强度随温度的升高先增加后降低,具体表现有所差异。

掺入聚丙烯纤维 UHPC 在经过 600 °C 高温作用后,仍保持着较高强度,而经过 800 °C 高温作用后,UHPC3、UHPC4 的立方体抗压强度下降到 40 MPa 左右,强度损失严重。这是由于在 400 °C 之前形成的温度对 UHPC 强度正面效应继续存在但停止增长,各种劣化因素持续增强,混凝土内部结构密实性急剧下降。试件经过 800 °C 高温作用后立方体抗压强度随温度的升高改变缓慢,立方体抗压强度相对值保持在 30% 左右,说明试件在经过 800 °C 高温作用后,各种劣化因素增长缓慢。

UHPC6 在 1 000 °C 高温作用后,立方体抗压强

度保持在 112 MPa 左右,仍具有常温强度的 67%,表现出了优异的耐火性能。钢渣表面粗糙,能改善高温 UHPC 界面粘结性能,钢渣作为细骨料具有较高的热稳定性且与水泥的化学成分相近,能缓解骨料与水泥浆体的热不相容性,进而显著改善 UHPC 高温后力学性能^[23]。可见钢渣作为耐火骨料很好地解决了 UHPC 在高温作用后强度急剧损失的问题,这为 UHPC 提高耐火性能提供了很好的思路。

2.3.2 UHPC 高温后压缩破坏形态 表 10 为各系列 UHPC 在不同目标温度作用后压缩试件的破坏形态,从中可以看出,UHPC1 在常温下和 200 °C 高

温作用后的受压破坏形态相同,试件均发生了压缩脆性破坏;UHPC5 在 200 °C 高温作用后也发生了严重脆性破坏。而 UHPC2 在常温下和 200 °C 高温作用后,均发生了裂纹累积塑性受压破坏,破坏形态为典型的 X 交叉型剪切破坏,受压破坏后无碎块崩出,仅表面出现膨胀、掉渣、裂纹现象,试件仍保持良好的整体性。说明钢纤维的粘结和桥接作用改善了 UHPC 的脆性。UHPC3 在常温下受压破坏形态为延性破坏,说明常温下聚丙烯纤维对 UHPC 具有阻裂作用。

表 10 各系列 UHPC 不同温度后压缩破坏形态

Table 10 Compression failure of UHPC at different temperatures

温度/°C	UHPC1	UHPC2	UHPC3	UHPC4	UHPC5	UHPC6
常温 (25)						
200						
400						
600						
800						
1 000						

单掺聚丙烯纤维 UHPC 在 200~600 °C 高温作用后,由于聚丙烯纤维的熔解,UHPC 内部无纤维约束,试件均发生压缩脆性破坏,且强度越高,脆性越大。在 600 °C 以后,高温损伤致使试件抗压强度

急剧下降,因而受压破坏脆性有所改善。

混杂纤维 UHPC 在常温(25 °C)~1 000 °C 高温作用后,试件破坏均表现为裂纹累积塑性破坏,与 UHPC3 在不同温度后的受压破坏形态相比发生了

很大变化。这主要是因为纤维复掺改变了 UHPC 高温作用后试件受压破坏形态。聚丙烯纤维在 165 °C 溶解,在 200 °C 高温作用后聚丙烯纤维增强阻裂的积极作用已基本消失。在 200~600 °C 高温作用下,钢纤维发挥桥接和阻裂作用,致使试件在受压时仍能保持一个较为完整的形态,没有发生压缩脆性破坏。在 800 °C 后,钢纤维开始脱氧碳化,在 1 000 °C 高温作用后,钢纤维对 UHPC 高温积极作用基本丧失,试件破坏后形成上下相接的两个椎体。

由表 10 对比发现,由于钢渣骨料 UHPC 在高温下具有更密实的分子结构,相对于石英砂骨料 UHPC 来说,高温作用后的破坏程度更小;钢渣骨料混杂纤维 UHPC 在高温作用后力学性能最佳,这与 2.3.1 节得出的结论一致。

3 钢渣骨料混杂纤维 UHPC 高温后力学性能

钢渣骨料混杂纤维(UHPC6)高温力学性能以及对强度的维持能力较好,因此,分析了 UHPC6 在标准试验立方体尺寸(150 mm×150 mm×150 mm)下不同温度作用后的应力-应变曲线,并研究了最优耐高温 UHPC 尺寸效应对其残余力学性能的影响。

图 6 为标准立方体试验尺寸下材料 UHPC6 在不同温度作用后的应力-应变曲线(应力、应变均取 4 个试件的平均值)。由于混杂纤维的加入改变了 UHPC 的脆性破坏,试验均采集到了 UHPC6-150 不同温度作用后受压应力-应变曲线下降段,试件在压缩过程中均发生了延性破坏,与 UHPC6 材料破坏形态一致。由图 6 可知,随着温度的升高,UHPC6-150 的立方体抗压强度表现出先增加后降低的趋势,临界温度为 400 °C。室温~400 °C 高温作用后,曲线峰值点随温度升高而升高,曲线下降段随温度升高而变陡,表明在经过高温后 UHPC 依然表现出强度越高脆性越大的特点。在 600 °C 高温后,峰值点开始下移,弹性模量开始下降,然而曲线下降段开始变缓,说明温度超过 600 °C,钢渣骨料混杂纤维 UHPC 经过高温作用后延性得到一定程度的发展;钢纤维可以很好地缓解高温后 UHPC 受压脆性破坏。

由表 11 可知,该最优耐高温材料-钢渣骨料混

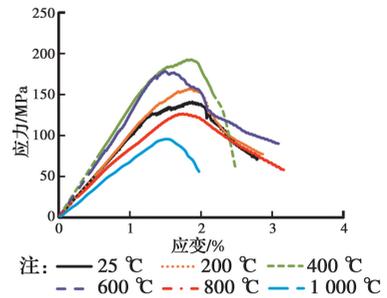


图 6 UHPC6-150 不同温度后受压应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of UHPC6-150 after different temperatures

杂纤维 UHPC 具有尺寸效应,不同尺寸的试件在不同温度作用下立方体抗压强度明显不同,然而,在不同温度作用后,不同尺寸试件之间的强度转化因子(即不同尺寸试件在相同温度下的强度之比)基本一致,说明高温对 UHPC 的强度转换因子影响不大,对 UHPC 在高温作用后的变化规律影响不大,这也证实了 Yang 等^[20]的观点。

表 11 UHPC6 不同尺寸试件的平均抗压强度及转化因子

Table 11 Average compressive strength and transformation factor of specimens with different sizes MPa

系列	25 °C	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C	1 000 °C
UHPC6	169.5	184.5	225.5	211.5	150.5	112.5
UHPC6-150	141.7	158.7	191.8	175.9	126.4	93.2
强度转化因子	0.84	0.86	0.85	0.83	0.84	0.83

注:UHPC6 试件尺寸为 50 mm×50 mm×50 mm;UHPC6-150 试件尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm;转化因子=UHPC6-150 的强度/UHPC6 的强度。

图 7 为其他学者^[19,32-33]研究 UHPC 在不同高温作用后相对抗压强度值。为了避免试件尺寸及用料配合比对结论的影响,对其他学者研究 UHPC 高温作用后抗压强度的结果进行归一化处理,即相同条件下,UHPC 高温后抗压强度与常温抗压强度的百分比。

由图 7 可以看出,UHPC 抗压强度随温度的升高先上升后降低,这与本文中研究的规律相符。同时,该钢渣骨料混杂纤维 UHPC 在 1 000 °C 高温作用后,残余强度相对值达到 67%;800 °C 高温作用后,残余强度相对值高达 89%,比其他学者研究的 UHPC 在 800 °C 高温作用后残余强度相对值高

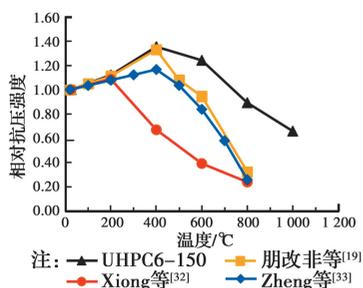


图7 UHPC 相对抗压强度与温度的关系

Fig. 7 Relation between relative compressive strength and temperature of UHPC

56%。由此可见,该钢渣骨料混杂纤维 UHPC 性能优越且在高温作用后性能稳定,具有较好的耐高温性能。

4 结论

对 168 个 UHPC 试件进行了高温加热试验,根据试验现象及数据进行整理分析,得到以下结论:

1) 单掺 2% 的钢纤维不能抑制 UHPC 高温爆裂行为;单掺 2% 的聚丙烯纤维阻止了试件高温粉碎性爆裂;混掺 2% 聚丙烯纤维和 1% 钢纤维有效地抑制了 UHPC 的高温爆裂。

2) 随着温度的升高,UHPC 的质量损失不断增大,其中,200~400 °C 范围内质量损失最为严重。

3) 高温作用后,UHPC 立方体抗压强度随温度的升高呈现先上升后降低的规律;在目标温度超过 600 °C 时,高温增强了 UHPC 的延性。

4) 钢渣骨料混杂纤维 UHPC 具有优异的高温力学性能,其抗压强度随温度变化表现相对稳定。

参考文献:

[1] GAWIN D, MAJORANA C E, PESAVENTO F, et al. A new approach in the hygro-thermo-mechanical analysis of concrete at high temperature [C]//Eighth International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE-VIII), August 14-16, 2000, Stanford, California, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2000.

[2] SCHNEIDER U, DIEDERICHS U. Verhalten von ultrahochfesten betonen (UHPC) unter brandbeanspruchung [J]. Beton- Und Stahlbetonbau, 2003, 98(7): 408-417.

[3] MAJORANA C E, PESAVENTO F. Damage and spalling in HP and UHP concrete at high temperature [J]. WIT Transactions on Engineering Sciences, 2000, 26: 13.

[4] RATVIO J. Ultralujan betonin käyttösovellukset: esitutkimus [M]. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland, 2001.

[5] KHOURY G A, MAJORANA C E, PESAVENTO F, et al. Modelling of heated concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 2002, 54(2): 77-101.

[6] LIU C T, HUANG J S. Fire performance of highly flowable reactive powder concrete [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(5): 2072-2079.

[7] 李传习, 聂洁, 石家宽, 等. 纤维类型对混凝土抗压强度和弯曲韧性的增强效应及变异性的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(2): 147-158.

LI C X, NIE J, SHI J K, et al. Effect of fiber type on compressive strength and flexural toughness of concrete and analysis of variability [J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2019, 41(2): 147-158. (in Chinese)

[8] 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]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(7): 2416-2424.

[9] 杨少伟, 刘丽美, 王勇威, 等. 高温后钢纤维活性粉末混凝土 SHPB 试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(1): 25-29.

YANG S W, LIU L M, WANG Y W, et al. SHPB experiment of steel fiber reactive powder concrete exposed to high temperature [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(1): 25-29. (in Chinese)

[10] 刘红彬, 李康乐, 鞠杨, 等. 钢纤维活性粉末混凝土的高温爆裂试验研究[J]. 混凝土, 2010(8): 6-8.

LIU H B, LI K L, JU Y, et al. Explosive spalling of steel fiber reinforced reactive powder concrete subject to high temperature [J]. Concrete, 2010(8): 6-8. (in Chinese)

[11] 杨娟, 朋改非. 钢纤维类型对超高性能混凝土高温爆裂性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(6): 1599-1608.

- YANG J, PENG G F. Influence of different types of steel fiber on explosive spalling behavior of ultra-high-performance concrete exposed to high temperature [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(6): 1599-1608. (in Chinese)
- [12] CHOE G, KIM G, GUCUNSKI N, et al. Evaluation of the mechanical properties of 200 MPa ultra-high-strength concrete at elevated temperatures and residual strength of column [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 86: 159-168.
- [13] BEHNOOD A, GHANDEHARI M. Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures [J]. *Fire Safety Journal*, 2009, 44(8): 1015-1022.
- [14] SUN B, LIN Z X. Investigation on spalling resistance of ultra-high-strength concrete under rapid heating and rapid cooling [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2016, 4: 146-153.
- [15] 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.
- [16] POON C S, SHUI Z H, LAM L. Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(12): 2215-2222.
- [17] 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.
- [18] KIM Y S, OHMIYA Y, KANEMATSU M, et al. Effect of aggregate on residual mechanical properties of heated ultra-high-strength concrete [J]. *Materials and Structures*, 2016, 49(9): 3847-3859.
- [19] 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 G F, YANG J, SHI Y X. 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)
- [20] YANG Y K, 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.
- [21] Fire-resistance tests - Elements of building construction-Part 1: General requirements; ISO 834-1-1999 (E) [S]. Geveve: International Organization for Standardization, 1999.
- [22] KHALIQ W, KODUR V. Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures [J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(11): 1112-1122.
- [23] 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.
- [24] TSUCHIYA Y, SUMI K. Thermal decomposition products of polypropylene [J]. *Journal of Polymer Science Part A-1: Polymer Chemistry*, 1969, 7(7): 1599-1607.
- [25] RASHEEDUZZAFAR, AL-SAADOUN S S, AL-GAHTANI A S. Danish investigations on silica fume concretes at elevated temperatures [J]. *ACI Materials Journal*, 1992, 89(4): 345-347.
- [26] KALIFA P, MENNETEAU F D, QUENARD D. Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(12): 1915-1927.
- [27] 高丹盈, 李晗, 杨帆. 聚丙烯-钢纤维增强高强混凝土高温性能[J]. *复合材料学报*, 2013, 30(1): 187-193.
- GAO D Y, LI H, YANG F. Performance of polypropylene-steel hybrid fiber reinforced concrete after being exposed to high temperature [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2013, 30(1): 187-193. (in Chinese)
- [28] 张丽辉, 郭丽萍, 孙伟, 等. 生态型高延性水泥基复合材料的高温损伤[J]. *硅酸盐学报*, 2014, 42(8): 1018-1024.
- ZHANG L H, GUO L P, SUN W, et al. Damage of ecological high ductility cementitious composites after exposed to high temperature [J]. *Journal of the*

- Chinese Ceramic Society, 2014, 42(8): 1018-1024. (in Chinese)
- [29] 特列夫耐尔. 耐火材料显微结构文集[M]. 高振昕, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1980.
- TREFNER W. Collection of refractories microstructure [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1980. (in Chinese)
- [30] 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: 哈尔滨工业大学, 2012.
- LI H Y. Experimental study on spalling behaviour and mechanical properties of reactive powder concrete after elevated temperatures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [31] 李海艳, 王英, 解恒燕, 等. 高温后活性粉末混凝土微观结构分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(5): 71-75.
- LI H Y, WANG Y, XIE H Y, et al. Microstructure analysis of reactive powder concrete after exposed to high temperature [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(5): 71-75. (in Chinese)
- [32] XIONG M X, RICHARD LIEW J Y. Spalling behavior and residual resistance of fibre reinforced Ultra-High performance concrete after exposure to high temperatures [J]. Materiales De Construcción, 2015, 65(320): e071. DOI:10.3989/mc.2015.00715.
- [33] ZHENG W Z, LI H Y, WANG Y. Compressive behaviour of hybrid fiber-reinforced reactive powder concrete after high temperature [J]. Materials & Design, 2012, 41: 403-409.

(编辑 胡玲)