

文章编号:1007-9629(2004)03-0281-05

掺聚丙烯纤维高性能混凝土高温后的抗压性能

肖建庄, 王平

(同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

摘要: 设计了 79 块掺有聚丙烯纤维的 C50, C80 和 C100 高性能混凝土立方体试块, 在经历了 20~900 ℃ 的温度后, 得出了外掺聚丙烯纤维高性能混凝土高温后的质量损失率和残余抗压强度, 以及未发现高温爆裂的结论. 分别针对试块尺寸、强度等级和经历温度等因素, 研究了聚丙烯纤维高性能混凝土的高温抗压性能, 通过统计回归分析, 得出了可供工程设计和事故鉴定用的抗高温设计曲线.

关键词: 高性能混凝土; 聚丙烯纤维; 高温; 抗压强度

中图分类号: TU528.572 **文献标识码:** A

Study on Compressive Behavior of HPC with PP Fiber at Elevated Temperature

XIAO Jian-zhuang, WANG Ping

(Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: 79 cube specimens were designed and fabricated with C50, C80 and C100 high performance concrete (HPC) reinforced with polypropylene (PP) fiber. After these cube specimens were heated in an electric stove, with series temperature ranging from 20 to 900 ℃, respectively, the relationship between the mass loss and exposure temperature was investigated. Then the heated and cooled specimens were tested under monotonous compressive loading, the degradation of the residual compressive strength was studied. Concerning the effects of the cube dimension, strength grade and different elevated temperatures, the compressive behavior of HPC with PP fiber is comparatively discussed. Finally, a fire-resistance design curve between residual compressive strength and exposure temperature is established according to the statistic analysis of test data.

Key words: high performance concrete; polypropylene fiber; elevated temperature; compressive strength

高性能混凝土以其优异的强度、耐久性和施工工作性能, 正成为 21 世纪的主要建筑材料之一. 而其众多的组分和密实的结构也使它的高温力学性能更难预测, 甚至有高温低性能的趋势. Phan 等^[1]在对比了 CEB Bulletin D' Information No. 208 (CEB 1991) 和 CEN ENV (1993, 1994) 的推荐设计曲线以及近 10 年来国外有关高性能混凝土的相关试验结果后指出, 现有规范对混凝土高温抗压强度和弹性模量的设计建议较适合于普通混凝土, 用于高强混凝土则不太合适, 特别是在 300 ℃ 以下的高温中及 300 ℃ 以上的高温后的抗压强度推荐值对高强混凝土是偏于不安全的. 在国内, 已有

收稿日期: 2003-09-22; 修订日期: 2003-12-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50108011)

作者简介: 肖建庄 (1968-), 男, 山东人, 同济大学教授, 博士.

的混凝土高温力学性能研究结果也多集中于普通混凝土和高强混凝土^[2,3],而针对高性能混凝土的研究很少,针对掺聚丙烯纤维高性能混凝土^[4]的研究就更少了:

为了推广应用高性能混凝土,笔者针对国内常用的 C50, C80 和 C100 外掺聚丙烯纤维高性能混凝土的高温后抗压强度进行了试验研究.

1 试块设计

1.1 混凝土组分及配合比

水泥:上海水泥厂生产的海螺牌 42.5R 普通硅酸盐水泥;磨细矿渣:上海水泥厂生产的象牌 S90 级磨细高性能矿渣复合掺合料;硅灰:北京埃肯材料公司产品;细骨料:中砂;粗骨料:C100 采用 5~15 mm 粒径钙质(荆红石灰岩)连续级配碎石,C50 和 C80 采用 5~20 mm 粒径硅质碎石;高效减水剂:上海花王化学有限公司生产的萘系“迈地-100”;聚丙烯纤维:上海东华大学生产的用拉丝工艺制作的聚丙烯单丝纤维,纤维长度 15 mm,直径 45 μm ,熔融温度 165 $^{\circ}\text{C}$;拌合水:自来水.

C50, C80 和 C100 高性能混凝土的配合比如表 1 所示.混凝土的搅拌采用 100L 卧式强制式搅拌机.搅拌工艺为:先投入水泥、矿渣或硅灰等胶凝材料,搅拌均匀后加入聚丙烯纤维并延长搅拌时间至 5 min,再加入拌合水强制搅拌 2 min,最后加入碎石和减水剂搅拌 3~5 min.实测混凝土的坍落度为 220~280 mm.

表 1 高性能混凝土的配合比
Table 1 Mix proportion of concrete

Grade	Mix proportion/kg								
	Cement	Blast furnace slag	Silica fume	Water	Sand	Siliceous crushed stone (5~20 mm)	Calcareous crushed stone (5~15 mm)	FDN	PP fiber
C50	261	261		178	684	1 023		5.2	1.8
C80	324	216		162	688	1 030		4.86~7.54	1.8
C100	540		60	150	660		1 150	7.8	1.8

1.2 混凝土试块编号

所设计的混凝土立方体试块尺寸及数量等见表 2 所示.

表 2 试块设计一览表
Table 2 Description of test specimens

No.	Exposure temperature $^{\circ}\text{C}$	Numbers of specimen			
		100 mm \times 100 mm \times 100 mm			150 mm \times 150 mm \times 150 mm
		C50	C80	C100	C80
1	20	1	3	2	2
2	100	1	3	2	2
3	200	1	3	2	2
4	300	1	3	2	2
5	400	1	3	2	2
6	500	1	3	2	2
7	600	1	3	2	2
8	700	1	3	2	2
9	800	1	3	2	2
10	900		3	2	2

2 高温试验

2.1 试验过程

试块浇注1 d后拆模并覆上保鲜薄膜,在室内养护28 d后取出晾干,1~2月后进行高温试验.试块按预定温度和混凝土强度等级分批放入由上海科成工业炉设备厂生产的DRX-36型燃烧炉内.将试块分上下两层置于托架上,高温前后分别称量各批次试块的质量.

2.2 升降温机制

本试验模拟ISO-834标准升温曲线,但由于电炉功率所限,最高升温速率为23~24℃/min,略低于标准的升温速率.至预定最高温度且恒温3~4 h后,打开炉门使试块随炉冷却至室温.各设计温度批次炉膛的升降温过程详见图1.

2.3 高温试验现象

高温试验前后各批次混凝土的质量损失对比见图2,其中C80和C100的数据为按其设计数量实测后所取的平均值.从图中可见,质量损失明显分为3个阶段:100℃以下损失很少,说明高性能混凝土在水化、干燥后的自由水含量相对较少,密实度较高;100~400℃间损失最快,这阶段除毛细水和胶凝水的损失之外,300℃以上水化硫铝酸钙等水化物的结晶水也开始逐渐失去.相对于400℃以前,400℃以后损失放缓.C100级硅灰高性能混凝土在800℃以上损失再次加剧,这主要是钙质骨料分解并释放CO₂,以及试件表面混凝土局部剥落所致.

分析图2可以发现,300℃时3种等级混凝土的质量损失率都达0.04左右;300℃以上各强度等级混凝土的质量损失无明显规律,此时材料的等级和高温化学反应可能控制了质量变化.400℃时C50和C80级矿渣混凝土,C100级硅灰混凝土的质量损失率分别为0.008,0.057,0.044.按各点数据拟合的公式如式(1)所示

$$\Delta m / m_0 = 0.0001t - 0.002 \quad (R = 0.93) \quad (1)$$

式中, t 为混凝土经历的最高温度; $\Delta m / m_0$ 为混凝土的质量损失率.

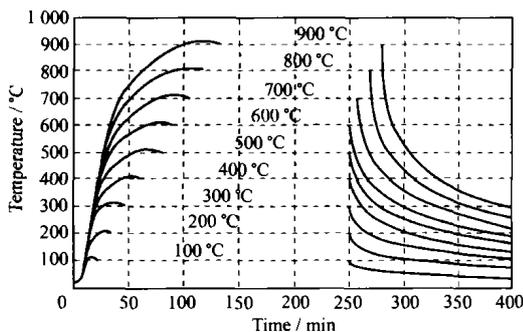


图1 炉膛升降温曲线

Fig. 1 Temperature-time curve of the furnace

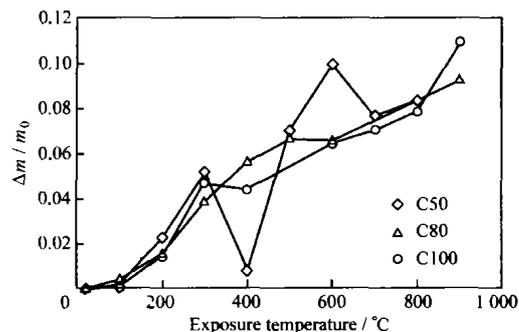


图2 高性能混凝土经高温后的质量损失

Fig. 2 Mass losing of HPC after high temperature

高温后不同等级的混凝土表面呈现出不同的颜色,主要是由于它们生成了不同颜色的矿物所致.按颜色的不同可以把混凝土受热温度分成3个区间:常温~300℃,此时颜色变化不大,矿渣高性能混凝土为青灰色,硅灰高性能混凝土为灰黑色;400~600℃,此时矿渣高性能混凝土为灰褐色,硅灰高性能混凝土为青灰色;600℃以上,此时矿渣高性能混凝土为棕红色,硅灰高性能混凝土为粉灰色.

3种等级的高性能混凝土在高温试验中均未发生爆裂现象,这主要是由于聚丙烯纤维在高温下熔化,并在致密的高性能混凝土内部产生了大量的毛细孔,降低了因水气迁移引起的蒸汽压力,从而减缓了高温爆裂的发生.

3 抗压强度试验结果与分析

3.1 残余抗压强度

高温后高性能混凝土立方体(100 mm×100 mm×100 mm)抗压强度的试验在 YE-2000 型液压万能试验机上完成,操作按照《普通混凝土性能试验方法》(GBJ 81—85)进行.所得到的高温后 C50, C80 和 C100 的残余立方体抗压强度相对值(与 20℃ 下的强度之比值)试验结果示于图 3. 与质量损失试验相同,图中 C80 和 C100 的立方体抗压强度为平均值.从图 3 可以看出:高温后残余强度相对值与温度的关系对于不同等级的混凝土呈现出不同的特征:C50 级矿渣混凝土在 100℃ 左右变化不大,200℃ 时有 1 个波谷,300℃ 时略有回升,300℃ 后近似直线下降;C80 级矿渣混凝土在 100℃ 左右略有提高,200℃ 时无降低现象,300℃ 时高于常温下强度,300℃ 后逐渐下降;C100 级硅灰混凝土在 200~300℃ 有 1 个波谷,400℃ 时略有回升,400℃ 后则直线下降.

经对比后可以发现,在掺加聚丙烯纤维的条件下,掺磨细矿渣的高性能混凝土总体上要优于掺硅灰的高性能混凝土,且其耐高温性能随强度等级的提高而改善,只是在 400℃ 时 C100 级硅灰混凝土要优于矿渣混凝土.由此可以推定,磨细矿渣对提高混凝土的高温后残余抗压强度有一定贡献,而硅灰对于 400℃ 以后的高性能混凝土的抗压强度有不利影响.

3.2 试块尺寸对高温后抗压强度的影响

为了对比尺寸效应,将边长为 100 mm 和 150 mm 2 种尺寸的 C80 立方体试块在高温后的残余抗压强度($f_{cu,150}$, $f_{cu,100}$)随所经历最高温度变化的关系示于图 4. 同时图中也绘出了边长为 100 mm 的试块强度 0.90 倍的相应数值 $0.90f_{cu,100}$. 由图可见,不同尺寸的试块,高温后残余抗压强度随温度变化的规律基本一致.但边长为 150 mm 的试块强度普遍低于边长为 100 mm 的试块强度.对此,除传统意义上的尺寸效应影响以外,升降温过程中的内外温差影响起主导作用.

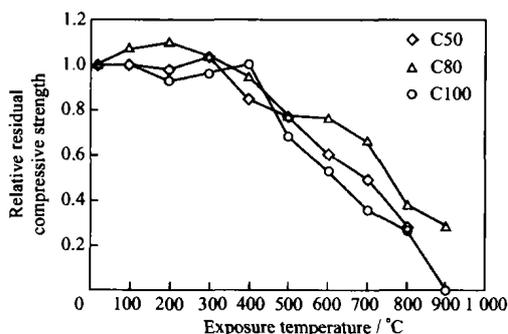


图 3 不同强度等级混凝土的残余抗压强度相对值
Fig. 3 Comparison of relative residual compressive strength of cube specimens with different strength grades

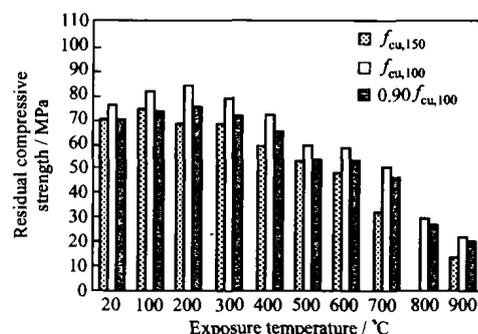


图 4 不同尺寸的混凝土立方体抗压强度对比
Fig. 4 Comparison of residual compressive strength of cubic concrete specimens with different sizes

3.3 高性能混凝土抗高温设计曲线

高性能混凝土高温后残余立方体抗压强度的试验结果与拟合曲线如图 5 所示,拟合式为

$$f_{cu}^t/f_{cu}^{20} = 0.002(t/100)^3 - 0.04(t/100)^2 + 0.0011(t/100) + 0.9638 \quad (R = 0.97) \quad (2)$$

鉴于高温后混凝土的残余立方体抗压强度在 400℃ 上下呈现的规律不同,本文以 400℃ 为界,提出如式(3)所示的简化计算公式,同时将该简化后的抗高温设计曲线也示于图 5 中.

$$\begin{aligned} f_{cu}^t/f_{cu}^{20} &= 1.0 - (20 - t)/31500 & t \leq 400 \text{ } ^\circ\text{C} \\ f_{cu}^t/f_{cu}^{20} &= 0.88 - (t - 400)/714 & 400 \text{ } ^\circ\text{C} < t \leq 900 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (3)$$

简化后的抗高温设计曲线与国外普通混凝土高温后残余抗压强度推荐曲线(SA 表示硅质骨料,CA 表示钙质骨料)的对比见图 6. 可以发现,在掺加聚丙烯纤维之后,高性能混凝土具有十分

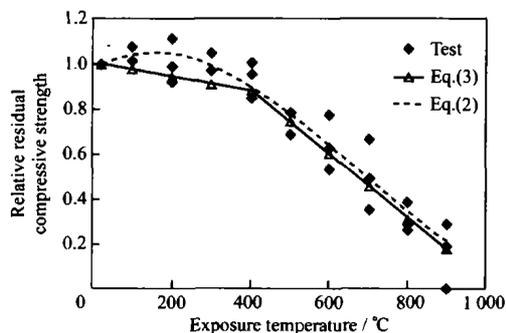


图 5 高性能混凝土高温后残余抗压强度与温度的关系

Fig. 5 Regression of the test results of HPC

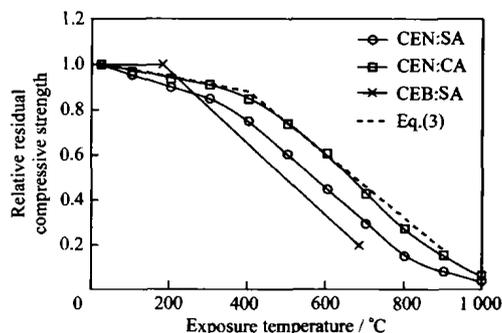


图 6 和国外推荐曲线的对比

Fig. 6 Comparison with suggested curves from overseas

优异的高温后抗压强度,采用普通混凝土的设计曲线仍有足够的安全储备.这一特点对严酷环境下,确保高性能混凝土的抗火性能具有十分重要的工程指导意义.

从抗压强度来说,聚丙烯纤维在较高温度下熔融后,形成了新的通道来释放蒸汽压,避免了抗压强度的过分损失甚至爆裂,因此在 300 °C 以内聚丙烯纤维对各等级混凝土都有一定的抵抗温度应力及阻裂增强作用,这是以前的研究未发现的.可能的原因是由于掺聚丙烯纤维后,为了保证坍落度而增加的减水剂以及延长的搅拌时间,使得混凝土封闭孔隙总体积增加,且聚丙烯纤维本身的热传导率较混凝土低,它的掺入必然会导致混凝土导热率下降,减少高温损伤;另外,聚丙烯纤维在软化前仍有阻裂和抗温度应力作用.这对提高混凝土高温后的抗压性能均是有利的.

4 结论与建议

1. 高性能混凝土高温后的质量损失按温度区段可以分为 3 个阶段:100 °C 以下损失很少;100 ~ 400 °C 间损失最快;400 °C 以上损失放缓,但对硅灰高性能混凝土,800 °C 以上其质量损失再次加剧.一般情况下,可以用本文建议的公式(1)计算.

2. 高温后,掺加聚丙烯纤维的高性能混凝土抗压强度从 100 mm × 100 mm × 100 mm 转换到 150 mm × 150 mm × 150 mm 的尺寸效应系数,建议取为 0.90.

3. 在掺加聚丙烯纤维的条件下,矿渣高性能混凝土的抗压强度损失要小于经历同样高温后的硅灰高性能混凝土的抗压强度损失.

4. 在本文的试验条件下,掺加聚丙烯纤维高性能混凝土的抗压强度损失接近甚至小于经历同样高温后的普通混凝土的抗压强度损失.

5. 掺聚丙烯纤维的高性能混凝土,其高温后的残余抗压强度大致以 400 °C 为界,400 °C 之前,温度对其损伤较小,400 °C 之后,温度对其损伤加剧.可用本文提出的简化抗高温设计曲线,即公式(3)进行计算.

6. 不同聚丙烯纤维掺量对高性能混凝土抗火性能的影响,值得进一步研究.

致谢:同济大学混凝土材料研究国家重点实验室张雄教授和杜红秀博士为本文的试验工作提供了试验设备,特此致谢.

参考文献:

- [1] PHAN L T, CARINO N J. Review of mechanical properties of HSC at elevated temperature[J]. Journal of Material in Civil Engineering, 1998, 10(1): 58-64.
- [2] 肖建庄,李杰,孙振平.高性能混凝土结构抗火研究最新进展[J].工业建筑,2001,31(6): 53-56.
- [3] 肖建庄,王平,朱伯龙.我国钢筋混凝土材料抗火性能研究回顾与分析[J].建筑材料学报,2003,6(2):182-189.
- [4] 朱江.聚丙烯纤维与高强高性能混凝土[J].混凝土,2000,(5):49-51.