# 高温后 RPC 立方体抗压强度退化规律研究

李海艳，郑文忠，罗百福

（哈尔滨工业大学 土木工程学院，150090 哈尔滨）

**摘　要**：为摸清活性粉末混凝土（RPC）的高温爆裂情况及高温后立方体抗压强度的退化规律，对300个70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm的RPC立方体试件和120个40 mm×40 mm×160 mm的RPC棱柱体试件进行高温试验与高温后抗压试验，考察纤维种类、纤维掺量、温度、尺寸效应等因素对RPC立方体抗压强度及受压破坏特征的影响。结果表明：单掺钢纤维体积率为2%或单掺聚丙烯纤维体积率为0.3%时可以有效防止RPC发生爆裂；钢纤维可以有效提高RPC高温后立方体抗压强度并改善其受压破坏特征，聚丙烯纤维对抗压强度有不利影响. 高温后RPC立方体抗压强度随经历温度的升高呈先增大后减小的变化规律，通过回归分析，建立了RPC立方体抗压强度随温度变化的计算公式.

**关键词**：活性粉末混凝土（RPC）；高温；立方体抗压强度；尺寸效应；破坏特征

**中图分类号**：TU528.31　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0367－6234(2012)04－0017－06

# Experimental research on compressive strength degradation of reactive powder concrete after high temperature

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

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

**Abstract**: To study the explosive spalling and compressive strength degradation of reactive powder concrete (RPC) after high temperature treatment, the high temperature test and compression test were carried out by 300 cube specimens with the size of 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm and 120 prism specimens with the size of 40 mm×40 mm×160 mm. The effects of fiber type, fiber content, heating temperature and specimen size on the compressive strength and failure characteristic of RPC were analyzed. The results indicate that the steel fiber volume dosage of 2% or polypropylene fiber volume dosage of 0.3% can effectively prevent RPC from spalling. The presence of steel fiber has active effect on the compressive strength of RPC after high temperature, and polypropylene fiber has adverse effect on the compressive strength. The compressive strength of RPC after high temperature increases first and then decreases with the increasing of temperatures. By regression analysis, the equations to express the relationship between compressive strength of RPC and exposure temperatures are proposed.

**Key words**: reactive powder concrete (RPC); high temperature; compressive strength; size effect; failure characteristic

高温后混凝土立方体抗压强度对火灾后混凝土结构的损伤评估与鉴定加固具有重要意义. 国内外学者对普通混凝土与高强混凝土的高温抗压性能进行研究发现，普通混凝土高温后立方体抗压强度随经历温度的升高总体呈下降趋势，300 ℃以内，抗压强度下降不明显，400 ℃作用后，抗压强度明显下降，600 ℃作用后，抗压强度已降至常温的35%左右[1-2]；高强混凝土高温后立方体抗压强度200 ℃开始下降，400 ℃已下降至常温的85%左右，600 ℃前，高强混凝土抗压强

**收稿日期**：2011－04－13.
**基金项目**：国家教育部长江学者奖励计划资助项目（2009－37）.
**作者简介**：李海艳（1983—），女，博士研究生；
郑文忠（1965—），男，博士生导师，长江学者特聘教授.
**通讯作者**：李海艳，haiyan126@163.com.

度退化速率比普通混凝土快,600 ℃后,退化趋势缓于普通混凝土[3-5]. 高强混凝土快速升温易发生爆裂,为避免爆裂,文献[6-7]在高强混凝土中掺入体积率1%、长度25 mm的钢纤维和体积率0.2%、长度15 mm的单丝聚丙烯纤维,并进行高温试验测得,经历温度低于400 ℃时,高强混凝土高温后立方体抗压强度退化较慢,超过400 ℃后强度退化加快,且高温试验过程中无爆裂发生.

活性粉末混凝土(reactive powder concrete 简称RPC)是一种具有超高强度、高韧性、高耐久性和低渗透性的水泥基复合材料,其组份为水泥、石英砂、硅灰、高效减水剂、钢纤维等[8]. RPC与普通混凝土及高强混凝土的区别在于:(1)用石英砂代替粗骨料,并掺入硅灰、矿渣等活性掺合料,优化了颗粒级配,提高了内部结构的均匀性和基体密实度;(2)采用高效减水剂,减少用水量,降低了孔隙率;(3)高温养护加速水泥水化反应并增进火山灰反应,改善了水化产物的微观结构;(4)在集料中添加小尺寸的钢纤维,提高了韧性和延性. 以上特点使得活性粉末混凝土的高温力学性能不同于普通混凝土及高强混凝土.

为研究高温后RPC立方体抗压强度的退化规律,完成300个70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm的RPC立方体试件和120个40 mm×40 mm×160 mm的RPC棱柱体试件经20、120、200、300、400、500、600、700、800、900 ℃高温后的抗压试验,研究了纤维种类、纤维掺量、温度历程、尺寸效应等因素对RPC立方体抗压强度和受压破坏特征的影响,建立了活性粉末混凝土立方体抗压强度随温度变化的计算公式.

## 1 试件设计

### 1.1 试验原材料

选用黑龙江宾州水泥有限公司生产的"虎鼎牌"P.O42.5级普通硅酸盐水泥;$SiO_2$含量94.5%,比表面积20 780 $m^2/kg$的微硅粉;比表面积为475 $m^2/kg$的S95型矿渣粉;哈尔滨晶华水处理材料有限公司生产的40~70目和70~140目石英砂;山东莱芜纹河化工有限公司生产的FDN浓缩型高效减水剂;长度13 mm,直径0.22 mm的鞍山昌宏钢纤维厂生产的高强平直钢纤维;长度18~20 mm的聚丙烯(PP)纤维.

### 1.2 配合比确定

课题组通过前期试配试验确定了RPC的最佳基准配合比[9]. 本试验在此基准配比的基础上,通过单掺体积率为1%、2%和3%的钢纤维,单掺体积率为0.1%、0.2%和0.3%的聚丙烯纤维及不同体积率的钢纤维和聚丙烯纤维混掺等,研究纤维种类和掺量变化对高温后RPC立方体抗压强度的影响,具体配比见表1.

**表1 试验用RPC配合比**

| 编号 | 水胶比 | 胶凝材料 | | | 石英砂/水泥 | 减水剂/胶凝材料 | 钢纤维体积掺量/% | 聚丙烯纤维体积掺量/% | $f_{cu}$/MPa |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 水泥 | 硅灰/水泥 | 矿渣粉/水泥 | | | | | |
| RPC | 0.2 | 1 | 0.3 | 0.15 | 1.2 | 0.04 | 0 | 0.0 | 136.43 |
| SRPC1 | 0.2 | 1 | 0.3 | 0.15 | 1.2 | 0.04 | 1 | 0.0 | 150.74 |
| SRPC2 | 0.2 | 1 | 0.3 | 0.15 | 1.2 | 0.04 | 2 | 0.0 | 164.73 |
| SRPC3 | 0.2 | 1 | 0.3 | 0.15 | 1.2 | 0.04 | 3 | 0.0 | 170.46 |
| PRPC1 | 0.2 | 1 | 0.3 | 0.15 | 1.2 | 0.04 | 0 | 0.1 | 107.52 |
| PRPC2 | 0.2 | 1 | 0.3 | 0.15 | 1.2 | 0.04 | 0 | 0.2 | 105.80 |
| PRPC3 | 0.2 | 1 | 0.3 | 0.15 | 1.2 | 0.04 | 0 | 0.3 | 104.73 |
| HRPC1 | 0.2 | 1 | 0.3 | 0.15 | 1.2 | 0.04 | 2 | 0.1 | 161.61 |
| HRPC2 | 0.2 | 1 | 0.3 | 0.15 | 1.2 | 0.04 | 2 | 0.2 | 157.24 |
| HRPC3 | 0.2 | 1 | 0.3 | 0.15 | 1.2 | 0.04 | 1 | 0.2 | 140.55 |

注:表中$f_{cu}$为70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm试件的常温立方体抗压强度.

### 1.3 试件制备与养护

RPC制备过程中的投料顺序、搅拌时间及养护制度需按一定要求进行. 首先将称量好的石英砂、水泥、硅灰、矿渣、减水剂依次倒入SJD60型单卧轴强制式混凝土搅拌机,干拌3 min;然后向搅拌机内加入称量好的水,搅拌6 min;再均匀撒入钢纤维和聚丙烯纤维搅拌6 min出料. 将拌合物注入钢模,在混凝土振动台上经高频振动成型,标准环境下静置24 h后拆模,然后将试件放入90 ℃的混凝土加速养护箱内养护3 d,再在标准养护室养护60 d拿出晾干,2个月后进行高温试验.

为研究纤维种类和掺量变化对高温后 RPC 立方体抗压强度的影响,本试验共成型 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm 的立方体试件 300 个;为研究尺寸效应对活性粉末混凝土立方体抗压强度的影响,针对素 RPC、SRPC2、PRPC3 与 HRPC2 成型 40 mm × 40 mm × 160 mm 的试件 120 块. 每 3 个试件为一组,试验数据取 3 个试件的平均值,边长 70.7 mm 试件的常温立方体抗压强度 ($f_{cu}$) 见表 1.

## 2　试验方案与测试内容

### 2.1　试验方案

试验设计目标温度为:20、120、200、300、400、500、600、700、800、900 ℃. 为避免含湿量过大导致升温过程中 RPC 发生爆裂,将 200 ~ 900 ℃高温试验所用试件在 120 ℃烘箱内进行 24 h 烘干,高温试验采用电炉升温. 立方体抗压试验按照《建筑砂浆基本性能试验方法》(JGJ70—2009)的要求在 YA - 2000 电液式压力试验机上进行.

### 2.2　恒温时间测定

为了避免升温速度过快导致试件爆裂,升温速度定为 4 ℃/min. 当炉温达到目标温度后,需要恒温一定时间以使试件内外温度趋于一致. 为确定恒温时间,在立方体试件中心部位预埋热电偶(图 1),以便进行试件中心温度与炉膛温度的对比测量.

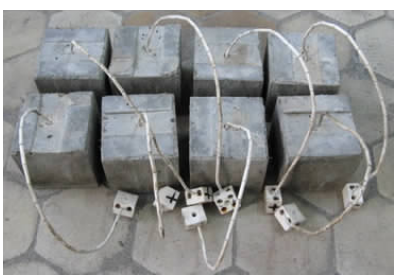


**图 1　内置热电偶立方体试件**

表 2 列出了各目标温度下试件中心温度随恒温时间的变化情况. 由表可知,恒温 2 h 后,试件中心温度比炉温低 30 ℃左右,继续恒温 3 ~ 4 h 后,温差变化不大,因此,将恒温时间定为 2 h. 图 2是目标温度为 200、400、600、800 ℃时实际炉温与试件中心温度的升温曲线. 冷却方式为炉内自然冷却至 200 ℃后打开炉门冷却至 100 ℃,然后取出试件置于室内,令其自然冷却至室温.

### 2.3　主要测试内容

试验主要内容:(1)RPC 高温试验并观察记录试验过程中的试验现象;(2)高温后 RPC 立方体抗压强度试验,用于研究纤维种类、纤维掺量、温度历程和试件尺寸对立方体抗压强度的影响.

**表 2　目标温度下试件中心温度随恒温时间变化　℃**

| 炉温 | 恒温 2 h | 恒温 3 h | 恒温 4 h |
|---|---|---|---|
| 200 | 169 | | |
| 300 | 263 | 271 | 276 |
| 400 | 384 | | |
| 500 | 469 | | |
| 600 | 563 | 574 | 581 |
| 700 | 661 | | |
| 800 | 778 | | |
| 900 | 871 | | |

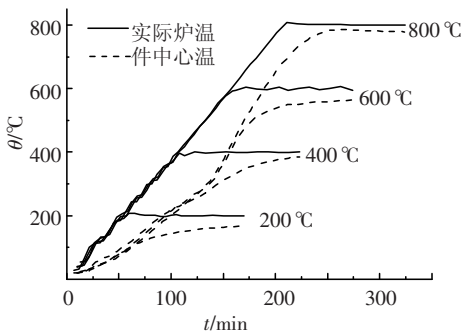



**图 2　炉温与试件中心温度随时间变化曲线**

## 3　试验结果与分析

### 3.1　高温试验现象

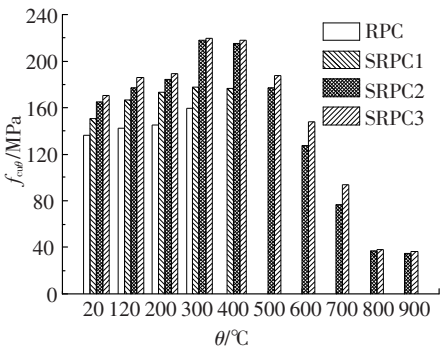
通过肉眼观察和电镜扫描分析发现,纤维种类和掺量不同的活性粉末混凝土随经历温度的升高材料物理化学变化基本一致. 200 ℃以内,试件表面颜色同常温下颜色一致为青灰色,试件内的自由水蒸发,C - S - H 凝胶结构完整、密实,$Ca(OH)_2$结晶排列整齐;升温至 300 ~ 400 ℃,试件表面呈棕褐色,C - S - H 凝胶开始脱水分解,$Ca(OH)_2$少量分解,RPC 层间结构开始破坏,出现细微裂纹;升温至 500 ~ 600 ℃,试件表面呈黑褐色,C - S - H 凝胶体继续脱水,$Ca(OH)_2$ 大量分解,生成游离氧化钙,冷却后氧化钙与空气中的水分结合生成 $Ca(OH)_2$,体积膨胀,裂缝增多,强度显著下降;升温至 700 ~ 900 ℃,试件表面呈黄白色,结构疏松严重,产生大量龟裂裂纹,钢纤维失去作用,800 ℃后钢纤维轻折即断. 由上述分析可知,400 ℃前以物理变化为主,400 ℃后以化学变化为主.

由于 RPC 不含粗骨料,内部结构较高强混凝土更加密实,升温过程中出现了爆裂现象. 400 ℃恒温结束后,素 RPC 与 PP 纤维体积掺量为 0.1% 的 PRPC1 爆裂成大小不一的碎块;500 ℃恒温结

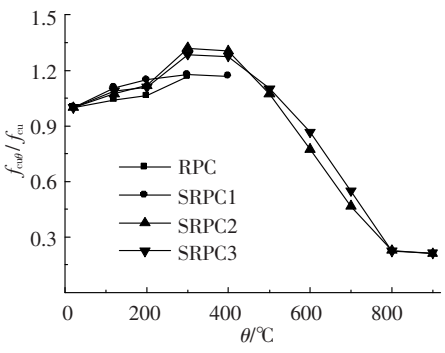
束后,钢纤维体积掺量为 1% 的 SRPC1 产生较宽爆裂裂纹,试件已没有相对平整的表面,后续抗压强度试验无法进行;700 ℃恒温结束后,PP 纤维体积掺量为 0.2% 的 PRPC2 爆裂成碎块. 高温试验过程中钢纤维掺量为 2% 和 3% 的 RPC 在 360 ~ 550 ℃范围内发出爆裂声,但恒温结束后试件基本完好;PP 纤维掺量为 0.3% 的 PRPC3 在 450 ~ 580 ℃范围内发出爆裂声,恒温结束后试件基本完好;混掺纤维的 RPC 高温试验过程中基本无爆裂. 由此可知,钢纤维通过提高 RPC 抗拉强度抑制爆裂的发生,体积掺量为 2% 时可以有效防止 RPC 发生爆裂;聚丙烯纤维融化后互相连通的孔洞为蒸汽溢出提供通道,掺入聚丙烯纤维可以推迟起爆温度,体积掺量为 0.3% 时可以防止爆裂发生;混掺两种纤维时,一方面钢纤维提高了抗拉强度,另一方面聚丙烯纤维缓解了蒸汽压力,二者共同作用抑制爆裂效果显著.

### 3.2 高温后立方体抗压强度

为研究不同高温作用后,纤维种类和掺量变化对 RPC 立方体抗压强度的影响,图 3 ~ 5 给出了边长为 70.7 mm 的 RPC 高温后立方体抗压强度($f_{cu\theta}$)、及其与常温抗压强度的比值($f_{cu\theta}/f_{cu}$)随温度的变化规律.

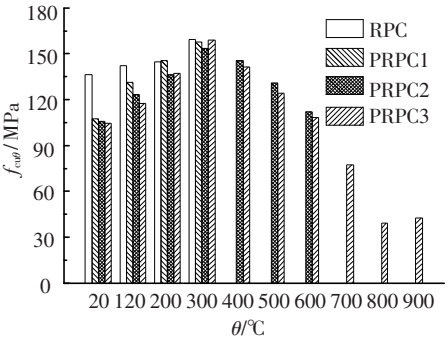



(a) 绝对值

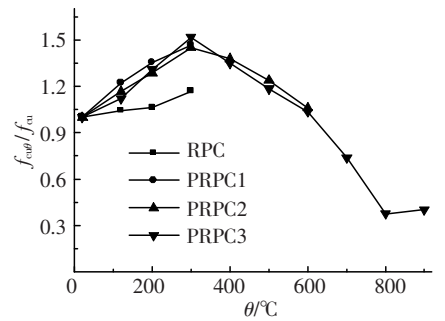



(b) 相对值

**图 3 钢纤维 RPC 高温后立方体抗压强度**

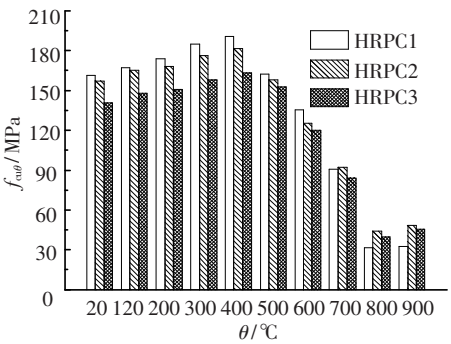



(a) 绝对值

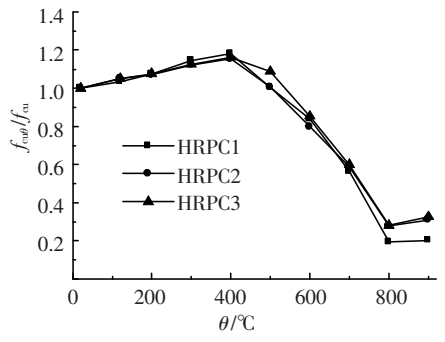



(b) 相对值

**图 4 聚丙烯纤维 RPC 高温后立方体抗压强度**




(a) 绝对值




(b) 相对值

**图 5 混掺钢纤维与聚丙烯纤维的 RPC 高温后立方体抗压强度**

从图中可以看出:掺不同纤维的 RPC 立方体抗压强度随经历温度的升高变化规律基本一致,均随经历温度的升高先增大后减小,单掺纤维的

RPC 临界温度为 300 ℃,而混掺纤维的 RPC 临界温度为 400 ℃. 钢纤维的掺入可以有效提高高温后 RPC 立方体抗压强度,在各对应温度下,RPC 的立方体抗压强度随钢纤维掺量的增加逐渐增大;聚丙烯纤维对抗压强度有不利影响,在各对应温度下,立方体抗压强度基本上随 PP 纤维掺量的增加而减小.

分析上述结果产生原因:活性粉末混凝土中含有硅灰、矿渣等活性掺合料,经历小于400 ℃的高温作用后,相当于经历了"高温养护"的过程,使得二次水化反应更加充分,强度较常温也相应提高. 钢纤维的掺入抑制了由于快速温度变化(升温或冷却过程中)而产生的混凝土体积变化,另外,由于钢纤维具有更好的热传导性能,使得混凝土在高温下更快地达到内外温度的均匀一致,减小温度应力,因此,掺入钢纤维可以有效提高 RPC 高温后抗压强度;聚丙烯纤维熔点较低,融化后互相连通的孔洞为蒸汽溢出提供了通道,但同时也增加了 RPC 的内部缺陷,所以抗压强度随 PP 纤维掺量的增加而减小.

### 3.3　试件尺寸对抗压强度的影响

图 6 为掺不同纤维的 RPC 尺寸换算系数 $f_{cu}^{70.7}/f_{cu}^{40}$ 随经历温度的变化规律. $f_{cu}^{40}$ 为将 40 mm × 40 mm × 160 mm 的棱柱体试件折断后,按照《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T17671—1999)的要求测得的抗压强度,$f_{cu}^{70.7}$ 为边长 70.7 mm 试件的立方体抗压强度. 从图中可以看出:300 ℃内,尺寸换算系数变化不大,同常温接近;400 ~ 600 ℃作用后,各 RPC 尺寸换算系数随经历温度的升高逐渐增大,但增幅不大;700 ℃作用后,尺寸换算系数突增,达到峰值;800 ~ 900 ℃作用后,尺寸换算系数再次减小. 原因为:300 ℃以内,不同尺寸的 RPC 受高温作用后,内外物象变化不大,所以,尺寸换算系数变化不大;400 ~ 600 ℃作用后,试件由内到外火损程度逐渐加重,大尺寸试件内部受高温作用时间短、损伤小,抗压强度随温度降幅较缓,小尺寸试件内外损伤都较大,抗压强度随温度降幅要陡些,所以此温度范围内尺寸换算系数逐渐增大;经 700 ℃高温作用后,边长 40 mm 的试件受高温作用引起的强度损失远大于边长 70.7 mm的试件,因此二者比值 $f_{cu}^{70.7}/f_{cu}^{40}$ 突增;800 ~ 900 ℃高温作用后,边长70.7 mm试件的强度损失进一步加剧,其立方体抗压强度低于边长 40 mm的试件,尺寸换算系数再次减小.

将素 RPC、掺钢纤维的 RPC(SRPC2 和 HRPC2)、PRPC3 在上述各温度段内的尺寸换算系数 $f_{cu}^{70.7}/f_{cu}^{40}$ 取算术平均值汇总于表 3. 从表中可以看出:素 RPC 与 PRPC3 的立方体抗压强度受试件尺寸的影响小于掺钢纤维的 RPC. 主要因为钢纤维体积掺量大于聚丙烯纤维,它的掺入增加了 RPC 内部缺陷出现的几率,试件尺寸越大,钢纤维 RPC 内大缺陷出现的概率也越大,因此受尺寸效应的影响较大.

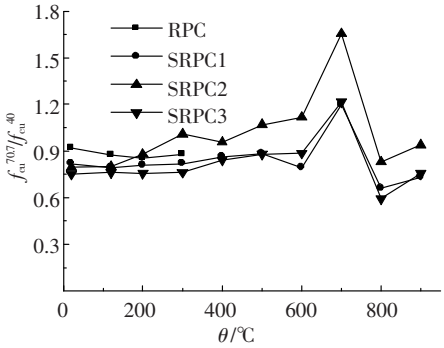



**图 6　掺不同纤维的 RPC 尺寸换算系数随温度变化曲线**

**表 3　不同温度段内 RPC 尺寸换算系数平均值**

| 温度范围/℃ | 尺寸换算系数 $f_{cu}^{70.7}/f_{cu}^{40}$ | | |
|---|---|---|---|
| | 素 RPC | 掺钢纤维 RPC | PRPC3 |
| 室温 ~ 300 | 0.88 | 0.78 | 0.87 |
| 400 ~ 600 | | 0.86 | 1.05 |
| 700 | | 1.21 | 1.66 |
| 800 ~ 900 | | 0.69 | 0.88 |

### 3.4　RPC 立方体受压破坏特征分析

#### 3.4.1　纤维对 RPC 常温受压破坏特征的影响

图 7(a)为钢纤维掺量不同的 RPC 常温时的受压破坏形态. 由于活性粉末混凝土强度很高,试件破坏时,积聚在试验机上的能量急剧释放,给试块以剧烈的冲击. 素 RPC 受压时呈突然性的脆性破坏,破坏时发出巨大的响声,同时碎块向四周飞溅. 掺入钢纤维的试块,裂缝形成后,桥架于裂缝间的钢纤维开始工作,延迟裂缝的扩展,由于钢纤维从基体拔出时需消耗大量能量,与素 RPC 相比,破坏时先听到钢纤维被拔出的撕裂声,随后试件发出巨响而最终破坏,破坏后出现许多裂纹,无碎块迸裂,且整体性较好,随着钢纤维掺量的增加,试件破坏后的完整性也更好. 可见,钢纤维的掺入极大地改善了 RPC 的受压破坏性能.

图 7(b)为聚丙烯(PP)纤维掺量不同的 RPC 常温时的受压破坏形态. PP 纤维作为一种低弹性模量的有机纤维,其约束阻裂效果比钢纤维差,对 RPC 破坏特征的影响也较小. 掺量很低时,其破坏特征与素 RPC 相近,随着掺量的增加,脆性破

坏程度较素 RPC 有所改善,且破坏时声音明显变小,试件的破坏面上可见被拉断的 PP 纤维以及由纤维连接的 RPC 小碎片.

0 1% 2% 3%

(a) 钢纤维体积掺量变化

0.1% 0.2% 0.3%

(b) 聚丙烯纤维体积掺量变化

**图 7 纤维种类和掺量不同的 RPC 常温受压破坏形态**

3.4.2 温度对 RPC 受压破坏特征的影响

图 8(a)为钢纤维 RPC 经历不同高温后的受压破坏形态. 随经历温度的升高,钢纤维 RPC 破坏时发出的响声先增大后减小,200 ~ 500 ℃高温后,破坏特征同常温相似,为脆性破坏,600 ℃后,当应力达到峰值后,出现明显的卸载过程,破坏形式明显呈现塑性.

图 8(b)为聚丙烯(PP)纤维 RPC 经历不同高温后的受压破坏形态. 由于聚丙烯纤维熔点较低为 165 ℃,200 ~ 500 ℃高温后,RPC 中的聚丙烯纤维熔化,抗压破坏特征与素 RPC 相似,破坏时无明显塑性变形,呈突然性的脆性破坏,600 ~ 900 ℃高温后,RPC 抗压强度急剧下降,破坏时出现明显的卸载过程,破坏形式转为塑性破坏.

200 ℃ 400 ℃ 600 ℃ 800 ℃

(a) 钢纤维 RPC

200 ℃ 400 ℃ 600 ℃ 800 ℃

(b) PP 纤维 RPC

**图 8 经历不同高温后的 RPC 受压破坏形态**

## 4 高温后立方体抗压强度统计分析

鉴于掺钢纤维与单掺聚丙烯纤维的 RPC 立方体抗压强度随经历温度的变化规律有较大不同,分别提出如式(1)和式(2)所示的线性拟合公式,理论曲线与试验数据绘于图 9.

钢纤维体积掺量为 1% ~3% 的 RPC(单掺钢纤维、混掺纤维)高温后立方体抗压强度的计算公式为

$$\frac{f_{cu\theta}}{f_{cu}}=\begin{cases}0.58\left(\dfrac{\theta}{1\,000}\right)+0.99,\\ (20\ ℃\leqslant\theta\leqslant 400\ ℃,\quad R^2=0.91)\\ -2.14\left(\dfrac{\theta}{1\,000}\right)+2.08.\\ (400\ ℃<\theta\leqslant 900\ ℃,\quad R^2=0.95)\end{cases}\tag{1}$$

单掺 PP 纤维体积率为 0.1% ~0.3% 的 RPC 高温后立方体抗压强度的计算公式为

$$\frac{f_{cu\theta}}{f_{cu}}=\begin{cases}1.72\left(\dfrac{\theta}{1\,000}\right)+0.97,\\ (20\ ℃\leqslant\theta\leqslant 300\ ℃,\quad R^2=0.97)\\ -1.94\left(\dfrac{\theta}{1000}\right)+2.12.\\ (300\ ℃<\theta\leqslant 900\ ℃,\quad R^2=0.95)\end{cases}\tag{2}$$

式中:$f_{cu\theta}$ 为高温后的立方体抗压强度;$f_{cu}$ 为常温时的立方体抗压强度;$\theta$ 为经历温度;$R^2$ 为相关系数.

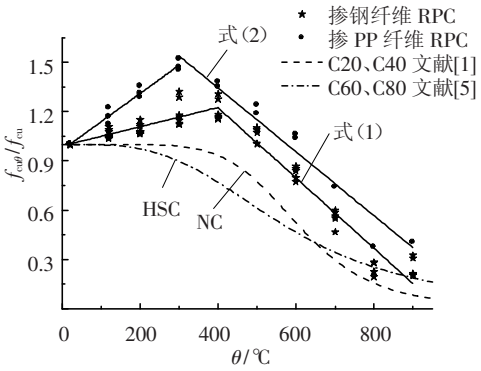



**图 9 高温后 RPC 立方体抗压强度与温度关系曲线**

图 9 中 NC 为普通混凝土线性回归曲线[1],HSC 为高强混凝土线性回归曲线[5]. 通过对比分析可知:相对于普通混凝土与高强混凝土,活性粉末混凝土在 400 ℃以内抗压强度随经历温度的升高明显增大,600 ℃作用后强度明显下降. 这主要由于活性粉末混凝土不含粗骨料,内部结构较 NC 和 HSC 更加密实,但钢纤维与聚丙烯纤维的掺入缓解了因结构密实而造成的高温损伤,且钢纤维的掺入可有效提高 RPC 高温后力学性能.

## 5 结 论

1) RPC 升温过程出现爆裂现象. 钢纤维体积掺量为 2% 时可有效抑制爆裂发生;聚丙烯纤维对爆裂改善作用不明显,体积掺量为 0.3% 时才可防止爆裂发生;两种纤维混掺时,一方面钢纤维提高了抗拉强度,另一方面聚丙烯纤维缓解了蒸汽压力,二者共同作用抑制爆裂效果显著.

(下转第 49 页)