

文章编号:1007-9629(2021)01-0216-08

纤维增强超高强混凝土防高温爆裂研究

杜 咏, 严奥宇, 戚洪辉

(南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 211816)

摘要: 对 15 组立方体抗压强度为 116~143 MPa 纤维增强超高强混凝土(FRUHSC)试件,开展了 ISO834 火灾标准升温曲线下的高温爆裂试验,考察了水胶比、孔隙率、纤维类型及体积分数、试件尺寸对其高温爆裂的影响.结果表明:水胶比为 0.15 的超高强混凝土与水胶比为 0.18 时相比,具有更低孔隙率和更高强度,表现为爆裂程度更高;为改善常温下混凝土延性而掺入体积分数 1.00% 的熔抽超细型钢纤维并不能防止其高温爆裂;掺入体积分数 0.15% 的聚丙烯纤维可防止 $\phi 100 \times 200$ mm 试件高温爆裂,并适用于 $\phi 300 \times 300$ mm 试件.对水胶比为 0.15、混掺体积分数为 0.15% 聚丙烯纤维及 0.50% 熔抽超细型钢纤维的超高强混凝土型钢组合柱进行高温加载试验后发现,型钢外包混凝土未发生高温爆裂,表明所建议的混掺纤维体积分数在构件受荷时可防止高温爆裂.

关键词: 纤维增强超高强混凝土; 高温爆裂; 聚丙烯纤维; 钢纤维

中图分类号: TU528.31

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.01.028

Spalling Prevention of Fibre Reinforced Ultra-high Strength Concrete(FRUHSC) Subject to High Temperature

DU Yong, YAN Aoyu, QI Honghui

(College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: The explosive spalling behaviour of 15 groups of fibre reinforced ultra-high strength concrete (FRUHSC) specimens with cubic compressive strength of 116–143 MPa was investigated subject to ISO834 standard heating condition. The effect of water-binder ratio, porosity, fibre type, fibre content, and dimension of specimens on spalling was investigated. Test results show that the UHSC with water-binder ratio of 0.15 has lower porosity and higher strength than that with water-binder ratio of 0.18 and which is more likely to undergo spalling. The addition of 1.00% corrugated ultra-fine steel fibre in volume, which is intended for improving the ductility of concrete at room temperature, cannot prevent spalling. The spalling of both $\phi 100 \times 200$ mm specimens and $\phi 300 \times 300$ mm specimens can be prevented by the addition of 0.15% polypropylene fibre in volume. No spalling is observed when UHSC with water-binder ratio of 0.15 encased steel columns with 0.50% short steel fibre and 0.15% polypropylene fibre in volume are subject to loadings in fire condition. The fire tests reveal that the spalling of UHSC in the load-carrying element can be prevented as long as following the proposed addition of hybrid fibres.

Key words: fibre reinforced ultra-high strength concrete; spalling; polypropylene fibre; steel fibre

超高强混凝土(UHSC)具有抗压强度高、抗变形能力强、密度大、孔隙率低的特点,在建筑、桥梁、公路和军事设施等工程领域应用前景广泛^[1]. 火灾

在结构服役周期内是遭遇最为频发的灾害,超高强混凝土在火灾高温下也会出现爆裂现象.

已有研究表明,高温爆裂主要遵循蒸汽压力机

收稿日期:2019-08-15; 修订日期:2020-04-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(5167081607)

第一作者:杜 咏(1967—),女,重庆人,南京工业大学教授,硕士生导师,博士. E-mail:yongdu_mail@njtech.edu.cn

理和热应力机理^[2-4],混凝土强度^[5-11]、水胶比^[5-11]、孔隙率^[5]、含水率^[11]、骨料类型^[6,12-14]、升温速率^[14-15]、加载水平^[13,15-16]和试件尺寸^[17-19]等因素对混凝土高温爆裂的影响均有试验研究。

在 UHSC 中添加聚丙烯纤维是防止其高温爆裂较为有效的方法^[14,20],聚丙烯纤维的熔点较低,通常为 170 ℃.在高温下,聚丙烯纤维会熔化,因此蒸汽可以通过纤维熔化后留下的孔隙排出^[12],从而阻止 UHSC 的高温爆裂.欧洲规范 EN 1992-1-2:2004《Eurocode 2: Design of concrete structures-Part 1-2:General rules structural fire design》建议,掺入体积分数不少于 0.22% 的聚丙烯纤维可防止强度等级 105 MPa 及以下的混凝土高温爆裂;Xiong 等^[20]指出体积分数 0.10% 的聚丙烯纤维可有效防止 150 MPa 混凝土高温爆裂.另外,由于超高强混凝土在常温下表现出显著的脆性,通常掺入一定量的钢纤维来提高其常温下的延性^[21].而已有研究表明,钢纤维可延缓高强混凝土爆裂^[7].

在广州东塔工程中实现高层泵送 120 MPa 混凝土技术的工程实践表明,超高强混凝土在建筑结构中的应用是大势所趋.由于影响混凝土高温爆裂的因素较为复杂,至此,已有研究并未得出统一的防止超高强混凝土高温爆裂的措施,以指导工程应用.本文在已有研究基础上,首先开展了 15 组立方体抗压强度为 116~143 MPa 的纤维增强超高强混凝土(FRUHSC)试件在 ISO834 火灾标准升温曲线下的高温爆裂试验,考虑混凝土的水胶比、孔隙率和试件尺寸,提出能防止 UHSC 高温爆裂的混杂纤维掺量.然后,通过 14 根大尺寸混杂纤维增强 120 MPa 混凝土型钢组合柱的高温加载试验,进一步考察优化混杂纤维掺量对 120 MPa 混凝土结构构件防高温爆裂的有效性,为正确评价超高强混凝土型钢组合柱的高温承载能力,推进 120 MPa 混凝土在建筑结构中的应用提供参考.

1 试验方案

1.1 纤维增强超高强混凝土原料及配合比

胶凝材料选用 P·Ⅱ 52.5 硅酸盐水泥,920 U 型硅灰;细骨料为二区中砂;粗骨料由 5~10 mm 与 10~20 mm 这 2 种粒径的玄武岩碎石按质量比 4:6 混合;外加剂为聚羧酸高性能减水剂,固含量¹⁾为 20.3%;纤维采用熔抽超细型钢纤维(SF)和聚丙烯纤维(PPF),其性能指标见表 1.超高强混凝土水胶比 m_w/m_b 分别为 0.18 和 0.15(编号为 I、II),其余配合比见表 2.

表 1 纤维性能指标
Table 1 Properties of fibres

Fibre	Density/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Melting point/℃	Diameter/ μm	Length/ mm	Shape
PPF	920	170	18	16	Circular
SF	7 850	1 535	230	14	Circular

表 2 超高强混凝土配合比
Table 2 Mix proportion of ultra-high strength concrete kg/m^3

Series	Cement	Silica fume	Water	Sand	Coarse aggregate	Superplasticizer
I	810	90	162	588	882	18
II	821	91	137	593	890	18

1.2 试件制备

以超高强混凝土在 ISO834 火灾标准升温曲线(最严重建筑火灾升温条件)下历经 2 h,试件中心温度不超过 200 ℃为原则,设计混凝土试件尺寸.在升温过程中,既满足试件截面的温度非均匀(试件表面温度已超过 1 000 ℃),又可使试件全截面温度超过 100 ℃时逐步形成较大蒸汽压力;在试件全截面温度超过 170 ℃时,PP 纤维逐步融化,形成可缓解蒸汽压力的空隙.根据 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》的要求,按照表 2 中的配合比,掺入 PPF 和 SF(其体积分数分别用 φ_{PPF} 和 φ_{SF} 表示),配制 15 组试件,如表 3 所列,同时每组制备 3 块边长为 150 mm 的立方体试块用来测试其抗压强度 f_{cu} ,结果也列于表 3.

表 3 纤维增强超高强混凝土试件方案汇总
Table 3 Summary of FRUHSC specimen

Specimen	m_w/m_b	Dimension/mm	$\varphi_{\text{PPF}}/\%$	$\varphi_{\text{SF}}/\%$	f_{cu}/MPa
FRUHSC1	0.18	$\phi 300 \times 300$	0.10	0	116
FRUHSC2			0.22	0	118
FRUHSC3			0.15	0.15	122
FRUHSC4			0.15	0.30	128
FRUHSC5			0	0	117
FRUHSC6	0.15	$\phi 300 \times 300$	0.30	0.15	143
FRUHSC7			0.50	0.15	137
FRUHSC8			0.22	0	134
FRUHSC9			0	1.00	135
FRUHSC10			0.10	0	123
FRUHSC11			0.13	0	133
FRUHSC12			0.15	0	130
FRUHSC13		$\phi 100 \times 200$	0.10	0	123
FRUHSC14			0.13	0	133
FRUHSC15			0.15	0	130

1)文中涉及的固含量、水胶比等除特别说明外均为质量分数或质量比.

1.3 试验装置

燃气试验炉工作升温历程遵循 ISO834 火灾标准升温曲线,最高可达 1 250 °C. 为防止试件高温爆裂损坏炉内结构,试验过程中使用高温防爆保护网. 在试件的几何中心预埋热电偶,并使用多功能数据采集器测量超高强混凝土试件中心的升温历程.

1.4 纤维增强超高强混凝土试件的孔隙率

较低的孔隙率是超高强混凝土在高温下爆裂的主要因素之一^[18]. 根据 GB/T 21650.1—2008《压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度 第一部分:压汞法》,为了取样具有代表性,用切割机分别从水胶比 0.18 和 0.15 的未掺纤维 UHSC 试件中取若干大小约为 1 cm³ 的样品,采用压汞法,测试样品的孔隙率,定量评价纤维增强超高强混凝土的密实性.

2 高温爆裂试验

2.1 试件升温历程

试件中心升温历程如图 1 所示,实测炉温与预设 ISO834 火灾标准升温曲线基本重合,试件试验温度条件良好. 试件受火初期,其中心温度显著低于炉温. 试件 FRUHSC5 在点火后约 50 min 发出爆裂声响,其温度曲线在短时间内发生突变;其他部分爆裂试件的中心温度增长基本平稳. 除试件 FRUHSC5 外,其他试件受火 2 h 后,中心温度均为 200 °C 左右.

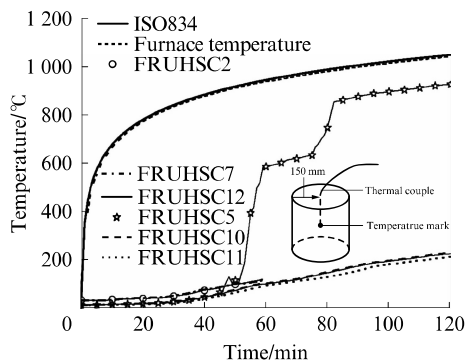


图1 试件中心升温曲线

Fig. 1 Temperature history in core of specimens

2.2 试验高温爆裂现象

试件经历 ISO834 火灾标准升温后外观如图 2 所示. 升温过程中发现,不同纤维体积分数的混凝土试块外观颜色随温度变化基本一致:经历 20~200 °C 后,为青灰色;经历 200~400 °C 后,由青灰色变为灰褐色;经历 400~800 °C 后,由灰褐色变为灰

白色. 由图 2 可见:未掺加纤维的试件 FRUHSC5 在经历 2 h 高温后,发生粉碎性爆裂,如图 2(e) 所示; $\varphi_{PPF}=0.10\%$ 、 $m_w/m_B=0.18$ 的试件 FRUHSC1 未出现剥落,仅上部出现环状裂纹,如图 2(a) 所示; $\varphi_{PPF}=0.10\%$ 、 $m_w/m_B=0.15$ 的试件 FRUHSC10,仍然发生高温爆裂,如图 2(j) 所示; $\varphi_{SF}=1.00\%$ 的试件 FRUHSC9 未发生粉碎性爆裂,高温爆裂现象有所缓解,如图 2(i) 所示; $\varphi_{PPF}=0.13\%$ 的试件 FRUHSC11、FRUHSC14 及 $\varphi_{PPF}=0.10\%$ 的试件 FRUHSC13 在高温下仍有部分爆裂剥落现象,但爆裂现象不如 FRUHSC10 明显,如图 2(k)、(m)、(n) 所示,说明掺加 PPF 后试件高温爆裂有所缓解,但试件表面出现爆裂脱落,仍然未有效防止高温爆裂;对于其余 $\varphi_{PPF} \geq 0.15\%$ 的试件,无论是否掺加钢纤维,其高温爆裂均得到有效抑制.

各试件详细的高温爆裂试验现象如表 4 所列,其中,爆裂深度为爆裂面到爆裂前试件表面的最大距离,爆裂面积比为爆裂面积与试件受火表面积百分比.

2.3 试件尺寸对爆裂的影响

根据表 4 所列爆裂程度指标,以及图 2(l) 和图 2(o) 所示的试件受火后外观, $\varphi_{PPF}=0.15\%$ 的 2 种尺寸试件 FRUHSC12($\phi 300 \times 300$ mm) 和 FRUHSC15($\phi 100 \times 200$ mm) 在高温下均未发生爆裂;而比较 $\phi 300 \times 300$ mm 试件 FRUHSC10、FRUHSC11 和 $\phi 100 \times 200$ mm 试件 FRUHSC13、FRUHSC14,发现当 $\varphi_{PPF}=0.10\%$ 、 0.13% 时,试件在高温下仍表现为部分爆裂. 试验现象表明,当试件尺寸从 $\phi 100 \times 200$ mm 增大到 $\phi 300 \times 300$ mm 时,只要 $\varphi_{PPF} \geq 0.15\%$,试件就可防高温爆裂.

2.4 孔隙率对爆裂的影响

$m_w/m_B=0.18$ 的试件 FRUHSC1 孔隙率为 4.25%,而 $m_w/m_B=0.15$ 的试件 FRUHSC10 孔隙率为 2.34%,两者的 φ_{PPF} 均为 0.10%,试件 FRUHSC10 在高温下发生部分爆裂,爆裂深度为 38 mm;而孔隙率较高的试件 FRUHSC1 在高温下其表面仅出现裂纹.

将本文试验值与文献[18,22]中数据对比可得:孔隙率大于 10% 为普通混凝土;孔隙率在 6%~10% 为强度低于 100 MPa 的高强混凝土;而当孔隙率小于 6% 时,混凝土强度达到 100 MPa 以上. 混凝土孔隙率越低,抗压强度越高. 本文 4.25% 孔隙率试件(FRUHSC1)的强度为 116 MPa,而 2.34% 孔隙率试件(FRUHSC10)的强度为 123 MPa. 因此,更高强度的超高强混凝土具有更小的孔隙率.

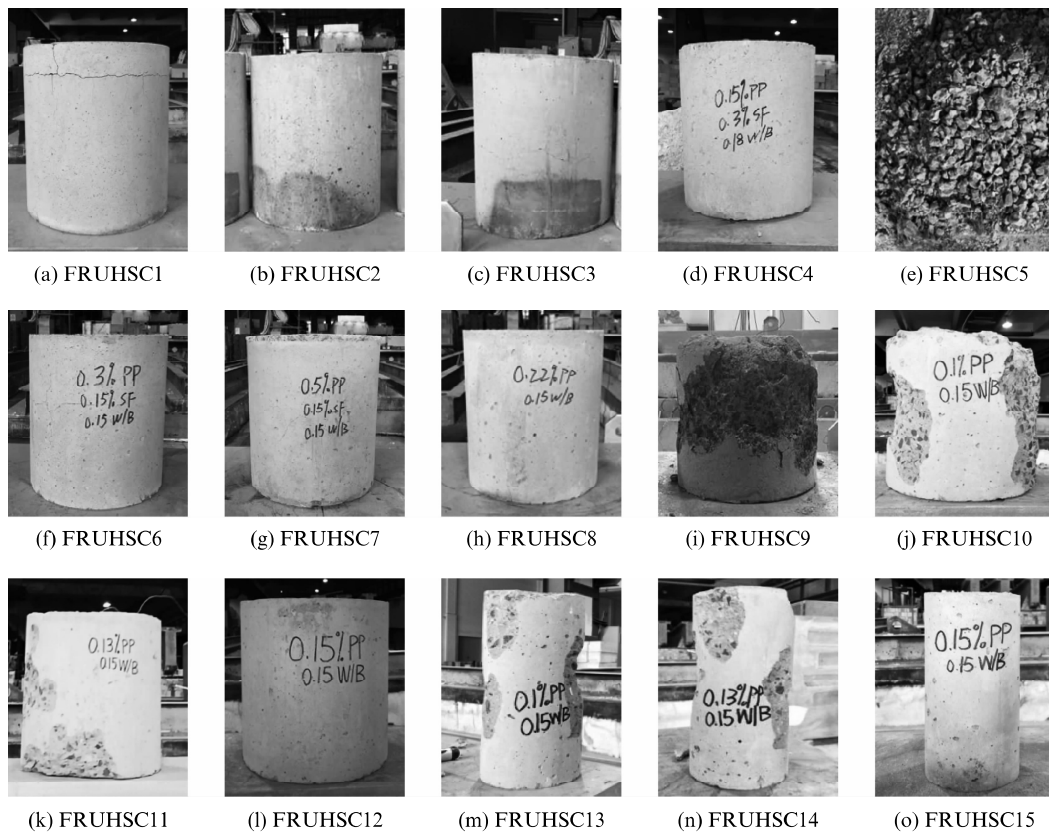


图 2 纤维增强超高强混凝土试件高温后外观
Fig. 2 Appearance of FRUHSC specimens subject to fire

表 4 纤维增强超高强混凝土试件高温爆裂试验现象汇总
Table 4 Summary of spalling tests on FRUHSC specimens subject to fire

Specimen	Spalling depth/mm	Spalling area ratio/%	Heating duration/h	Core temperature after heating/°C	Observation
FRUHSC1	0	0	2		No spalling, except crack
FRUHSC2	0	0	1	122	No spalling and crack
FRUHSC3	0	0	2		No spalling and crack
FRUHSC4	0	0	2		No spalling and crack
FRUHSC5	100	100	2		Fully spalling
FRUHSC6	0	0	1		No spalling and crack
FRUHSC7	0	0	1	118	No spalling and crack
FRUHSC8	0	0	1		No spalling and crack
FRUHSC9	47	63	2		Partial spalling
FRUHSC10	38	28	2	232	Partial spalling
FRUHSC11	24	9	2	215	Partial spalling
FRUHSC12	0	0	2	227	No spalling and crack
FRUHSC13	13	18	2		Partial spalling
FRUHSC14	6	14	2		Partial spalling
FRUHSC15	0	0	2		No spalling and crack

2.5 混杂纤维掺量对爆裂的影响

如图 2(e)所示,未掺加纤维的超高强混凝土试件 FRUHSC5 在高温下发生粉碎性爆裂;而单掺钢纤维且 $\varphi_{SF}=1.00\%$ 的试件 FRUHSC9 高温爆裂现象得到缓解,表现为部分爆裂. 这表明 $\varphi_{SF}=1.00\%$ 的钢纤维不能有效防止混凝土高温爆裂,仅可缓解其高温爆裂程度^[19],这主要得益于钢纤维所具有的优异导热性能,可以使热量在混凝土内部有效传递,从而减小由温度差所致热应力;同时,钢纤维可提高混凝土的抗拉强度,因此,掺加钢纤维可延缓混凝土的爆裂. 但是随着混凝土温度的升高,钢纤维对提高混凝土抗拉强度的贡献随着钢纤维变脆失效而衰退. 由图 2 可见,当 $\varphi_{PPF}\geq 0.15\%$ 时,可有效防止超

高强混凝土高温爆裂.

3 纤维增强超高强混凝土型钢组合柱防高温爆裂试验

3.1 组合柱试件制备

综合考虑混凝土的延性和工作性能,制备 $\varphi_{SF}=0.50\%$ 、 $m_w/m_B=0.15$ 、 $\varphi_{PPF}=0.15\%$ 的超高强混凝土试件 C120,按照 JGJT 283—2012《自密实混凝土应用技术规程》和 CCES02—2004《自密实混凝土设计与施工指南》中要求的测试方法,评估混凝土拌和物工作性能. 测试指标包括坍落扩展度(expansion)、流动时间(t_{500})、J 环通过指标(PA)、L 型仪间隙通过指标(H2/H1),测试结果见表 5.

表 5 C120 混凝土工作性能指标
Table 5 Results of working performance index of C120

Specimen	m_w/m_B	$\varphi_{SF}/\%$	$\varphi_{PPF}/\%$	Expansion/mm	t_{500}/s	PA/mm	H2/H1	Observation
C120	0.15	0.50	0.15	520	14	40	0.2	No segregation

采用已配置的 C120 混凝土、H 型钢、直径 12 mm 的纵向钢筋和直径 8 mm 的箍筋制备纤维增强超高强混凝土型钢组合柱(SRHSC),其设计详图

见图 3,受火构件汇总表见表 6. 分别浇筑了 1.4 m 长和 2.5 m 长的超高强混凝土型钢组合柱.

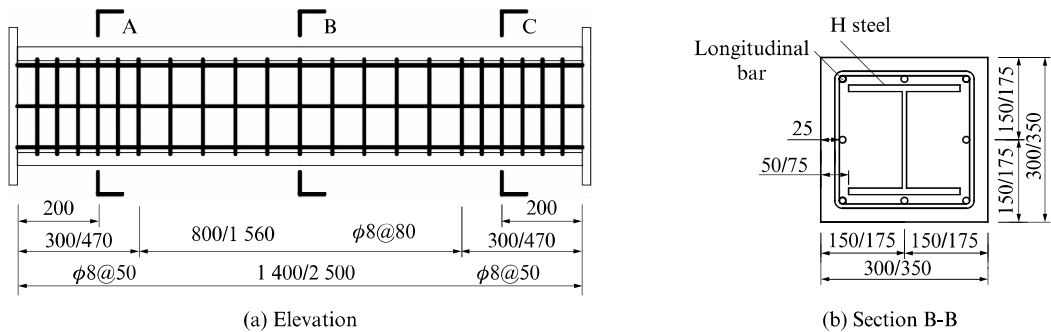


图 3 纤维增强超高强混凝土型钢组合柱设计详图
Fig. 3 Fibre reinforced ultra-high strength concrete encased steel columns design details(size:mm)

表 6 受火构件汇总表
Table 6 Summary of specimens subject to fire

Specimen	Cross section size/(mm×mm)	H steel dimension/mm	Test load/kN	Length/mm	Number of specimen
SRHSC1	300×300	200×200×8×12	2 199	1 400	2
SRHSC2	300×300	200×200×8×12	3 665	1 400	2
SRHSC3	300×300	200×200×8×12	5 131	1 400	2
SRHSC4	300×300	200×200×8×12	3 368	2 500	2
SRHSC5	300×300	200×200×8×12	4 716	2 500	2
SRHSC6	300×300	200×200×8×12	2 021	2 500	2
SRHSC7	350×350	200×200×8×12	4 364	2 500	1
SRHSC8	350×350	250×250×9×14	4 850	2 500	1

3.2 高温加载试验装置

不同长度试件分别采用了2种加载受火试验装置,如图4所示.高温试验炉遵循ISO834火灾标准升温曲线,加载采用1 000 t电液伺服加载系统,柱子四面受火,为了防止超高强混凝土爆裂而致炉体

损坏,在构件表面包裹不锈钢丝网.根据GB/T 9978.1—2008《建筑构件耐火试验方法》,当柱端轴向压缩变形速率达到 $3 \times L/1\,000$ mm/min时(L 为柱高),认为试件破坏,停止高温加载.

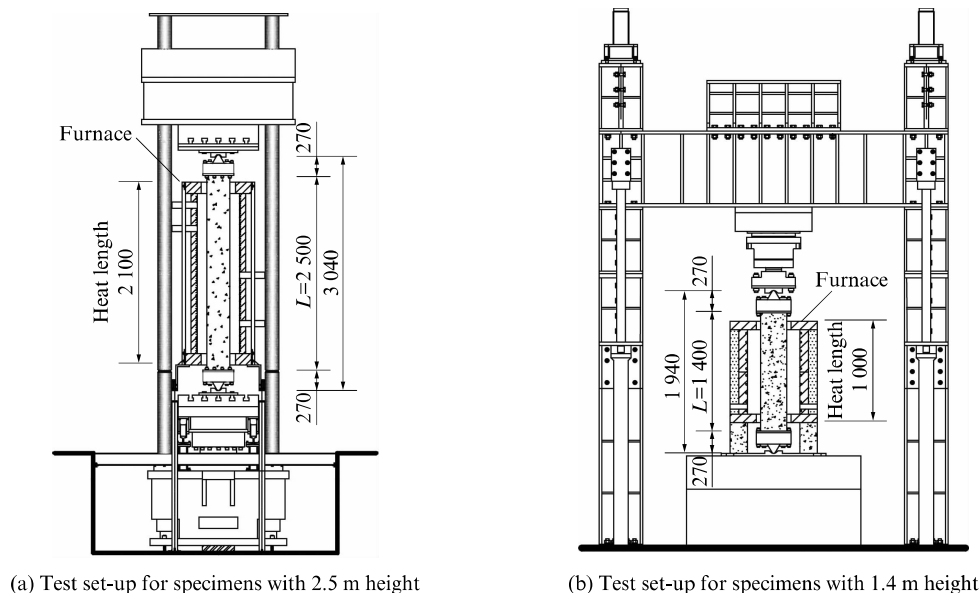


图4 试验装置图

Fig. 4 Test device diagram(size:mm)

3.3 高温加载试验现象

1.4 m 构件 SRHSC1 高温下柱端竖向变形速率达0.07 mm/s时则判定为发生破坏,其外观如图5所示.由图5可见,1.4 m 构件均表现为截面强度破坏,截面处混凝土由于达到其高温抗压强度而开裂剥落,构件其余部分混凝土未见强度破坏及高温爆裂现象.

2.5 m 构件 SRHSC5 高温下柱端竖向变形速

率达0.125 mm/s时则判定为发生破坏,其外观如图6所示.由图6可见,2.5 m 构件均表现为失稳破坏,构件表面出现典型的受拉侧横向裂缝及受压侧竖向裂缝,未观察到混凝土爆裂现象.

试验结果表明, $m_w/m_B = 0.15$, $\varphi_{PPF} = 0.15\%$ 、 $\varphi_{SF} = 0.50\%$ 的120 MPa混凝土用于构件中时,在常温下表现出合格的工作性能,在高温下表现出良好的抗高温爆裂性能.

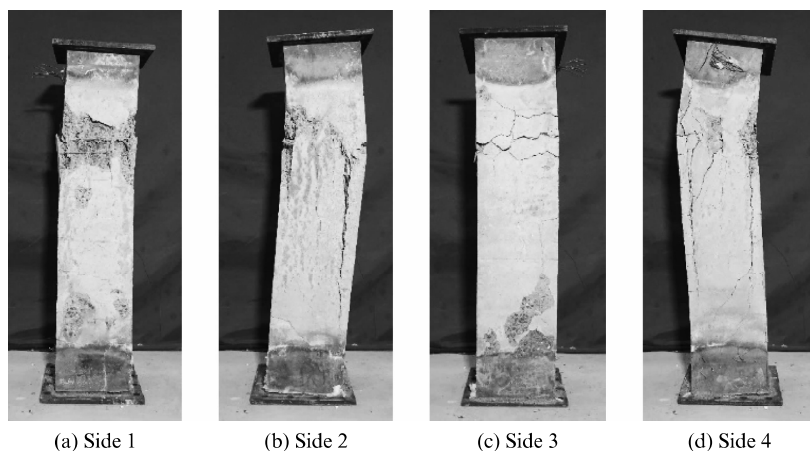


图5 1.4 m 构件 SRHSC1 高温后外观

Fig. 5 Surface of specimen SRHSC1 with 1.4 m length subject to fire

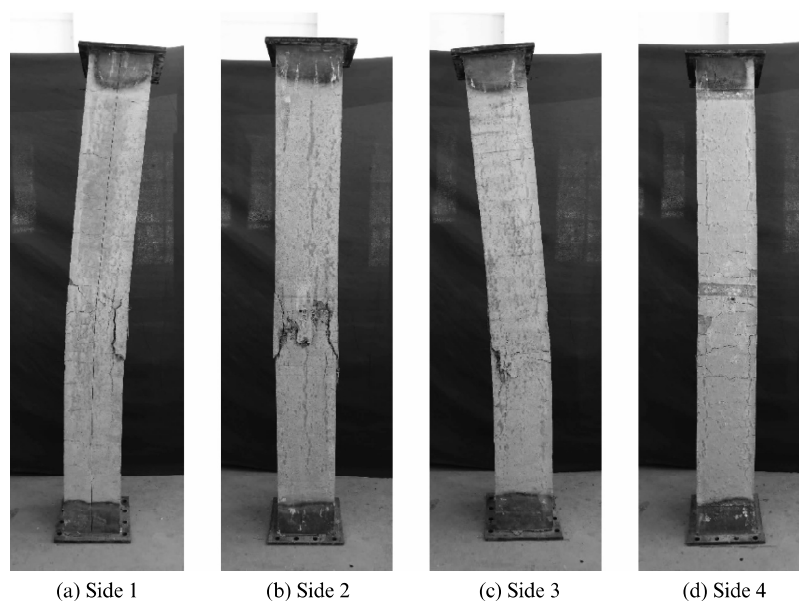


图6 2.5 m 构件 SRHSC5 高温后外观
Fig.6 Surface of specimen SRHSC5 with 2.5 m length subject to fire

4 结论

(1) 与水胶比为 0.18 的纤维增强超高强混凝土 FRUHSC 相比, 水胶比为 0.15 的 FRUHSC 具有更低的孔隙率, 当聚丙烯纤维体积分数小于 0.15% 时, 孔隙率较大的试件高温爆裂程度明显低于孔隙率较小的试件; 当聚丙烯纤维体积分数不小于 0.15% 时, 2 种水胶比试件均未发生高温爆裂现象。

(2) 体积分数为 0.15% 的聚丙烯纤维可防止 $\phi 100 \times 200$ mm 试件发生高温爆裂, 并适用于 $\phi 300 \times 300$ mm 试件。

(3) 对于 116~143 MPa 超高强混凝土, 为改善常温下混凝土延性而掺入体积分数为 1.00% 的熔抽超细型钢纤维并不能防止其高温爆裂, 掺入体积分数为 0.15% 及以上的聚丙烯纤维, 则可防止其高温爆裂, 因此, 混掺纤维能防止其高温爆裂。

(4) 超高强混凝土型钢组合柱高温加载试验表明, 混掺体积分数为 0.15% 的聚丙烯纤维及 0.50% 的熔抽超细型钢纤维可有效防止构件的高温爆裂。

参考文献:

- [1] PRIYAN P. Design of high-strength concrete members: State-of-the-art[J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2003, 5(1): 1-15.
- [2] KALIFA P, CHÉNÉ G, GALLÉ C. High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres: From spalling to microstructure[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(10): 1487-1499.

- [3] LIU X, YE G, DE SCHUTTER G, et al. On the mechanism of polypropylene fibres in preventing fire spalling in self-compacting and high-performance cement paste[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(4): 487-499.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] KODUR V K R, CHENG F P, WANG T C, et al. Effect of strength and fiber reinforcement on fire resistance of high-strength concrete columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(2): 253-259.
- [7] SIDERIS K K, MANITA P, CHANIOTAKIS E. Performance of thermally damaged fibre reinforced concretes[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(3): 1232-1239.
- [8] CÜLFİK M S, ÖZTURAN T. Mechanical properties of normal and high strength concretes subjected to high temperatures and using image analysis to detect bond deteriorations[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(8): 1486-1493.
- [9] BANGI M R, Horiguchi T. Effect of fibre type and geometry on maximum pore pressures in fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures[J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(2): 459-466.
- [10] MINDEGUIA J C, CARRÉ H, PIMIENTA P, et al. Experimental discussion on the mechanisms behind the fire spalling of concrete[J]. Fire and Materials, 2014, 39(7): 619-635.
- [11] PENG G F, YANG J. Residual mechanical properties and explosive spalling behavior of ultra-high-strength concrete exposed to high temperature[J]. Journal of Harbin Institute of

- Technology, 2017, 24(4):62-70.
- [12] HEO Y S, SANJAYAN J G, HAN C G, et al. Relationship between inter-aggregate spacing and the optimum fiber length for spalling protection of concrete in fire[J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(3):549-557.
- [13] LEE J H, SOHN Y S, LEE S H. Fire resistance of hybrid fibre-reinforced, ultra-high-strength concrete columns with compressive strength from 120 to 200 MPa[J]. Magazine of Concrete Research, 2012, 64(6):539-550.
- [14] 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.
- [15] ALI F A, O'CONNOR D, ABU-TAIR A. Explosive spalling of high-strength concrete columns in fire[J]. Magazine of Concrete Research, 2001, 53(3):197-204.
- [16] BOSTRÖM L, WICKSTRÖM U, ADL-ZARRABI B. Effect of specimen size and loading conditions on spalling of concrete[J]. Fire and Materials, 2007, 31(3):173-186.
- [17] AKCA A H, ZIHNIÖĞLU N O. High performance concrete under elevated temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2013, 44:317-328.
- [18] 罗百福. 高温下活性粉末混凝土爆裂规律及力学性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.
- LUO Baifu. Study on explosive spalling rules and mechanical properties of reactive powder concrete after elevated temperature[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [19] 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 Haiyan. Experimental study on spalling behaviour and mechanical properties of reactive powder concrete after elevated temperature[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [20] 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.
- [21] 孙成辉, 霍亮, 石云兴, 等. 钢纤维对 C100 超高强混凝土的脆性改善试验研究[J]. 混凝土, 2013(8):144-147.
- SUN Chenghui, HUO Liang, SHI Yunxing, et al. Study on the brittleness reducing of C100 ultra-high strength concrete by adding steel fibre[J]. Concrete, 2013(8):144-147. (in Chinese)
- [22] POON C S, AZHAR S, ANSON M, et al. Comparison of the strength and durability performance of normal- and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(9):1291-1300.