

掺聚丙烯纤维的高强混凝土高温性能研究

游有鲲^{1,2}, 钱春香¹, 缪昌文²

(1. 东南大学, 南京 210096; 2. 江苏省建筑科学研究所, 南京 210008)

摘要: 高强混凝土的渗透性很低, 高温下可能出现爆裂破坏现象, 严重影响混凝土及其内部钢筋的结构使用性能。本文通过改变聚丙烯纤维掺量, 研究其改善高强混凝土高温爆裂性能, 以及高温后高强混凝土吸水率、剩余强度性能及其恢复性能。

关键词: 高强混凝土; 高温; 爆裂; 聚丙烯纤维

中图分类号: X931 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-1556(2004)01-0063-04

0 引言

建筑火灾是工程安全研究内容的一个重要方面, 各种突发事件导致的建筑工程的火灾严重地危害人们的生命及财产安全。“911”事件中钢结构高温下承载能力较差是导致世贸大厦迅速倒塌的一个原因。随着越来越多的高强混凝土(HSC)开始在高层与超高层建筑中的使用, 火灾下混凝土结构的使用性能值得认真研究。

HPC 是一种低渗透性、低孔隙率、含水量小的脆性材料。研究发现, HPC 的耐火性能与普通混凝土相似, 但不同的是其特别低的渗透性, 当加热到 250 °C 以上时, HSC 内部水化浆体失水的水分蒸发形成很大的内部蒸汽压, 往往会发生爆裂, 导致混凝土表面保护层的爆裂性破坏^[1]。这种突然的爆裂将使混凝土钢筋构件的保护层部分或完全失去, 从而使钢筋直接暴露在高温下, 由于钢筋在 300 °C 左右就会软化, 再加上截面的缩小, 构件的承载力将急剧降低, 这种情况将极大地降低混凝土结构的安全性。

自 HSC 的爆裂现象被人们认识以来^[2,3], 很多研究者想改善这种性能缺陷。根据 Kalifa 等人的研究^[4], 当在 HSC 中掺入一定量的有机纤维特别是聚丙烯(PP)纤维后, PP 纤维能够大大降低混凝土高温时的孔压力, 减小混凝土爆裂的机会。

本文采用南京本地材料配制的 C80 高强混凝土, 并对其高温性能进行了研究。研究内容涉及掺入不同掺量聚丙烯纤维对高强混凝土抗爆裂性能的

影响, 以及不同高温前后混凝土试件吸水率、力学性能的变化, 并对高温后掺入聚丙烯纤维未爆裂的 HSC 试件进行了再养护, 对其剩余强度的恢复性能进行了部分探讨。

1 试验原材料、设备及试件制作

1.1 原材料

水泥(金宁羊 42.5PⅡ 普通硅酸盐水泥, 比表面积 310m²/kg); 粉煤灰(南京华能电厂一级灰); 砂(中砂, 密度 2.65g/cm³, 细度模数为 2.7); 粗骨料(南京六合玄武岩, 粒径 $D_{max} = 10\text{mm}$, 水洗表干); 外加剂(Migth100, 蔡系, 上海花王公司生产, 粉剂); 单丝聚丙烯纤维(长度 19mm, 平均直径 45 μm , 江苏丹阳产丹强丝)。

1.2 高温制度与试件制作

试验采用参照《建筑构件耐火试验方法》(GB/T9978-1999)规定而设计的高温燃油炉对 HSC 试件受火恒温, 炉膛温度由铂铑—铂热电偶测定。燃油炉点火后自动升温到试验设定温度并恒温规定时间, 测试表明, 采用的燃油炉升温曲线接近 ISO834 推荐的标准升温曲线, 温度(T)和时间(t)的关系为:

$$T(t) = 345 \lg(8t/60 + 1) + 20 \quad (1)$$

高强混凝土配合比中胶凝材料总掺量 600kg/m³, 其中粉煤灰等量取代水泥 20%, 水胶比 0.25, 采用 Migth100 高效减水剂, 掺量为胶凝材料总量的 0.8%, PP 纤维掺量按照掺量从 0kg/m³、0.58kg/m³、0.88kg/m³、1.18kg/m³ 变化, 并分别标记为

收稿日期: 2003-11-25

基金项目: 江苏省自然科学基金(项目号 BK99016), 教育部骨干教师资助计划和国家自然科学基金(编号 59938170)。

作者简介: 游有鲲(1969—), 男, 江苏省建筑科学研究所工程师, 从事建筑材料研究。

V0P1、V1P1、V2P1 与 V3P1。每组试件数量为 12 块。

试件于标准养护室养护 28 天后取出,晾干试件表面水分,放入室内一段时间,保持试件湿含量在 4.0%~5.0%,然后放入高温燃油炉中,按照标准升温曲线分别升温到 200 °C、400 °C、600 °C 以及 800 °C 并恒温 1h,自然炉冷降温。试件取出后观察记录其外观,并测量爆裂面积大小。随后对未爆裂试件测试高温后试件抗压、抗折强度,同时预留一部分未爆裂试件用于养护研究。试验中对有爆裂现象的试件,在某一特定温度下试件的爆裂程度以表达式(2)作为评价爆裂程度的一种量的指标^[6]:

爆裂程度 = 平均爆裂面积率 × 爆裂的比率 (2)

其中爆裂面积率是这样得到的:将试件受火面划分为一定数量的格子,如图 1 所示。

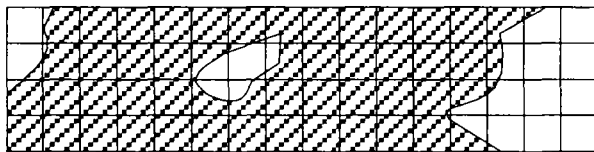


图 1 爆裂面积划分示意图

(阴影部分为爆裂面积)

Fig. 1 Spalling area partition hint

(Shadow part marked as spalling area)

在爆裂的边缘,可以将曲线近似为直线,每个格子的爆裂面积按近似规则图形测量并计算爆裂面积,将各单位格子的爆裂面积相加,该面积比上整个受热面面积为试件整体的爆裂面积率。爆裂的比率就是同一批试件中爆裂数与整体数量之比。

2 结果分析

2.1 试件爆裂形态与外观

影响高强混凝土爆裂温度的因素很多,主要与混凝土的配合比、试件的湿含量等相关。在本研究试验中,在 200 °C 下 HSC 试件几乎没有出现爆裂现象,在 400 °C 以及更高温度作用后,高强混凝土试件表面出现了数量不同的细微裂纹,混凝土试件爆裂温度大多都发生在 600 °C 附近,这与通常报道的爆裂温度区间接近。典型的试件高温破坏形态有爆裂、大的贯穿性裂纹等,出现爆裂试件的情况统计见表 1。

改变聚丙烯纤维掺量,高强混凝土试件的爆裂度出现了变化。聚丙烯纤维掺量提高,爆裂度降低,这与通常的报道相符合^[6,7]。当聚丙烯纤维掺量达 1.18% 以上时,在 600 °C 高温作用 1h 后,高强混凝土的爆裂几率由 83% 降低到 17%,爆裂度由 3.65% 降低到 0.07%。

表 1 高强混凝土试件高温后破坏形态

Table 1 HSC specimen destroyed configuration after elevated temperatures

编号	纤维掺量 /kg · m ⁻³	不同高温后爆裂试件数量			600 °C 下试件爆裂比率 / %	平均爆裂面积率 / %	爆裂度 / %	爆裂形态
		400 °C	600 °C	800 °C				
V0 P1	0	3	10	7	83	4.4	3.65	爆裂断面
V1 P1	0.58	2	9	6	75	2.1	1.58	爆裂断面角及棱边
V2 P1	0.88	/	5	2	42	1.5	0.63	爆裂断面角
V3 P1	1.18	/	2	/	17	0.4	0.07	爆裂断面角

2.2 高温后混凝土的吸水率

高温后无宏观爆裂现象的试件,试件内部与表面都出现了许多细微裂纹,干燥混凝土试件的重量也发生了变化,这种重量变化表征混凝土内部胶凝材料浆体的热分解量,这种分解通常包含胶凝材料浆体的自由水、化学结合水的失去、碳酸盐的分解等物质成分的改变。这种分解过程同时也是胶凝浆体材料形态的变化,包括胶凝浆体材料毛细孔的粗化、收缩变形以及水化凝胶体晶体的转型,以及镶嵌于无定形凝胶水化物中的位置变化等。这些变化将导致混凝土力学性能、抗渗性能的劣化。高温后混凝土孔隙率增加得越大,混凝土的抗渗耐久性性能越差。

高温后混凝土试件重量变化幅度越大,通常情况下试件的力学性能与抗渗性能的劣化程度越高。

本文取不同温度作用后未爆裂高强混凝土试件,测量其干燥重量,再将其置于水中 24h,测量其饱水重量,两者差值表征高温后高强混凝土试件孔隙率变化幅度,不同温度前后试件的干湿重量之差值见图 2。

可见,高温后混凝土的干湿重量变化率(吸水率)随温度升高逐渐增大,但在 200 °C 下混凝土的吸水率要高于 400 °C 下的吸水率,略有反常。在 200 °C 的温度点下,浆体内部的氢氧化钙晶体并没有发生分解,但浆体内部大部分自由水与部分结合水会

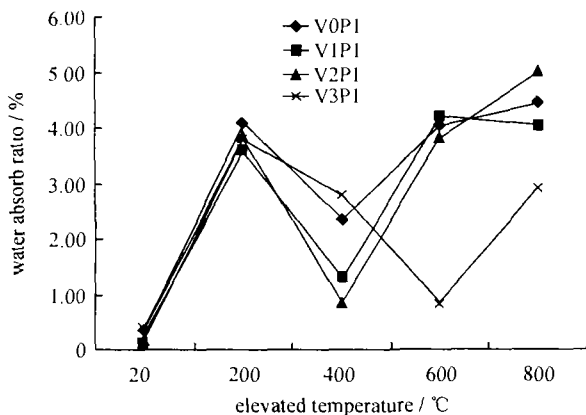


图 2 高强混凝土不同温度后吸水率

Fig. 2 HSC water absorbing ration at different elevated temperatures

大量失去,导致混凝土的孔隙率增大;在 400 °C 热作用下,胶凝材料浆体内氢氧化钙发生部分分解与晶型转变,引起混凝土的收缩,空间距离缩短,导致混凝土结构的密实和化学键的加强;此外,部分无定形水化硅酸钙等晶体脱水后凝胶体之间热缩后形成新的胶结作用,密实度提高,堵隔了部分凝胶体中连通的毛细孔道,这样反而导致 400 °C 下混凝土试件的吸水率低于 200 °C 下混凝土试件的吸水率的现象,此外 200 °C 下混凝土骨料发生的温度膨胀率与浆体的温度变形量差别大于 400 °C 下相应变化幅度也可能是试件吸水率反常的原因之一,这与高强混凝土在 200~400 °C 之间抗压强度降低幅度很小,甚至不降反升的现象一致。在 400 °C 以上,相同聚丙烯纤维掺量的试件,温度升高,试件吸水率增大;在相同温度下,随着聚丙烯纤维掺量增加到 1.18kg/m³ 时,混凝土试件的吸水率显著小于掺量为 V1、V2 的试件与不掺 PP 的试件。在该掺量下,混凝土试件的爆裂度最小,由于混凝土试件高温下内部形成均匀连通的熔化纤维孔道体系,释放高温下混凝土浆体内部形成的水蒸汽迁移形成的塞阻压力的效率得到充分保证,避免了浆体内部水蒸汽热迁移对浆体毛细孔道本身进一步的粗化破坏,尽管混凝土试件内部存在较多的熔化孔道,但混凝土浆体本身高温粗化幅度降低在一定的幅度内,试件的吸水率较低。可见聚丙烯纤维量只有掺量达到一定值后,高温下有效的混凝土的连通熔化孔道才会形成,高强混凝土试件才能免受爆裂与毛细孔道粗化的危害。

2.3 高温后试件力学性能

试验测试常温及高温后混凝土的力学性能见图 3 和图 4。

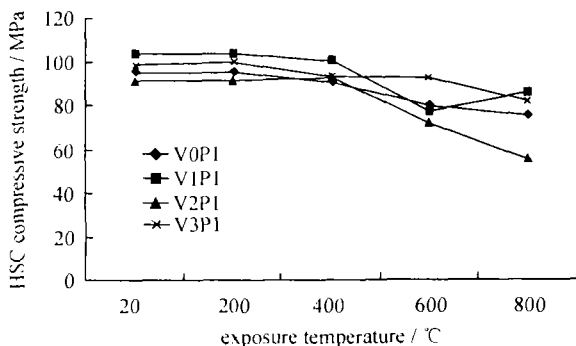


图 3 高温后高强混凝土抗压强度

Fig. 3 HSC compressive strength at different elevated temperatures

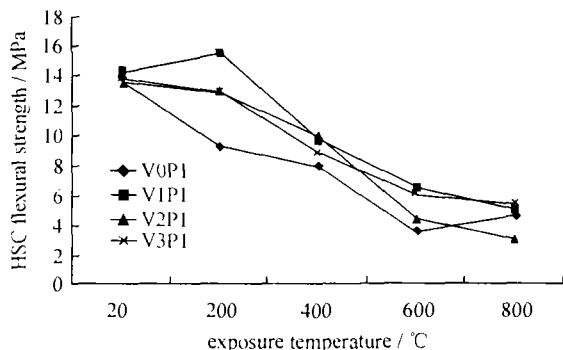


图 4 高温后高强混凝土抗折强度

Fig. 4 HSC flexural strength at different elevated temperatures

试验配制的高强混凝土初始抗压强度达 90~100MPa 左右,抗折强度达 13~14MPa,但经过 1h 的 200~800 °C 不同高温作用后,混凝土的抗折、抗压强度都有不同程度的下降,其中抗折强度下降较为严重,下降幅度大于相应抗压强度下降幅度;随温度升高,混凝土的抗折强度下降率逐步增大,800 °C 下降率达到 65% 左右。在 600~800 °C 温度作用下,混凝土抗压强度下降率高达 20% 左右。混凝土抗压、抗折强度的高温劣化主要与水泥浆体水化产物的分解以及混凝土基体出现了许多微裂纹有关,试验中掺加聚丙烯纤维对改善高温后高强混凝土的抗压、抗折强度的效果并不明显。可见高温下混凝土的力学性能劣化与爆裂破坏是两个不同的劣化方面,应分别加以研究考虑。

2.4 高温后 HSC 试件再养护性能恢复

掺加 PP 纤维可以抑制高强混凝土高温爆裂,但高温后未爆裂混凝土构件的使用性能则首先取决于剩余力学性能。混凝土试件抗折强度的大幅下降,将限制混凝土构件的力学使用性能。本文对

800 °C 高温后聚丙烯纤维掺量为 1.18kg/m³ 部分未爆裂高强混凝土试件进行了再养护,分别采用水溶液、3%水玻璃溶液以及 3%硫酸铝溶液三种养护溶液,将相应试件浸泡养护 28d,对比试件剩余抗压强度与抗折强度的恢复率,结果见表 2。

表 2 高强混凝土试件高温后再养护强度
Table 2 HSC specimens' recurring strength after elevated temperatures

试件	抗压强度(MPa)/相对值			抗折强度(MPa)/相对值		
	水	3%水玻璃溶液	3%硫酸铝溶液	水	3%水玻璃溶液	3%硫酸铝溶液
同龄期正常养护未受火试件	98.6/100%			13.9/100%		
受火试件	93.5/ 94.8%	91.3/ 92.6%	89.1/ 90.4%	6.2/ 44.7%	8.4/ 60.3%	9.9/ 71.5%

对试验采用的高强混凝土试件,高温后初始抗压强度为 81.84MPa,初始抗折强度为 5.39MPa。采用三种养护溶液再养护后,水溶液对试件抗压强度恢复率最高,抗压强度残余率由 83% 提高 94.8%,但三种养护溶液的效果区别不大;硫酸铝溶液对试件抗折强度恢复率最高,抗折强度残余率由 39% 恢复率高达 71.5%,三种养护溶液的养护效果差别较大。对两种强度的恢复效果综合来看,以选择硫酸铝溶液为养护溶液为好。混凝土高温后抗压强度的损失主要是由于水泥浆体脱水收缩引起,水养护可以将脱水化合物再水化来实现;而混凝土试件抗折强度的损失主要的由于水泥基浆体的热裂缝引起,混凝土试件经过硫酸铝溶液再养护后,试件微裂缝间形成了新的结晶体,部分地愈合微裂缝,改善混凝土的抗折性能。可以预见,采用其它具有防水

功能的养护溶液将可能有更明显的改善混凝土试件抗折性能效果。本研究为高温后 HSC 的结构修补提供了一种技术途径。

参考文献:

- [1] Ahmed GN, Hurst JP. An analytical approach for investigating the causes of spalling of high strength concrete at high temperatures[M]. In: *Proceedings of the International Workshop on Fire Performance of High Strength Concrete*, NIST SP 919, NIST, Gaithersburg, February 13-14, 1997. 95-108.
- [2] K. Hertz. Heat-induced explosion of dense concretes[J]. *Technical University of Denmark, Institute of Building Design Report* 1984(166).
- [3] Phan LT. *Fire performance of high strength concrete report of the state-of-the-art* [R]. Maryland: Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, 1996.
- [4] Pierre Kalifa, Gregoire Chene, Christophe Galle. High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres From spalling to microstructure[J]. *Cement and Concrete Research*, 2001(31): 1487-1499.
- [5] 王珩. 高强混凝土(砂浆)受火爆裂条件与机理研究[D]. 南京: 东南大学, 2002.
- [6] Nishida A, Yamazaki N, Inoue H, Schneider U, Diederichs U. Study on the properties of high-strength concrete with short polypropylene fiber for spalling resistance[M]. In: Sakai K, Banthia N, Gjorv OE, editors. *Proceedings, International Conference on Concrete Under Severe Conditions*, CONSEC_95, vol. 2, Sapporo, Japan. August 1995, 1141-50.
- [7] A. Bilodeau, V. K. R. Kodur, G. C. Hoff. Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire. *Cement & Concrete Composites* 2003(ARTICLE IN PRESS)

Study on the Properties of High Strength Concrete With Short Polypropylene Fiber after High Temperature

YOU You-kun^{1,2}, QIAN Chun-xiang¹, MIAO Chang-wen²

(1. Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Jiangsu Institute of Building Science, Nanjing 210008, China)

Abstract: With low penetration, the spalling of high strength concrete(HSC) at elevated temperatures which seriously affect the performance of reinforce concrete structure might occur. In this paper, the effect of spalling resistance of HSC mixed with different contents of polypropylene fiber were discussed. The ratio of water absorbing, the residual strength and the recovered performance of the HSC under fire attack were tested.

Key words: HSC; elevated temperature; spalling; polypropylene fibre