

低碳超高强石渣混凝土的抗火性能研究

陈国灿^{1,2}

(1. 中南大学防灾科学与安全技术研究所, 长沙 410075;

2. 莆田学院土木建筑工程学系, 福建 莆田 351100)

摘要:为了研究纤维类型、高温对超高强石渣混凝土抗火性能的影响,以温度、纤维类型为试验参数,进行了低碳超高强石渣混凝土的抗火性能试验。试验结果表明,超高强石渣混凝土、掺入钢纤维的超高强石渣混凝土的抗火性能均较差,400℃高温下爆裂;而掺入聚丙烯纤维的超高强石渣混凝土显示较好的抗爆裂性能;无论掺入纤维与否,高温后超高强石渣混凝土均显示出与普通混凝土、高强混凝土、高性能混凝土迥然不同的力学特性:温度低于360℃时,超高强石渣混凝土的抗压强度随温度的上升而增大,360℃时抗压强度达到常温时的1.47倍;掺钢纤维的超高强石渣混凝土的抗压强度在320℃之前随着温度的升高而增长,320℃时抗压强度达到常温时的1.33倍,之后呈现下降的趋势;而掺聚丙烯纤维的超高强石渣混凝土的抗压强度在400℃之前随温度的升高而略有提高,400℃时抗压强度为常温时的1.07倍,之后便随温度的升高而降低;最后分析了高温后超高强石渣混凝土抗压强度随温度变化的机理。

关键词:低碳超高性能石渣混凝土;高温性能;抗压强度;抗爆裂性能

中图分类号:TU528.31

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2010.11.010

0 引言

随着经济的飞速发展,我国火灾次数明显增加,火灾损失越来越大。据统计,从2000年1月至2009年2月,全国共发生火灾172.68万起,其中死亡19 843人,伤23 601人,直接经济损失达到90.163亿元^[1]。严峻的火灾形势已引起政府及社会各界的广泛关注。以人为本的防灾策略的实施,促使人们经常思索:如何预防建筑火灾的发生、减少建筑火灾的损失,防止建筑物火灾条件下出现局部倒塌甚至整体倒塌,从而避免诸如衡阳“11·3”火灾倒塌事故这一类的悲剧重演的问题。

混凝土抗火性能理论就是在这样的背景下受到广泛关注并得到了迅猛的发展^[2-3],迄今国内外的学者专家在普通混凝土和高强混凝土及构件的抗火性能等方面做了许多理论分析与试验研究工作,取得了富有成效的研究成果^[4-8],但超高强混凝土在火灾条件下的抗火性能研究则十分匮乏。

超高强混凝土具有比强度大、耐久性好、消耗的资源少等优点,受到了前所未有的关注^[8-11],已

被列入“十一五”国家科技支撑计划重点项目“现代建筑设计与施工关键技术研究”课题申请指南予以重点资助。然而,由于超高强混凝土的低渗透性,在高温下爆裂的风险更大,因此超高强混凝土高温下、高温后的抗火性能研究理应格外受到重视,但迄今还少有人问津^[11]。

低碳超高强石渣混凝土是作者以低至 $350\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的水泥消耗量自主研发的强度超过130 MPa的新型环境友好型混凝土,可有效地解决水泥用量大引发的混凝土自收缩偏大等技术难题。本文以温度、纤维类型为试验参数,研究低碳超高强石渣混凝土的抗火性能,揭示其高温后的力学性能随温度变化的规律,为进一步研究超高强石渣混凝土构件的抗火性能奠定基础。

1 试验原材料

a. 胶凝材料.采用福建紫金集团有限公司的“紫金”牌42.5 R普通硅酸盐水泥,28 d的抗压强度为43.6 MPa。

b. 掺合料.粉煤灰采用福建省漳州益材粉煤灰开发有限公司生产的I级粉煤灰;偏高岭土采用

收稿日期:2010-07-29

基金项目:福建省自然科学基金计划资助项目(基金项目编号:2007J0163);莆田市科技计划资助项目(2007G26);莆田学院资助项目(JG200721)

作者简介:陈国灿(1963-),男,福建仙游人,高工。研究方向:低碳超高强混凝土的研发与应用研究。

天津民营企业的产品;硅粉采用西宁联福工贸有限公司出品的微硅粉。

c. 纤维。聚丙烯纤维选用北京中纺纤建科技有限公司研发生产的专门用于砂浆、混凝土的“凯泰(CTA)”改性聚丙烯纤维;钢纤维采用江西省赣州大业金属纤维有限公司生产的浪形圆丝钢纤维。

d. 高效减水剂。采用福建建筑科学研究院外加剂厂生产的TW-PS聚羧酸高效减水剂,减水率约为25%。

e. 试验用水。使用经过混凝土磁化水增强器磁化后的自来水。

f. 骨料。粗骨料采用莆田本地的花岗岩碎石;

细骨料采用福建省莆田本地产花岗岩石渣,实测细度模数为3.5。

2 试验方法

试块的制作在福建省莆田学院土木工程试验中心完成,高温试验则在中南大学土木建筑学院火灾试验室进行。

2.1 试块的制作与养护

采用“硅酸盐水泥+活性矿物掺合料+高效减水剂”的技术路线,并采用磁化水混凝土技术,通过试验室试配,确定超高强石渣混凝土的配合比,见表1。

表1 低碳超高强石渣混凝土的配合比
Table 1 Mixture ratio of GSHSCUS

配合比	水泥:硅粉:偏高岭土:粉煤灰:石渣:碎石:减水剂	水胶比	聚丙烯纤维/(kg·m ⁻³)	钢纤维/(kg·m ⁻³)	水泥用量/(kg·m ⁻³)
A7	1: 0.167: 0.167: 0.333: 2.028: 3.056: 0.0694	0.235			350
C7	1: 0.167: 0.167: 0.333: 2.028: 3.056: 0.0694	0.22	0.9		350
ST7	1: 0.167: 0.167: 0.333: 2.028: 3.056: 0.0694	0.22		76	350

混凝土拌合物搅拌后,分三次装入100 mm×100 mm×100 mm的三联模内,并在ZHDG-80混凝土磁力振动台上振动成型。

试块成型后立即覆盖塑料薄膜;24 h后拆模,并用塑料袋包裹密封并置于实验室内绝湿养护。24 d后装箱托运到长沙进行抗火性能试验。

2.2 加热制度

超高强石渣混凝土试块利用中南大学火灾实验室的箱形电阻炉(型号为SX212212,如图1所示)进行升温,设计加热工况为150、250、400、550、700、850、960℃,不过实施过程中根据实际情况作了相应的调整。高温炉的升温曲线如图2所示,并与国际标准升温曲线比较。试块升温、恒温持续4 h后,关闭电源,敞开炉门,3 h后取出试块,在室内静置2 d,再进行力学性能测试。

2.3 加载制度

根据国家标准《普通混凝土力学性能试验方法》GB/T50081-2002,采用连续均匀地施加荷载,混凝土强度等级>C60时,加荷速度取0.8~1.0 MPa·s⁻¹。

3 试验结果分析

3.1 加热及冷却后的现象

混凝土试块由常温开始按8个温度等级加热

至960℃,物理状态逐渐发生变化,经受不同温度作用后的表观特征见表2及图3(a~j)所示。



图1 加热试验装置

Fig. 1 Fire-test-up

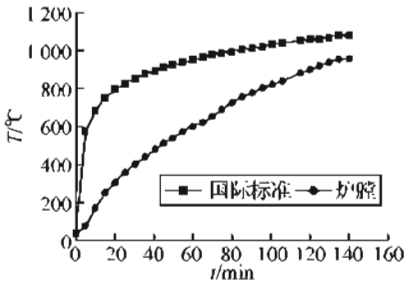


图2 升温曲线

Fig. 2 Temperature-time curve

表2 高温后试块的外观特征

Table 2 Phenomenal characteristics of specimens after fire

编号	配比	温度/℃	高温冷却后砼表面状况、颜色
F03 F04	A3	150	颜色几乎不变,表面字迹清晰,无裂缝、无缺角凹陷
F17 F18	C3	150	同上
F33 F34	Sr7	150	同上
F05 F06	A3	250	外观呈暗灰色,少量缺角、凹陷
F19 F20	C3	250	外观呈暗灰色,表面无裂、缝无缺角及凹陷
F35 F36	Sr7	250	外观呈暗灰色,表面无裂缝、无缺角及凹陷
F21 F22	C3	400	外表稍泛白,表面无裂缝,无缺角及凹陷
F07 F08	A3	400	粉碎性爆裂
F37 F38	Sr7	400	粉碎性爆裂
F23 F24	C3	550	外表呈灰色,表面有不规则的细裂缝,但不是十分明显,个别凹陷,表面字迹清晰
F25 F26	C3	700	外表呈灰白色,表面有较多可见的裂缝,表面字迹依稀可见,个别缺角
F27 F28	C3	850	外表呈暗红色,少量凹陷、缺角、表面字迹消失
F29 F30	C3	960	外表呈红色,缺角,表面龟裂,有几条较宽的裂缝

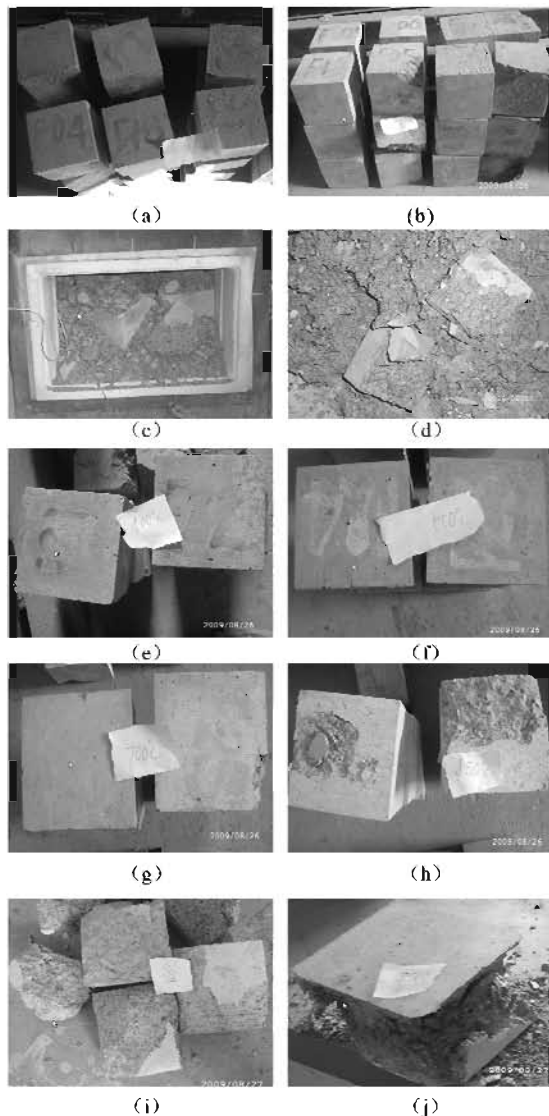


图3 超高强石渣混凝土高温后的破坏模式

Fig.3 Failure mode of GCHSCUS after fire

a. 超高强石渣混凝土的现象与分析. 试验现象观察表明,超高强石渣混凝土试块经受 250 ℃ 高温后出现缺角、凹陷(如图 3(b)中的 F05),当温度接近 400 ℃ 时,从炉内传出试块爆裂的响声,试

块发生粉碎性爆裂(如图 3(c)).

究其原因,是因为超高强石渣混凝土的渗透性能比较差,在升温过程中水蒸汽的逸出严重受阻,引起蒸汽压急剧升高,当蒸汽压力产生的混凝土应变叠加上由温度差产生的应变超过其极限拉应变时,就会造成混凝土表面剥落或爆裂,因此超高强石渣混凝土高温下的抗爆裂性能比较差.

b. 掺钢纤维的超高强石渣混凝土的现象与分析. 掺钢纤维的超高强石渣混凝土试块经过 250 ℃ 的高温作用后未出现缺角、凹陷现象(如图 3(b)中的 F36 等),但在 400 ℃ 的高温下仍发生粉碎性破坏,高温爆裂后产生的混凝土碎块的大小、形状各异,断面处石子、钢纤维、水泥石清晰可见,图 3(d).

究其原因,是因为钢纤维的热传导系数较大,在温度急剧变化的过程中,钢纤维的掺入在一定程度上可以降低混凝土内的温度梯度及由此产生的温度应力,减轻内部损伤. 因此,与超高强石渣混凝土相比,掺入钢纤维的超高强石渣混凝土的抗爆裂性能稍好.

但是,由于掺钢纤维的超高强石渣混凝土的低渗透性,在加热过程中产生的水蒸汽缺乏快速逸出的通道,在 400 ℃ 左右的高温下,蒸汽压力在混凝土内产生的拉应变超过其极限拉应变时,混凝土发生爆裂. 因此,在超高强石渣混凝土中掺入钢纤维不能显著地改善超高强石渣混凝土高温下的抗爆裂性能.

c. 掺聚丙烯纤维的超高强石渣混凝土的现象与分析.

①试验现象. 掺聚丙烯纤维的超高强石渣混凝土当加热至 380 ℃ 时炉内开始冒出蒸汽,加热至 420 ℃ 时传出第一声响,450 ℃ 时逸出刺激性汽味;至 470 ℃ 时冒出的水蒸汽逐渐增加,同时炉

内传出的声响也逐渐增多,至 560 ℃ 左右时有大量的水蒸汽逸出,至 680 ℃ 之后逸出的水蒸汽逐渐减少,至 710 ℃ 左右时基本停止,至 730 ℃ 左右时传出最后一声响,随即冒出蒸汽。

掺入聚丙烯纤维的超高强石渣混凝土经过高温作用 4 h 后的表现特征见表 2 和图 3(e~i)。

②与普通混凝土高温后的破坏形态比较。据文献报道^[2],普通混凝土经受 800 ℃ 以上的高温后,在试验结束时试块已经破碎,或者从炉内取出时已经破碎,难于成形^[2];而掺聚丙烯纤维的超高强石渣混凝土试块在经受 850 ℃ 高温作用 4 h 后受压破坏的形态与普通混凝土高温后的破坏形态截然不同:上下端面受到承压板的约束,基本上无破坏症状,而侧面的混凝土虽破裂,脱落,但基本上还是成比较完整的正倒角锥状(见图 3(j))。

③与钢管组合后的抗爆裂性能。内置不同类型混凝土的钢管混凝土柱高温后的破坏形态对比见图 4。

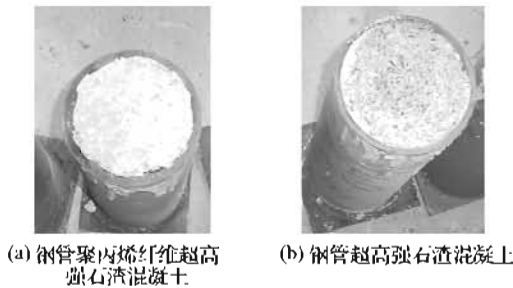


图 4 钢管超高强石渣混凝土短柱高温后的破坏模式
Fig. 4 Failure modes of GSHSCUS filled with steel tubes short columns

观察表明,钢管超高强石渣混凝土经过 800 ℃ 高温作用 4 h 后,裸露的混凝土表面受火爆裂,凹陷深度约 35 mm(见图 4(b));而钢管聚丙烯纤维超高强石渣混凝土柱经受相同的高温作用 4 h 后,裸露的混凝土表面只出现屈指可数的宏观裂纹,爆裂现象得到有效的抑制,显示出较好的抗爆裂性能(见图 4(a))。

综上所述,在超高强石渣混凝土中掺入聚丙烯纤维后可以显著地改善其抗爆裂性能,其抗火性能优于普通混凝土的抗火性能。

④聚丙烯纤维超高强石渣混凝土抗爆裂机理分析。在超高强石渣混凝土中掺入聚丙烯纤维后,之所以能改善超高强石渣混凝土的抗爆裂性能,是因为聚丙烯纤维的熔点低,在高温下,无数的聚丙烯纤维熔化挥发后在混凝土内部形成三向随机分布的小孔隙,为高压蒸汽的外逸提供通道,这大大降低了内部的蒸汽压力,从而防止超高强石渣

混凝土爆裂的发生。

3.2 高温后超高强石渣混凝土的力学性能

高温后超高强石渣混凝土、掺聚丙烯纤维的超高强石渣混凝土、掺钢纤维的超高强石渣混凝土的力学性能试验结果见表 3,其高温后相对抗压强度与温度的关系见图 5。

一般情况下,普通混凝土、高强混凝土和高性能混凝土受火后抗压强度随温度的升高而衰减^[2],从表 3 和图 5 中不难得出如下结论,超高强石渣混凝土高温后具有迥然不同于普通混凝土、高强混凝土和高性能混凝土的力学特性。

表 3 试验结果一览表

Table 3 Experiment results

编 号	温度/℃	f_{cu}^R/MPa
超高强石渣混凝土		
F01 F02	室温	106.9
F03 F04	150	112.1
F05 F06	250	116.3
F10	280	142.2
F12	320	147.8
F14	360	157.6
F07 F08	400	粉碎性爆裂
掺聚丙烯纤维的超高强石渣混凝土		
F31 F32	室温	129.5
F17 F18	150	130.1
F19 F20	250	132.2
F21 F22	400	138.1
F24	550	126.5
F26	700	96.0
F28	850	35.6
F29	960	15.7
掺钢纤维的超高强石渣混凝土		
F47 F48	室温	138.1
F33 F34	150	140.6
F35 F36	250	150.9
F39 F40	280	166.1
F41	320	184.3
F44	360	149.8

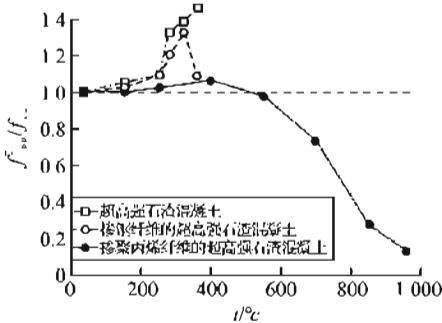


图 5 高温后超高强石渣混凝土相对抗压强度与温度的关系

Fig. 5 Relative compressive strength of GSHSCUS after fire

a. 超高强石渣混凝土受高温作用后,由于石子与水泥石的膨胀系数不同,温度变形差随着温

度的升高不断增大,在界面上形成裂缝并不断扩展^[2],混凝土的抗压能力逐渐被削弱;另一方面,由于超高强石渣混凝土中矿物掺合料所占的比例较大(约为胶凝材料总量40%),在高温、高压环境中矿物掺合料的活性得到了有效的激发,火山灰反应加速进行,游离的二氧化钙数量进一步减少,低碱性的水化硅酸钙数量进一步提高,水泥石与粗骨料之间的界面结构得以进一步的改善,混凝土材料抵抗破坏的能力不断增强,彼消此长,在混凝土爆裂之前,增强效应大于被削弱的效应,因此,高温后超高强石渣混凝土的抗压强度总体上呈现增长的趋势:

①温度在250℃之前,抗压强度增长缓慢,150、250℃时的强度分别是常温时的1.05、1.09倍;②温度在250℃至280℃之间时增幅较大,280℃时达到常温时的1.33倍;③温度在280℃至360℃增幅减小,320、360℃时分别是常温时的1.38倍、1.47倍。

b. 在超高强石渣混凝土中掺入钢纤维后,由于钢纤维的影响,及高温环境中活性矿物掺料的增强效应与高温下混凝土材料的损伤效应的叠加,导致抗压强度随温度变化的规律与超高强石渣混凝土的有所差别:

①在温度达到250℃之前,抗压强度的变化规律与超高强石渣混凝土的基本相似;②温度升至250℃至320℃之间时混凝土抗压强度的增幅加大,250℃时是常温时的1.09倍,280℃时达到常温时的1.20倍,320℃时增至常温时的1.33倍;③温度从320℃升至360℃时,强度有所下降,但360℃时仍比常温下的抗压强度高出8.4%;

c. 掺入聚丙烯纤维的超高强石渣混凝土在升温过程中,由于蒸汽的外逸通道基本通畅,内部的蒸汽压力不高,在高温低压的环境中混凝土掺合料的活性得到有限度的激发,材料抵抗破坏的能力略有增强,与高温下混凝土材料的损伤效应的叠加,导致其抗压强度随温度变化的规律显示其自身的特点:

①温度低于400℃时,掺聚丙烯纤维的超高强石渣混凝土的抗压强度缓慢增长,250℃时仅比常温下的抗压强度高出2.0%;在400℃时达到峰值,仅为常温时的1.07倍。

②在同样高的温度下,掺聚丙烯纤维的超高强石渣混凝土的抗压强度增长幅度小于超高强石渣混凝土的。

③超过400℃之后,由于水泥的水化物氢氧

化钙等脱水,体积膨胀^[2],材料抵抗破坏的能力被进一步削弱,造成混凝土强度下降的幅度大于因矿物掺合料在高温低压的环境引起的混凝土强度提高的幅度,因此,温度升至400℃后,混凝土的抗压强度总体上呈现随着温度的升高而降低的趋势,至550℃时,抗压强度为常温时的97.7%。

④温度达到700℃之后,随着温度的升高,混凝土界面上的裂缝进一步扩展,内部的损伤不断累积,材料抵抗破坏的能力急剧下降,因此,混凝土的抗压强度随着温度的升高而迅速下降,至700℃时为常温时的74.1%,至850℃仅为常温时的27.5%,至960℃时只有常温下的12.1%。

4 结 语

通过低碳超高强石渣混凝土的抗火性能试验,可以得出如下结论:

a. 纤维类型对超高强石渣混凝土的抗爆裂性能有着显著的影响:①未掺入任何纤维的超高强石渣混凝土的抗火性能极差;②钢纤维的掺入不能从根本上改善超高强石渣混凝土的抗爆裂性能;③将低熔点的聚丙烯纤维掺入超高强石渣混凝土后,可以显著地改善其抗爆裂性能,显示出优于普通混凝土、高强混凝土、高性能混凝土的抗火性能。

b. 超高强石渣混凝土中由于掺入比普通混凝土、高强混凝土、高性能混凝土多的活性矿物掺合料,在高温的环境中这些活性掺合料的活性得以激发,材料抵抗破坏的能力比它们的高,因此高温后超高强石渣混凝土显示出与普通混凝土、高强混凝土、高性能混凝土迥然不同的特性:①素超高强石渣混凝土试块在发生粉碎性破坏之前,抗压强度随温度的升高而增大,360℃时强度达到157.6 MPa,是常温时的1.47倍;②钢纤维超高强石渣混凝土在温度低于320℃时,抗压强度呈上升趋势,320℃时达到最大值184.3 MPa,是常温下的1.33倍;之后强度有所下降,但360℃时仍比常温下的抗压强度高出8.4%;③聚丙烯纤维超高强石渣混凝土的抗压强度在400℃之前;随温度的升高缓慢增长,在400℃时达到峰值,为常温时的1.07倍。之后便随温度的升高而降低。

致谢

本文是在中南大学土建学院博士生导师徐志胜教授的指导下完成的,杨智硕博士生、莆田学院的杨挺、陈炳鑫、陈楠、童远超等同学参与了试件的制作;此外,学报编辑和审稿专家也提出了中肯

的修改意见,在此谨致以诚挚的谢意.

参考文献:

- [1] 鲍鲭. 45 场建筑特大火灾排行榜[J]. 中华民居, 2009(6):80-87.
- [2] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土的高温性能极其计算[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [3] 李友群,苏健波. 高强混凝土的抗火灾高温性能研究概述[J]. 混凝土,2009(2):24-26.
- [4] 刘红彬,李康乐,鞠杨,等. 高强高性能混凝土的高温力学性能和爆裂机理研究[J]. 混凝土,2009(7):11-14.
- [5] 赵罕,高丹盈,王邦. 高温后钢纤维高强混凝土力学性能试验研究[J]. 混凝土,2006(11):4-6.
- [6] PHAN L T. Pore pressure and explosive spalling in concrete[J]. Materials and Structures,2008(41):1623

-1632.

- [7] 吴波,袁杰,王光远. 高温后高强混凝土力学性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2000,33(2):8-12.
- [8] SIDERIS K K,MANITA P,PAPAGEORGIOU A,et al. Mechanical characteristic of High Performance Fiber reinforced concretes at elevated temperatures[R]. ACI Special Publication,2006:212-60,973-988.
- [9] 陈国灿,徐志胜. 预制钢管超高强石渣混凝土叠合柱的轴压性能研究[J]. 厦门大学学报:自然科学版,2010(6):819-825.
- [10] 陈国灿. 低碳超高强石渣混凝土的力学性能试验研究[J]. 佳木斯大学学报:自然科学版,2010(5):693-697.
- [11] 李丽娟,谢伟锋,刘锋,等. 100 MPa 高强混凝土高温后性能研究[J]. 建筑材料学报,2008,11(1):100-104.

Experimental studies on the fire behavior of green super high strength concrete used stone-chip at elevated temperature

CHEN Guo-can^{1,2}

(1. Disaster Prevention Science and Safety Technology Institute, Central-South University, Changsha 410075, China;

2. Civil Engineering Department of Putian University, Putian,351100, China)

Abstract: In order to study the influence of temperature and fiber type on the fire behavior of green super high strength concrete used stone-chip (abbreviated to GSHSCUS) at elevated temperature, a series of experiments on the fire behavior of GSHSCUS with the two different parameters including temperature and fiber type were carried out in the laboratory. Experimental results show that, GSHSCUS has a weak refractory performance as well as GSHSCUS mixed with the steel fiber, with about 400 °C of cracking temperature, and that GSHSCUS mixed with polypropylene fiber exhibits excellent resistance to high temperature, and that after the high temperature all of them show distinguished characteristic different from that of ordinary concrete. HSC or HPC, namely the strength of GSHSCUS increases with the elevated temperature under 360 °C at which strength is as high as 1.47 times of that at room temperature, and that of GSHSCUS mixed with the steel fiber also appears the same trend by 320 °C at which strength is 1.33 times of that at room temperature, then on the decrease, and GSHSCUS mixed with the polypropylene fiber show slowing growth of strength by 400 °C at which strength is 1.07 times of that at room temperature, then keeps declining. The mechanism of the strength changing with elevated temperature is also analyzed.

Key words: green super high strength concrete used stone-chip (abbreviated to GSHSCUS); properties at elevated temperature; elevated temperature; spalling resistance

本文编辑:龚晓宁