

高温下掺 PPF 的 RPC 立方体抗压性能

罗百福, 郑文忠, 李海艳

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨)

摘要: 为了改善高温下活性粉末混凝土(RPC)的爆裂和抗压性能, 完成了 108 个 $70.7\text{ mm} \times 70.7\text{ mm} \times 70.7\text{ mm}$ 掺聚丙烯纤维(PPF)的活性粉末混凝土立方体试块高温下抗压试验. 考察了 PPF 掺量对 RPC 高温爆裂的抑制效果, 研究了温度和 PPF 掺量对高温下 RPC 立方体抗压性能的影响. 结果表明: 体积掺量 0.3% 的 PPF 能有效防止 RPC 爆裂, 高温下 RPC 立方体抗压强度也相对较高; 100 °C 时 RPC 的立方体抗压强度比常温低, 200 ~ 600 °C 时立方体抗压强度相比 100 °C 有所升高, 700 ~ 800 °C 时立方体抗压强度相对 600 °C 降低; 20 ~ 100 °C 时 RPC 立方体抗压强度随 PPF 掺量的增大而降低, 200 ~ 800 °C 时 RPC 立方体抗压强度随 PPF 掺量的增大而提高; 100 ~ 500 °C 时掺 PPF 的 RPC 的立方体相对抗压强度小于普通混凝土和高强混凝土, 600 ~ 800 °C 时掺 PPF 的 RPC 的立方体相对抗压强度则较大. 基于试验结果, 拟合出了不同 PPF 掺量的 RPC 高温下立方体抗压强度随温度变化的计算公式.

关键词: 高温下; 活性粉末混凝土; 抗压强度; 聚丙烯纤维; 爆裂

中图分类号: TU528.31

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)12-0001-07

Compressive properties of cube for reactive powder concrete with polypropylene fibers at elevated temperature

LUO Bai-fu, ZHENG Wen-zhong, LI Hai-yan

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: To improve the explosive spalling and compressive properties of reactive powder concrete (RPC) at elevated temperature, 108 cube specimens ($70.7\text{ mm} \times 70.7\text{ mm} \times 70.7\text{ mm}$) were prepared to study the compressive strength of RPC with polypropylene fibers (PPF). The influences of temperatures and PPF content on the spalling properties of RPC were investigated, and compressive strength of RPC with different temperatures and PPF content were studied. The experimental results show that PPF volume content of 0.3% can prevent explosive spalling of RPC and significantly increase compressive strength. Compressive cube strength drops at 100 °C as compared to 20 °C and increases from 200 to 600 °C, but drops again beyond 600 °C; Compressive cube strength of the RPC was lower if the PPF content increases below 100 °C, but was higher when the PPF content increases between 200 and 800 °C; The relative compressive strength of RPC was lower below 500 °C, but was higher between 600 and 800 °C. Calculation formulas of the compressive strength at elevated temperature were obtained by fitting curve of experimental data considering PPF content when temperature varied.

Key words: elevated temperature; reactive powder concrete; compressive strength; polypropylene fibers; explosive spalling

活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete,

RPC)是一种具有超高强度、高韧性、高耐久性和体积稳定性良好的新型建筑材料, RPC 胶砂件抗压强度可达 200 ~ 800 MPa, 而且 RPC200 具有 30 ~ 60 MPa 的抗折强度^[1]. 高强混凝土内部结构致密, 孔隙较小, 使得水蒸汽较难逃逸, 因而火灾下比普通混凝土更易爆裂^[2-4].

收稿日期: 2012-04-15.

基金项目: 国家教育部长江学者奖励计划资助项目(2009-37);
教育部博士点基金资助项目(20092302110046);
黑龙江省自然科学基金资助项目(E200916).

作者简介: 罗百福(1981—), 男, 博士研究生;
郑文忠(1965—), 男, 博士生导师, 长江学者特聘教授.

通信作者: 郑文忠, zhengwenzhong@hit.edu.cn.

文献[5]对高温下钢筋混凝土的温度分布、破坏特征、极限承载力和耐火极限做了深入研究,高温下普通混凝土的抗压强度在 400 ℃ 前变化不大,400 ℃ 后抗压强度急剧下降;900 ℃ 时抗压强度不足常温抗压强度的 10%. 文献[6]提出了恒高温下 C20 ~ C80 强度等级混凝土轴心抗压强度、受压弹性模量、受压峰值应变等力学性能指标.

PPF 熔化后产生的孔洞有利于蒸汽压力的释放,可极大地改善高温下混凝土的爆裂. PPF 对混凝土抗压强度和抗折强度影响不大,但能有效改善混凝土的抗爆裂性能^[7]. 文献[8]认为 PPF 缓解高强混凝土爆裂的最小体积掺量为 0.9 kg/m³. 文献[9]表明:600 ℃ 后,掺加 PPF(体积掺量为 0.22%)普通混凝土的剩余抗压强度高于不掺 PPF 的混凝土. 通过 SEM 扫描分析,200 ℃ 后,掺加 PPF 混凝土的纤维熔化,形成众多的孔隙有益于水蒸汽逸出,降低爆裂风险^[10]. 但是,高温下 RPC 抗压强度和爆裂方面的研究还属空白,本文主要是研究高温下掺 PPF 的 RPC 试块的破坏形态、爆裂规律和抗压强度;对高温下普通混凝土、高强混凝土和 RPC 的爆裂和抗压强度进行了比较分析.

1 试验概况

1.1 试验原材料

水泥:P. O 42.5 普通硅酸盐水泥;硅灰:SiO₂ 质量分数 94.5%,比表面积 20 780 m²/kg;矿渣:S95 级高性能复合掺合料, SiO₂ 质量分数 36.9%,比表面积 4 750 cm²/g;石英砂:40 ~ 70 目和 70 ~ 140 目各占 50%, SiO₂ 质量分数超过 99.6%;减水剂:FDN 浓缩型高效减水剂;聚丙烯纤维:纤维长度 18 ~ 20 mm,平均直径 45 μm,密度 0.91 g/cm³,熔点 165 ℃;拌合水:自来水.

1.2 试块制作及配合比

有 4 种配合比,分别对应 PPF 体积掺量为 0、0.1%、0.2% 和 0.3%,每种配比成型 9 组试块,每组分别对应 3 个试块,总计 108 个,试验数据取 3 个试块的平均值. 试块尺寸为 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm 的立方体. 具体配合比见表 1.

RPC 的搅拌采用 60 L 单轴卧式强制式混凝土搅拌机搅拌. 搅拌工艺:先投入水泥、硅灰、矿渣、石英砂和减水剂,均匀搅拌 3 min;然后加水搅拌 6 min,再加入 PPF 搅拌 6 min;最后将 RPC 装入试模,在混凝土振动台上振动成型. RPC 的流动度为 20 ~ 22 cm. 室温条件下(20 ℃ 左右)静置 24 h 后拆模,然后将试块放入温度为 90 ℃ 的混凝土加速养护箱养护 3 d,再将试块移入温度为 20 ℃

和相对湿度为 75% 的养护室,60 d 后进行目标温度下抗压试验. 常温下, RPC0、PRPC1、PRPC2 和 PRPC3 的抗压强度分别为 136.43、107.52、105.98 和 112.13 MPa. 高温试验前所有试块全部放入 105(±5) ℃ 的烘干箱内烘干 48 h 备用.

表 1 试验用 RPC 配合比

编号	水胶比	胶凝材料			石英砂	减水剂	PPF 体积掺量/%
		水泥	硅灰	矿渣			
RPC0	0.2	1	0.3	0.15	1.2	0.04	0
PRPC1	0.2	1	0.3	0.15	1.2	0.04	0.1
PRPC2	0.2	1	0.3	0.15	1.2	0.04	0.2
PRPC3	0.2	1	0.3	0.15	1.2	0.04	0.3

1.3 试验设备

高温下 RPC 的力学性能试验所需设备包括高温试验炉、温度控制仪、耐高温压头、加载设备、数据量测和采集装置及辅助设备组成. 高温试验炉由炉箱、炉瓦、炉盖、电热丝、保温棉和热电偶等主要部件组成,试验炉外廓尺寸为 φ400 mm × 400 mm 的空心圆柱体,炉腔的净空为 φ250 mm × 250 mm,炉瓦为碳化硅材质,尺寸为 φ260 mm × 20 mm × 250 mm 的空心圆筒(图 1),炉瓦外缠 2 根 2.5 kW 电阻丝,高温试验炉的额定功率为 5 kW,外与温度控制仪相连,通过温度控制仪供电加热. 炉瓦周围用硅酸铝材质的保温棉隔热,炉瓦上下部位的炉口用硬质硅酸铝板隔热. 耐高温压头的材质为 06Cr23Ni13,最高工作温度达 1 000 ℃. 通过大量的高温试验表明:整套设备设计合理,易于对中,试验精度高,同时制作了两个各项参数相同的高温试验炉,交替使用,缩短试验时间,具有经济安全,操作简便和试验重复性好等优点.

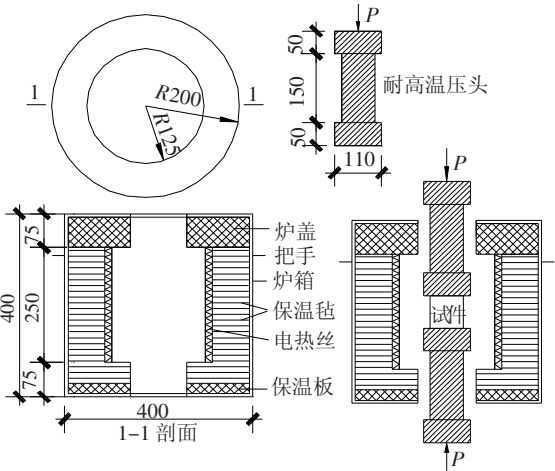


图 1 高温试验炉示意图(mm)

1.4 试验制度

设计目标温度为 20、100、200、300、400、500、600、700、800 ℃,平均升温速率为 5 ℃/min. 为测量

试块内部温度,在试块中心点布置 WRNK-101K 镍铬-镍硅型热电偶(图 2),每隔 10℃记录一次炉膛温度和 RPC 中心温度,并观察试验现象。

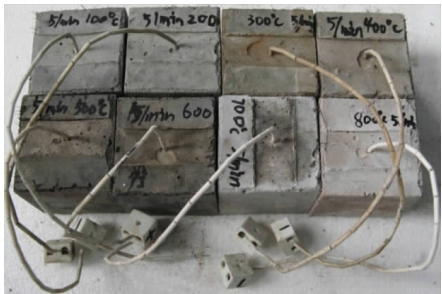


图 2 内置热电偶的立方体试块

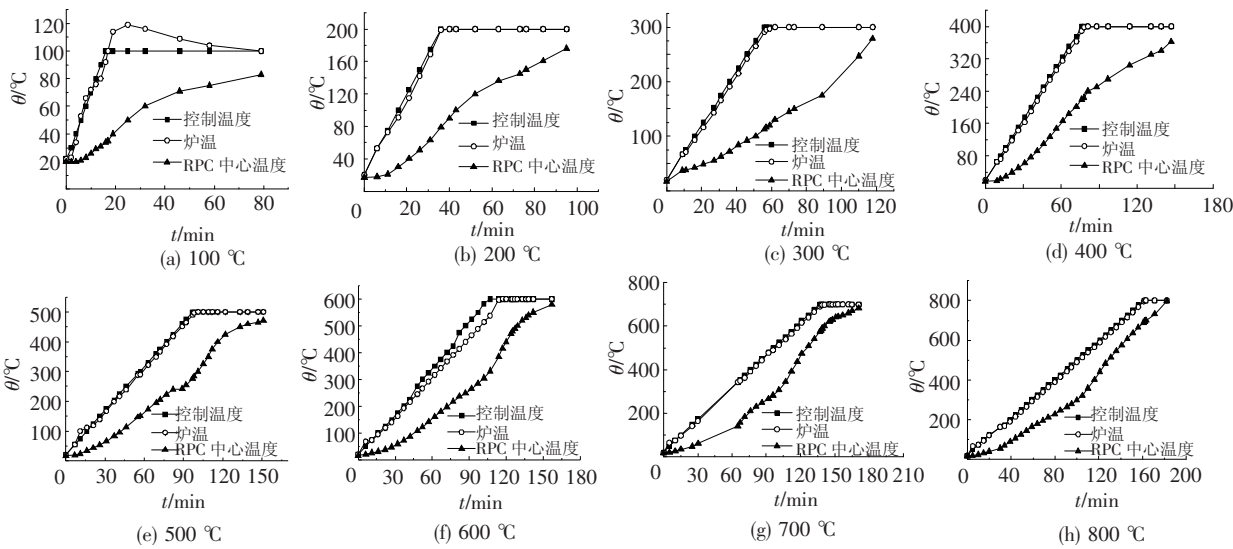


图 3 不同目标温度工况下温度-时间曲线

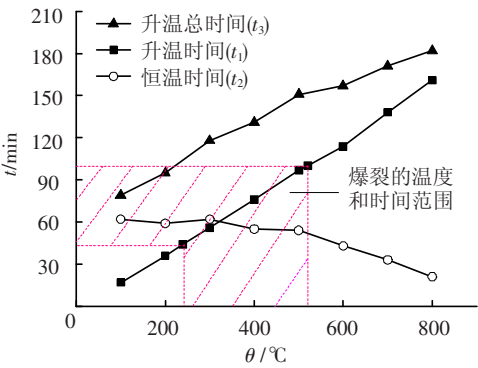


图 4 RPC 的升温 and 恒温时间曲线

炉温从常温升温到目标温度的时间为升温时间(t_1);炉温达到目标温度至 RPC 内外温度一致之间的时间为恒温时间(t_2);升温时间与恒温时间之和为试块的升温总时间($t_3 = t_1 + t_2$).在 RPC 中心温度和炉温达到一致时开始进行高温下抗压试验.图 4 表明:升温时间、恒温时间和升温总时间分别近似于线性变化,随温度的升高,升温时间增加,恒温时间减少,而升温总时间随温度的

图 3 为各目标温度的控制温度、炉温和 RPC 中心温度的温度曲线,100~400℃时中心温度和炉温很难达到绝对一致,500~800℃时中心温度和炉温趋于一致.100~400℃时 RPC 的内外温度差较大,最大温差达 200℃,较大的温度梯度也会引起较大的温度应力和显著的材性差异,使得 RPC 易于爆裂,图 4 表明爆裂集中在 400℃附近.这是因为较大温度梯度使得 RPC 表层一定厚度的混凝土受热膨胀而受拉,当温度应力大于 RPC 的极限拉应力时 RPC 开裂,且在蒸汽压力共同作用下,RPC 爆裂概率也增加。

升高而延长。
抗压试验在 YE-1000 型液压万能试验机上完成,按照 GB/T 5008—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[11]的要求进行操作.先调节球铰支座和耐高温下压头,再将试块放入高温试验炉的中部,最后调整耐高温上、下压头和试块的各自位置,保证三者垂直对中(图 5),将热电偶插入到试验炉内部,上、下耐高温压头与炉口间隙用保温棉塞严,调节温度控制仪进行升温。

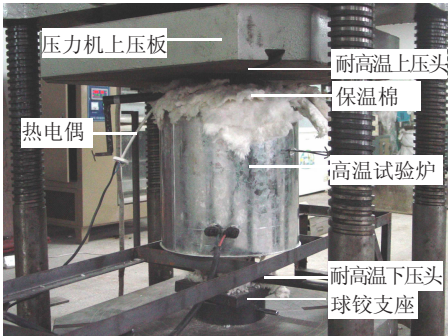


图 5 抗压强度试验加载图

2 结果与分析

2.1 高温下试验现象

掺 PPF 的 RPC 试块在 100 ~ 200 ℃ 时有少量白雾出现,试块内部温度为 335 ~ 341 ℃ 时,伴有持续性白色烟雾冒出,大约 3 min 过后,白色烟雾逸出量明显减少,持续 5 ~ 10 min 后,白色烟雾气体消失,其过程可以闻到刺激性气味.爆裂温度和时间范围如图 4 阴影部分所示,400 ℃ 时 RPC0 和 PRPC1 爆碎;800 ℃ 时 PRPC2 爆碎;而 PRPC3 无爆裂发生,试件完整性较好.掺 PPF 的 RPC 起爆温度为 240 ℃ ,其中 400 ℃ 左右有较为集中的剧烈爆裂声,520 ℃ 后爆裂基本停止.如果试块在 600 ℃ 前没有爆裂,则超过 600 ℃ 也不会爆裂,爆

裂的时间范围为 43 ~ 100 min.

掺 PPF 的 RPC 的颜色、表面损伤状况和敲击试块声音的变化如表 2 所示.随着温度的升高,RPC 的弹性模量下降较快,孔隙和裂缝增多变大,水泥浆体、矿物掺合料和石英砂等发生物理和化学反应,RPC 的成份会因高温作用发生变化,这些因素都会引起 RPC 表面特征和声音的变化.试块表面的颜色变化与 PPF 掺量无关,但是 PPF 掺量高者的试块完整性也越好,裂缝宽度也越小.由于表面破坏特征和声音变化与 RPC 经历的最高温度相对应,可根据颜色变化、裂纹数目和大小、掉皮、缺角和敲击声音等来推断试块所经历的最高温度,为火灾后 RPC 结构提供抗火设计建议、损伤评估和修复建议.

表 2 不同温度时的 RPC 表面特征及声音变化

温度/℃	颜色	裂纹	掉皮	缺角	敲击声音	疏松
20 ~ 200	青灰色	无	无	无	声音响亮清脆,音调高	无
300 ~ 400	棕褐色	边棱处观察到细微裂纹	无	无	声音较低沉,较厚重	无
500	淡红灰色	边棱处观察到数量较多 细微裂纹	轻微	无	声音进一步低沉, 较厚重	无
600	黑褐色	试块表面出现少量 头发丝粗细的裂纹	少量	较少	声音进一步低沉, 略沉闷,音调较低	轻度
700	灰白色	边棱处出现较为粗大的裂纹,表面 分布较多的网状长宽裂纹	大量	磕碰 就掉	声音进一步低沉, 发闷,音调低	较明显
800	黄白色 (偏黄色)	试块表面观察到众多的网状 龟裂纹,少数裂缝宽度较大	严重, 表面烧结	棱角不 同程度缺失	声音进一步低沉、 发闷而沙哑	明显

2.2 RPC 的破坏形态

图 6 为 RPC0 和 PRPC3 的在 20 ~ 800 ℃ 破坏形态. RPC0 的破坏部位主要在棱角处.随温度的升高,PRPC3 破坏也越严重,但破坏完整性比 RPC0 要好.掺 PPF 的 RPC 和 RPC0 的破坏形式都属于脆性破坏.温度低于 400 ℃ 时,掺 PPF 的 RPC 主要破坏部位在棱角处;高于 400 ℃ 时掺 PPF 的 RPC 破坏形态为两个倒立的锥形.800 ℃ 时 PRPC3 沿受压方向的裂缝增大,并出现垂直受压方向的裂缝,裂缝多为龟裂纹,呈网状(鱼鳞状).随 PPF 掺量增大,RPC 破坏形态的完整性越好,但裂缝数量随之增多,裂缝宽度却减少.体积掺量 0.3% 的 PPF 可以防止高温下 RPC 的损伤和爆裂,提高高温下 RPC 的抗压强度,脆性破坏现象也有所缓解,但是经过高温作用后,PPF 留下的孔道对 RPC 的耐久性也是不利的.

2.3 高温下 RPC 的抗压强度

为获得试块高温下的抗压强度,先将试块升

温到目标温度,再保持恒温,在试块内外温度一致后对试块进行高温下的恒温加载试验.实验每组抗压强度都是在恒温加载的工况下获得的.

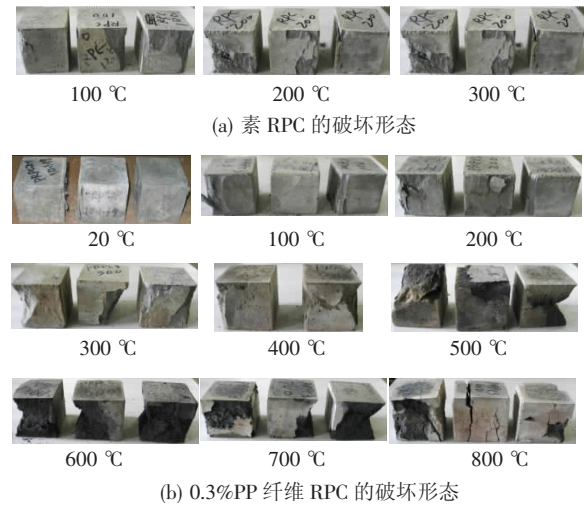


图 6 RPC 立方体试块破坏形态

图 7 为高温下 RPC 立方体试块的抗压强度,考察温度对高温下 RPC 抗压强度的影响。RPC0, 100 ℃ 时抗压强度为 73.52 MPa, 下降趋势极为迅速, 只有常温抗压强度的 55%; 200 ℃ 和 300 ℃ 的立方体抗压强度分别为常温抗压强度的 45% 和 35%。对于掺 PPF 的 RPC, 100 ℃ 时 PRPC1、PRPC2 和 PRPC3 抗压强度分别为 67.52、59.70 和 59.78 MPa, 抗压强度只有常温 (20 ℃) 的 53.3% ~ 62.8%。由于 100 ℃ 时自由水开始蒸发, 形成毛细裂缝和孔隙, 缝隙中的水和水蒸汽随温度的升高而增加, 对周围介质产生张力, 且加载过程中缝隙尖端有应力集中促使裂缝扩展, 因此 RPC 的抗压强度降低。200 ~ 600 ℃, 掺 PPF 的 RPC 抗压强度相比 100 ℃ 有所升高, 600 ℃ 时 PRPC3 的抗压强度相对 100 ℃ 提高 13.3%。结合水的逸出使得水泥颗粒更紧密, 使得组织硬化; 同时高温下逃逸水产生类似蒸汽养护的作用, 促进水泥颗粒的进一步水化, 抗压强度相对 100 ℃ 升高。600 ~ 800 ℃, PRPC2 和 PRPC3 的抗压强度相对 600 ℃ 降低, 其中 800 ℃ 时 PRPC3 抗压强度为 54.01 MPa, 只有常温抗压强度的 48.2%。573 ℃ 后石英晶体的晶型由 α 型转变为 β 型, 使得 RPC 的体积巨大膨胀, 抗压强度降低; 随着水化物完全分解, RPC 体积膨胀, 界面裂缝快速发展, 促使掺 PPF 的 RPC 抗压强度进一步下降。

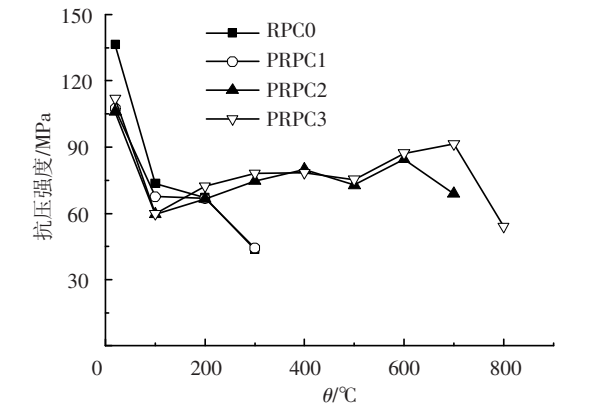


图 7 高温下掺 PPF 的 RPC 的抗压强度

图 7 也表明在不同温度下, RPC 抗压强度随 PPF 掺量的变化规律。20 ~ 100 ℃, 随着 PPF 掺量的增大, RPC 的抗压强度随之降低。因为 PPF 弹性模量较低, PPF 掺量越高抗压强度也就越低。200 ~ 800 ℃, RPC 的抗压强度随 PPF 掺量的增大而提高。由于一方面在 160 ~ 170 ℃ 后, PPF 已经熔化, 留下了大量的孔洞, 纤维掺量越大, 其孔结构也越多, 因此高温下的水蒸汽容易逸出, 降低了蒸汽压力和减少温度对 RPC 的内部损伤, 缓解爆

裂的效果也越明显; 另一方面, 由于 PPF 熔化后在 RPC 内部形成乱向、无序和连通的熔化纤维孔道网络, 其渗透性要优于基体的本身, 能够良好地释放高温下 RPC 内部由于水蒸汽迁移形成的孔压力, 从而减少了 RPC 内部热蒸汽对浆体毛细管道的粗化作用。相关研究表明: 既能防止混凝土爆裂, 又对与渗透性相关的耐久性影响较小, PPF 的最佳体积掺量为 1.5 ~ 2.0 kg/m^3 ^[12-13]。本文 PRPC3 的 PPF 体积掺量为 0.3% (体积掺量为 2.73 kg/m^3), 能够提高高温下 RPC 的抗压强度、有效防止爆裂和改善脆性破坏。

图 8 为高温下掺 PPF 的 RPC 抗压强度拟合曲线与国外规范推荐曲线, Eurocode^[14-15] 和 ACI 216R^[16] 适用于普通混凝土和高强混凝土, RakMK B4 K10 - K70^[17] 适用于普通混凝土, RakMK B4 K70 - K100^[17] 适用于高强混凝土。与 Eurocode, RakMK B4 和 ACI 216R 相比, 100 ~ 400 ℃, RPC 的相对抗压强度相比规范推荐曲线严重偏低, 最高比规范低 46.7%; 500 ~ 800 ℃, Eurocode, RakMK B4 和 ACI 216R 规范推荐曲线相对保守, 特别是在 800 ℃ 时, RakMK B4 K10 - K70 此时的抗压强度为零, 而 RPC 立方体相对抗压强度为 48%, 掺 PPF 的 RPC 还保持较高的抗压强度, 具有足够的安全储备。

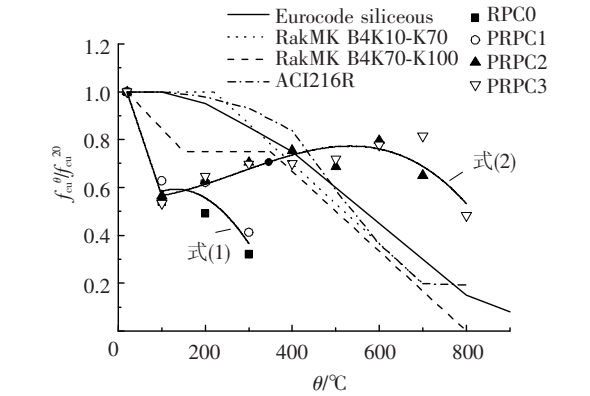


图 8 高温下掺 PPF 的 RPC 的相对抗压强度

PPF 掺量为 0 ~ 0.3% 的 RPC 的立方体相对抗压强度和拟合曲线见图 8, RPC0 和 PRPC1 的拟合公式为

$$f_{cu}^{\theta} = \begin{cases} 1.109 - 5.43 \left(\frac{\theta}{1000} \right), & (20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C}, R^2 = 0.983) \\ 0.448 + 2.17 \left(\frac{\theta}{1000} \right) - 8.13 \left(\frac{\theta}{1000} \right)^2, & (100^\circ\text{C} < \theta \leq 300^\circ\text{C}, R^2 = 0.818) \end{cases} \quad (1)$$

PRPC2 和 PRPC3 的拟合公式为

$$\frac{f_{cu}^{\theta}}{f_{cu}^{20}} = \begin{cases} 1.109 - 5.43\left(\frac{\theta}{1000}\right), & (20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 100^{\circ}\text{C}, R^2 = 0.983) \\ 0.552 - 0.105\left(\frac{\theta}{1000}\right) + 2.72\left(\frac{\theta}{1000}\right)^2 - 3.28\left(\frac{\theta}{1000}\right)^3, & (100^{\circ}\text{C} < \theta \leq 800^{\circ}\text{C}, R^2 = 0.841). \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_{cu}^{θ} 为高温下的 RPC 立方体抗压强度; f_{cu}^{20} 为 20 °C 下 RPC 立方体抗压强度; θ 为试块的温度 (°C); R^2 为相关系数。

2.4 高温下 RPC 与普通混凝土、高强混凝土的抗压强度和爆裂比较

从图 9 可知, 100 ~ 400 °C 时普通混凝土 (Castillo^[18], Abrams^[19], Diederichs^[20]) 抗压强度无明显变化, 甚至还有一定程度升高; 100 ~ 400 °C 时高强混凝土 (Diederichs^[20], Furumura^[21], Hammer^[22]) 相对抗压强度呈下降趋势; 而 100 °C 时掺 PPF 的 RPC 抗压强度约只有常温的 53.3% ~ 62.8%, 掺 PPF 的 RPC 的抗压强度在 200 ~ 600 °C 相比 100 °C 有一定程度提高。100 ~ 500 °C 时相对抗压强度顺序: 普通混凝土 > 高强混凝土 > RPC。RPC 相对抗压强度最小的原因主要是两方面: 一方面, 随着温度的升高, 水泥浆体与骨料热工参数不同, 水泥浆体受拉, 骨料受压, 由此加剧了内裂缝的开展, 而低强度混凝土的水泥与砂子的比率一般较小, 水泥用量愈大, 抗压强度的降低也会愈明显。另一方面, 自由水主要存在于毛细管道和浆体颗粒之间, RPC 内部结构致密, 毛细孔洞较少很难吸附逃逸水, 抗压强度下降比例较大。600 ~ 800 °C, 掺 PPF 的 RPC 相对抗压强度高于普通混凝土和高强混凝土。普通混凝土和高强混凝土的抗压强度在 500 °C 后急剧下降, 而 PRPC3 抗压强度在 700 °C 后才明显下降, PPF 延缓了 RPC 抗压强度的下降。因此, 高温下掺 PPF 的 RPC 的相对抗压强度相比普通混凝土和高强混凝土下降趋势趋于平缓。文献[20]有爆裂发生, 即使在 1 °C/min^[21] 和 2 °C/min^[22] 的低升温速度下, 仍然在 700 °C 和 600 °C 时爆裂。而 PRPC3 试块均无爆裂发生, 即使 800 °C 时 PRPC3 仍有较高的相对抗压强度。因此, 掺加 0.3% 的 PPF 可以防止爆裂, 并显著地提高高温下 RPC 的抗压强度。在高温下, 普通混凝土、高强混凝土和 RPC 都经历了孔结构的改变, 也就是孔结构的“粗化效

应”^[23], 这也是 600 °C 后 RPC 抗压强度下降的一个原因; 另一方面, 由于 PPF 熔化形成连通的孔道网络, 掺 PPF 的 RPC 比普通混凝土和高强混凝土具有更粗大的孔结构, 600 °C 后掺 PPF 的 RPC 维持比普通混凝土和高强混凝土高的相对抗压强度, 但在与渗透性相关的耐久性方面 RPC 却不如普通混凝土和高强混凝土。

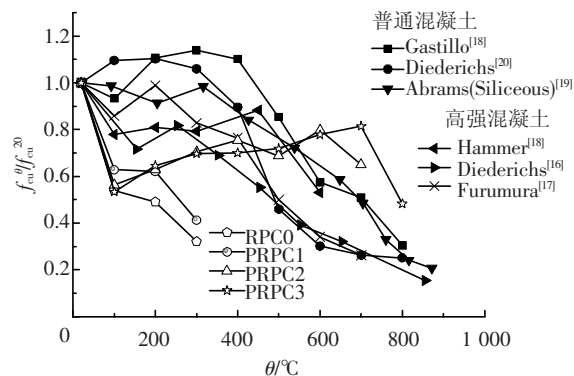


图9 普通混凝土、高强混凝土和 RPC 相对抗压强度

3 结 论

1) 随温度的升高, 升温时间随之增加, 恒温时间减少, 试验升温总时间 (升温时间与恒温时间之和) 增加。掺 PPF 的 RPC 爆裂温度集中在 240 ~ 520 °C, 在 400 °C 附近爆裂现象尤为激烈。PPF 体积掺量为 0.1% 时抑制 RPC 爆裂效果不明显, PPF 体积掺量为 0.3% (2.73 kg/m³) 时, 能够有效地防止爆裂、缓解脆性破坏和提高高温下 RPC 的抗压强度。根据颜色、裂纹数目及大小、掉皮、缺角和敲击声音等能推断试块所经历的最高温度。

2) 100 °C 时掺 PPF 的 RPC 的立方体抗压强度相对常温下降, 200 ~ 600 °C 时的抗压强度相对 100 °C 有所升高, 600 °C 后掺 PPF 的 RPC 的抗压强度降低。20 ~ 100 °C, RPC 抗压强度随 PPF 掺量增大而降低; 200 ~ 800 °C, RPC 抗压强度随 PPF 掺量增大而提高。

3) 与国外规范推荐曲线相比, 100 ~ 400 °C, 掺 PPF 的 RPC 的相对抗压强度相比规范推荐曲线严重偏低; 400 ~ 800 °C, 掺 PPF 的 RPC 还保持较高的相对抗压强度, 相对规范推荐曲线具有足够的安全储备。100 ~ 500 °C, 高温下普通混凝土相对抗压强度最大, 高强混凝土次之, 掺 PPF 的 RPC 最小; 600 ~ 800 °C, 掺 PPF 的 RPC 相对抗压强度高于普通混凝土和高强混凝土, 但在与渗透性相关的耐久性方面 RPC 却不如普通混凝土和高强混凝土。

参考文献:

- [1] RICHARD P, CHEYREZY P M H. Reactive powder concrete with high ductility and 200 – 800 MPa compressive strength [J]. ACI Special Publication, 1994, 144:507 – 518.
- [2] JAHREN P A. Fire resistance of high strength/dense concrete with particular reference to the use of condensed silical fume-A review [J]. ACI Special Publication, 1989, 114:1013 – 1049.
- [3] CASTILLO C, DURRANI A J. Effect of transient high temperature on high strength concrete [J]. ACI Materials Journal, 1990, 87(1):47 – 53.
- [4] SCHNEIDER U. Fire resistance of high performance concrete [C]//Proceedings of the RILEM international workshop. Vienna:[s. n.], 1994:237 – 242.
- [5] 时旭东,过镇海. 高温下钢筋混凝土受力性能的试验研究[J]. 土木工程学报,2000,2(6):6 – 16.
- [6] 丁发兴,余志武. 恒高温下混凝土及钢管混凝土受压力学性能研究[J]. 铁道科学与工程学报,2005,2(6):9 – 14.
- [7] 鞠丽艳,张雄. 聚丙烯纤维对高温下混凝土性能的影响[J]. 同济大学学报,2003,31(9):1064 – 1067.
- [8] KALIFA P, CHENE G, GALLE C. High-temperature behavior of HPC with polypropylene fibers from spalling to microstructure [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(10):1487 – 1499.
- [9] 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.
- [10] NOUMOWE A. Mechanical properties and microstructure of high strength concrete containing polypropylene fibres exposed to temperatures up to 200 °C [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(11):2192 – 2198.
- [11] 中华人民共和国国家标准. GB/T 50081—2002 普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [12] ZEIML M, LEITHNER D, LACKNER R, *et al.* How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ-concrete? [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(5):929 – 942.
- [13] GARBOCZI E J, SNYDER K A. Geometrical percolation threshold of overlapping ellipsoids [J]. Phys Rev E, 1995, 52(1):819 – 828.
- [14] British Standards Institution. EN. 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures-part 1. 2: general rules-structural fire design [S]. London: British Standards Institution, 2004.
- [15] British Standards Institution. EN. 1994-1-2:2005 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures-part 1. 2: general rules-structural fire design [S]. London: British Standards Institution, 2005.
- [16] American Concrete Institute. ACI 216. 1-07:2007 Code requirements for determining fire resistance of concrete and masonry construction assemblies [S]. Farmington: American Concrete Institute, 2007.
- [17] Concrete Association of Finland. RakMK B4:1991 High strength concrete supplementary rules and fire design [S]. Helsinki: Concrete Association of Finland, 1991.
- [18] CASTILLO C, DURRANI A J. Effect of transient high temperature on high-strength concrete [J]. ACI Materials Journal, 1990, 87(1):47 – 53.
- [19] ABRAMS M S. Compressive strength of concrete at temperatures to 1600 F [J]. ACI Special Publication, 1971, 25:33 – 58.
- [20] DIEDERICHS U, JUMPPANEN U M, SCHNEIDER U. High temperature properties and spalling behavior of high strength concrete [C]//Proceedings of the Fourth Weimar Workshop on High Performance Concrete: Material Properties and Design. Weimar: HAB, 1995:219 – 236.
- [21] FURUMURA F, ABE T, SHINOHARA Y. Mechanical properties of high strength concrete at high temperatures [C]//Proceedings of the Fourth Weimar Workshop on High Performance Concrete: Material Properties and Design. Weimar: HAB, 1995:237 – 254.
- [22] HAMMER T A. Compressive strength and e-modulus at elevated temperatures [R]. Trondheim: [s. n.], 1995.
- [23] CHAN S Y N, PENG G F, ANSON M. Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal-strength concrete after exposure to high temperatures [J]. Cement and Concrete Composites. 1999, 21(1):23 – 27.

(编辑 赵丽莹)