

## 活性粉末混凝土高温后超声研究及微观分析\*

龚建清<sup>†</sup>, 邓国旗, 单波

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**为研究超声波法对活性粉末混凝土(RPC)高温后性能评价的普适性,进行100℃、200℃、300℃、400℃、500℃、600℃、700℃和800℃的高温试验,对比分析了相对波速、损伤度、相对主频和相对幅值4个参数与受热温度、抗压强度损失率的关系,并利用扫描电镜(SEM)研究了不同高温后RPC的微观结构变化.结果表明:对于活性粉末混凝土,采用损伤度和相对波速评价其高温后性能相关性较好,其中,拟合值与试验值相关性最好的是损伤度,能较准确地反映RPC的受损程度;而相对主频和相对幅值,其拟合值与实验值的相关性最小,评价结果差别较大;随着温度的升高,RPC内部缺陷开始增多,基体与纤维界面出现裂纹,微观结构不断恶化,抗压强度损失率增大.

**关键词:**活性粉末混凝土;高温;超声波法;抗压强度损失率;扫描电镜

**中图分类号:**TU528.31

**文献标志码:**A

## Ultrasonic Test and Microscopic Analysis of Reactive Powder Concrete Exposed to High Temperature

GONG Jianqing<sup>†</sup>, DENG Guoqi, SHAN Bo,

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** In order to investigate the adaptation of ultrasonic test in evaluating the performance of reactive powder concrete (RPC) after high temperature exposure, the high temperature tests under 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C and 800 °C were performed. The relationship between the four parameters (relative wave velocity, damage degree, relative frequency and relative amplitude) and temperature as well as compressive strength loss rate was analyzed. The microstructure of RPC was also studied by scanning electron microscopy (SEM) technique after exposure to high temperature. The results showed that adopting the parameters of damage degree and relative velocity to evaluate the performance of RPC after high temperature was better than adopting the parameters of relative frequency and relative amplitude. The correlation of the fitting value of damage degree with experimental value was the largest, which can accurately reflect the damage degree of RPC. On the contrary, the fitting value of relative frequency and relative amplitude showed little correlation with the experimental value. With the increasing of the elevated temperature, the internal defects of RPC exacerbated, and the cracks at the bonding interface of fiber and the matrix occurred gradually, which illustrated that the micro-structure of RPC deteriorated constantly and the loss rate of compressive strength increased gradually.

**Key words:** RPC; high temperature; ultrasonic testing; compressive strength loss rate; SEM

\* 收稿日期:2017-01-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278180), National Natural Science Foundation of China(51278180)

作者简介:龚建清(1963—),男,湖南湘乡人,湖南大学副教授,博士

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: gongjianqing@hnu.edu.cn

混凝土遭受火灾后内部结构复杂, 给其损伤评估带来较多困难. 目前国内外进行混凝土结构火灾诊断时, 以偏向定性的方法为主、多种方法相结合来做出科学的评估, 如表观检测、超声波法、钻芯法, 以及中性化深度检测、红外热像法、电化学法等新技术、新方法<sup>[1-4]</sup>. 陆洲导等<sup>[5]</sup>采用差热分析、热重分析、碳化深度、回弹等检测方法研究了混凝土结构在遭受火灾后的强度试验; Short 等<sup>[6]</sup>从岩相学技术出发, 通过混凝土的裂纹密度来评估其高温后的损伤程度. 其中, 超声波法采用的是一种非破坏的检测方式, 有以下优点: 不会损坏构件的使用性能, 特别是高温后混凝土构件可能存在安全风险, 可避免造成二次灾害; 实现方法多样且方便快捷, 可在混凝土表面直接进行检测; 可多次重复检测, 使检测结果更准确; 另外超声检测法检测设备简单, 检测成本低, 因此广泛应用于工程实际<sup>[7-8]</sup>. Lin 等<sup>[9]</sup>通过研究发现不同种类混凝土高温损伤后的波速变化规律基本类似; 陈华艳<sup>[10]</sup>研究发现超声波法同样适用于钢纤维混凝土的无损检测, 通过回归分析建立了钢纤维混凝土超声波波速和抗压强度之间的关系式; 陈天红<sup>[11]</sup>分析发现损伤度与相对波速、相对幅值比较, 拟合值与实验值的相关性最大, 更能直观地反映出混凝土的受损程度. Canbaz<sup>[12]</sup>研究发现活性粉末混凝土高温后超声波波速在一定范围内随着温度的升高呈现下降趋势.

相比普通混凝土 (Normal Concrete, NC) 及高强混凝土 (High Strength Concrete, HSC), 活性粉末混凝土 (Reactive Powder Concrete, RPC) 强度高、韧性大、耐久性优异, 是一种新型水泥基材料, 其组分为水泥、硅灰、石英砂、外加剂、纤维等, 主要特征有: 用石英砂代替粗骨料, 并掺入硅灰、粉煤灰等活性掺合料, 优化颗粒级配, 基体密度高, 内部结构均匀; 采用高效减水外加剂, 水胶比低; 高温养护, 加快“二次反应”过程, 微观结构得到改善; 一般情况下添加了钢纤维, 其韧性和延性性能得到改善<sup>[13-17]</sup>. 另外, 大量研究发现, 适量的聚丙烯纤维 (PPF) 外掺能有效改善混凝土的耐火性能<sup>[18-19]</sup>. 以上特点使得超声波在活性粉末混凝土 (RPC) 和常规混凝土中的传播特性可能存在差异, 目前关于应用超声波法评价 RPC 高温后性能的报道较少. 因此选取适宜的参数, 使用超声波法研究 RPC 高温后性能变化是非常必要的, 同时可以给 RPC 结构火灾受损及综合评价提供依据.

本文采用 100 mm×100 mm×100 mm 立方体

试件, 进行了活性粉末混凝土 100~800 °C 高温试验, 运用超声波非破损检测法, 以相对波速、相对幅值、相对主频和损伤度作为参数, 评价、分析了不同温度后的 RPC 立方体抗压强度损失率, 同时采用扫描电镜 (SEM) 分析了 RPC 高温后的微观结构变化.

## 1 试验方案

### 1.1 试验原材料

水泥: 南方水泥厂出产的 P.O42.5 级普通硅酸盐水泥, 其主要化学成分见表 1; 硅灰: 贵州产, SiO<sub>2</sub> 质量分数为 93.8%, 比表面积为 18 500 m<sup>2</sup>/kg, 平均粒径为 89 nm; 石英砂: 长沙产, 粒径为 0.45~0.9 mm (20~40 目), SiO<sub>2</sub> 质量分数大于 99%; 石英粉: 长沙产, 平均粒径为 50.2 μm (325 目), 密度为 2.625 g/cm<sup>3</sup>; 钢纤维: 苏州产, 平均长度为 8 mm, 直径为 0.12 mm; 聚丙烯纤维 (PPF): 物理性能指标见表 2; 减水剂: 苏州产, 聚羧酸高效减水剂, 减水率大于 30%; 粉剂; 水: 自来水.

表 1 P.O42.5 水泥的化学组成

ωCaO	ωSiO <sub>2</sub>	ωAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ωMgO	ωFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ωSO <sub>3</sub>	ωLoss
65.30	21.10	5.50	3.20	2.90	2.00	—

表 2 聚丙烯纤维 (PPF) 的物理性能

直径 / μm	长度 / mm	密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	熔点 / °C	抗拉强度 / MPa	弹性模量 / MPa
45	18~20	0.91	165	500	3 850

### 1.2 试件配合比

本试验在基准配比的基础上, 纤维掺量变化为: 单掺 1.0%、2.0%、3.0% 的钢纤维及 3.0% 的钢纤维和 0.2% 的聚丙烯纤维混掺, 具体配比见表 3.

### 1.3 试件制作和养护

RPC 制作使用单卧轴强制式混凝土搅拌机, 搅拌时先将称量好的水泥、粉煤灰、硅灰、石英砂、石英粉及减水剂倒入搅拌机干拌 6 min, 随后在搅拌过程中缓慢加水湿拌 6 min, 最后再均匀撒入钢纤维搅拌 6 min 出料. 将搅拌好的 RPC 浆体倒入钢模, 经振动密实成型, 标准环境下静置 24 h 后拆模, 然后移入 95 °C 热水养护 72 h, 再置于标准养护室养护 56 d. 养护完成, 经实验室自然晾干后, 进行高温试验.

表3 试件基本设计参数

Tab.3 Basic design parameters of specimens

组分	水胶比	胶凝材料配比/(kg·m <sup>-3</sup> )			石英粉配比 /(kg·m <sup>-3</sup> )	石英砂配比 /(kg·m <sup>-3</sup> )	减水剂配比 /(kg·m <sup>-3</sup> )	钢纤维体 积分数/%	聚丙烯纤维体 积分数/%
		水泥	硅灰	粉煤灰					
素 RPC	0.18	896.1	89.6	89.6	89.6	985.7	12.9	0	0
RPC-1	0.18	896.1	89.6	89.6	89.6	985.7	12.9	1.0	0
RPC-2	0.18	896.1	89.6	89.6	89.6	985.7	12.9	2.0	0
RPC-3	0.18	896.1	89.6	89.6	89.6	985.7	12.9	3.0	0
HRPC-3	0.18	896.1	89.6	89.6	89.6	985.7	12.9	3.0	0.2

## 1.4 试验方法

高温试验前将所有试块先放入 105℃±5℃ 的烘箱内烘干 24 h,取出试件,自然冷却至室温,排除含水率对试验的影响,同时避免含湿量过大导致升温过程中爆裂.试验采用电炉升温,设计目标温度为 200℃、300℃、400℃、500℃、600℃、700℃和 800℃,升温速率 5℃/min,由控温系统设定程序自行调控;设计目标温度 100℃组试验采用烘箱处理;其他试验组到达目标温度后恒温 3 h,保证炉温和试件内部温度一致,之后关闭电源,炉内自然冷却至 100℃左右,打开石棉盖继续冷却至室温.

采用武汉岩海公司生产的 RS-ST01D 非金属超声检测仪(HDJC-01-007)测定各温度下 RPC 试件的声速、主频和幅值,每个试件布置 3 对测点,计算平均值;超声测定后,使用压力试验机(YAW-3000)进行受压破坏试验.

## 2 结果与分析

### 2.1 试件表现现象

高温后各组 RPC 的表现现象基本类似,以 HRPC-3 试件为例,具体记录见表 4.

表4 HRPC-3 高温后试验现象

Tab.4 Experimental phenomena of HRPC-3 after different temperature

温度/℃	颜色	敲击声音	裂缝	掉皮、 缺角	其他
20	青灰色	清脆	无	无	无
100	青灰色	清脆	无	无	无
200	青灰色	较清脆	无	无	无
300	微褐色	较清脆	无	无	无
400	棕褐色	平缓	无	无	无
500	褐色	平缓	少量细微裂纹	无	无
600	灰黑色	稍低沉	大量细微裂纹	轻微	钢纤维易折
700	灰白色	较低沉	少量长宽裂纹	少量	部分钢纤维 多次折断
800	黄白色	低沉	裂纹部分贯通	大量	钢纤维轻折易断 外露部分发黑

通过观察发现:20~200℃时,试件外观呈青灰色,敲击声音清脆,表面无裂缝产生,无掉皮缺角现象;300~400℃时,试件开始呈微褐色,敲击声音从

清脆开始趋向平缓;500℃时,试件外观呈褐色,表面开始出现细微裂缝;600~700℃时,试件外观从灰黑色变成灰白色,敲击声音逐渐变得较为低沉,表面少量细微裂缝逐渐扩展,变成长宽裂缝,并开始出现掉皮缺角、钢纤维变软易折等现象;800℃时,试件外观呈现黄白色,敲击声音低沉,表面长宽裂纹部分贯通出现大量网状宽裂缝,同时钢纤维轻折易断、外露部分颜色发黑.

同时高温试验过程中发现有爆裂现象发生.400℃后素 RPC 试件出现不完整现象,爆裂成大小不一的碎块,钢纤维掺量 1%、2%的 RPC 爆裂温度分别为 500℃和 700℃;而钢纤维掺量为 3%的 RPC-3 无爆裂发生,试件表面无裂纹,混掺纤维的 HRPC-3 整个高温试验过程中与 RPC-3 类似,虽有爆裂声但试件无爆裂现象.由此可知,掺入适量的钢纤维可抑制 RPC 的爆裂,且 PPF 熔化后形成互相连通的孔洞,为蒸汽溢出提供通道,降低了 RPC 内部蒸汽压力,也可起到抑制爆裂的作用.

### 2.2 试件质量损失

表 5 为不同钢纤维掺量的 RPC 质量损失率(质量损失与常温质量之比)随温度的变化情况.由表 5 可看出在 800℃内,质量损失率大小基本为:HRPC-3 > RPC-3 > RPC-2 > RPC-1 > 素 RPC,即同一目标温度下,随着钢纤维掺量增加,RPC 质量损失率略有增加,掺入 PPF 的 HRPC-3 由于 PPF 在 165℃后开始熔化,质量损失率略大于 RPC-3;随着温度的升高,各纤维掺量下 RPC 质量损失原因类似:在 200℃前,RPC 质量损失主要缘自自由水的蒸发;200℃时,RPC 的平均质量损失率约为 1.7%;200~400℃时,RPC 的质量损失明显变快,此阶段质量损失主要归因于水化硅酸钙(C-S-H)结合水分解及凝胶水蒸发;400℃时,RPC 的平均质量损失率约为 6.7%;400℃后,RPC 质量损失速度放缓,在 400~600℃时 RPC 质量损失主要是因为化学结合水的损失,如结晶水散失、氢氧化钙(Ca(OH)<sub>2</sub>)脱水分解等;600℃时,RPC 的平均质量损失率约 7.6%;600~800℃时 RPC 质量损失主要来源于碳酸钙(CaCO<sub>3</sub>)的分解,800℃后

RPC 的平均质量损失率为 8.8%左右<sup>[20-21]</sup>.这与 NC 和 HSC 高温质量损失类似.

表 5 不同温度后 RPC 的质量损失率

组分	20 °C	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C
素 RPC	0	0.60	1.42	4.26	—	—	—	—	—
RPC-1	0	0.60	1.57	4.51	6.42	—	—	—	—
RPC-2	0	0.50	1.66	4.93	6.61	7.18	7.43	—	—
RPC-3	0	0.60	1.76	5.41	6.78	7.27	7.51	8.26	8.75
H RPC-3	0	0.60	1.81	5.59	6.96	7.39	7.78	8.53	8.87

### 2.3 试验数据处理

超声波在 RPC 中传播,其波速等特征值受各类因素影响,如骨料种类及粒径、水泥用量、纤维等.为减少或消除这些因素对超声波传播特性的影响,本试验采用相对波速、损伤度、相对主频和相对幅值作为评价参数,如式(1)~(4)所示,式(5)为立方体抗压强度损失率计算式.对实验所测原始数据进行处理,其结果见表 6.

表 6 试验结果数据

分组	温度/°C	相对波速 $v_R$	损伤度 $D$	相对主频 $f_R$	相对幅值 $A_R$	抗压强度损失率/%
素 RPC	100	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00
	200	0.91	0.17	1.00	1.00	-6.03
	300	0.87	0.25	1.00	1.00	-10.79
RPC-1	100	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00
	200	0.93	0.14	1.00	1.00	-4.24
	300	0.88	0.23	0.95	1.00	-6.62
	400	0.75	0.43	0.95	0.99	11.96
RPC-2	100	1.00	0.00	1.05	1.00	0.00
	200	0.94	0.11	1.05	1.00	-6.11
	300	0.88	0.23	1.02	0.99	-10.07
	400	0.79	0.37	0.95	0.99	8.09
	500	0.70	0.51	1.01	1.00	25.04
	600	0.57	0.67	0.95	0.97	42.98
RPC-3	100	1.00	0.00	1.00	1.01	0.00
	200	0.95	0.10	1.05	1.00	-3.99
	300	0.80	0.36	1.00	1.00	-9.29
	400	0.71	0.50	0.95	0.99	7.60
	500	0.57	0.67	0.95	0.99	23.02
	600	0.52	0.73	0.95	0.97	39.37
	700	0.37	0.87	0.95	0.97	58.86
	800	0.34	0.89	1.00	0.97	77.28
H RPC-3	100	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00
	200	0.95	0.10	1.05	1.00	-3.74
	300	0.91	0.17	1.00	0.99	-5.68
	400	0.75	0.44	0.95	1.01	4.59
	500	0.68	0.54	0.95	0.98	19.38
	600	0.59	0.65	0.95	0.97	32.06
	700	0.46	0.79	0.95	0.98	51.98
	800	0.40	0.84	1.00	0.98	72.53

注:抗压强度损失率中负值表示 RPC 在该目标温度下强度增加.

$$v_R = v_T / v_0, \quad (1)$$

$$D = 1 - (v_T / v_0)^2, \quad (2)$$

$$A_R = A_T / A_0, \quad (3)$$

$$f_R = f_T / f_0, \quad (4)$$

$$\Delta F_{cu} = 1 - F_{cuT} / F_{cu0}. \quad (5)$$

式中: $v_R$ 为相对波速; $v_T$ 为 RPC 高温后波速, m/s; $v_0$ 为高温前波速, m/s; $D$ 为 RPC 的损伤度; $A_R$ 为相对幅值; $A_T$ 为高温后首波幅值, dB; $A_0$ 为高温前首波幅值, dB; $f_R$ 为相对主频; $f_T$ 为高温后首波幅值, dB; $f_0$ 为高温前首波幅值, dB; $\Delta F_{cu}$ 为抗压强度损失率; $F_{cuT}$ 为 RPC 高温损伤后抗压强度值, MPa; $F_{cu0}$ 为常温下 RPC 抗压强度值, MPa.

### 2.4 相对波速、损伤度、相对主频和相对幅值与受热温度的关系

RPC 在经受不同温度后,相对波速、损伤度、相对主频和相对幅值 4 个特征参数与温度的关系分别如图 1~图 4 所示.采用合适的函数进行回归分析,拟合结果见表 7.

由表 7 可看出,RPC 的相对波速和损伤度与受热温度拟合曲线的  $R^2$  (相关系数的平方)分别为 0.96 和 0.95,均不小于 0.95,平均绝对误差分别为 0.033 和 0.047,均小于 0.05,平均相对误差分别为 5.4% 和 13.8%,均低于 14%,说明实验值与拟合值吻合较好,两者评价不同纤维掺量的 RPC 性能时,其结果相关性较好;从图 3 和图 4 知,随着温度的变化,相对主频和相对幅值变化较小,同时由表 7 发现,对于相对主频和相对幅值,其与受热温度拟合曲线的  $R^2$  分别为 0.34 和 0.69,说明采用相对主频和相对幅值作为超声波法的参数,评估不同温度作用后 RPC,评价结果存在较大误差.因此,相对波速和损伤度对 RPC 高温作用后性质差异的反映,相对于相对主频和相对幅值,更为敏感,可考虑作为评估参数分析 RPC 高温后的性能变化.

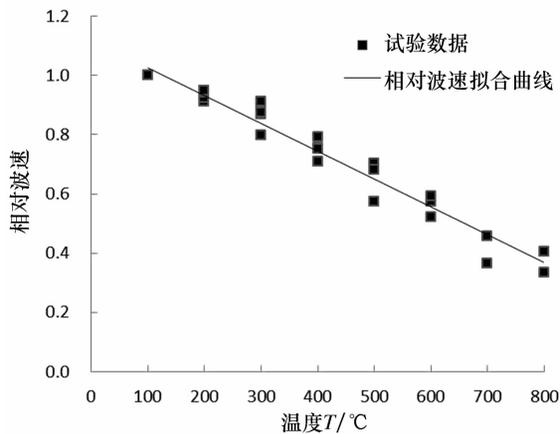


图1 相对波速和受热温度的关系

Fig.1 Relationship between relative velocity and temperature

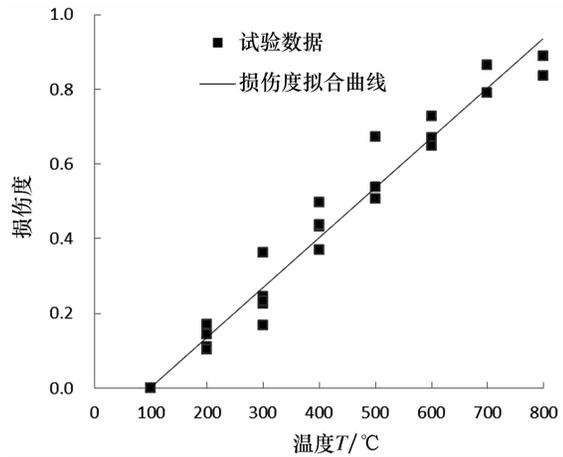


图2 损伤度和受热温度的关系

Fig.2 Relationship between damage degree and temperature

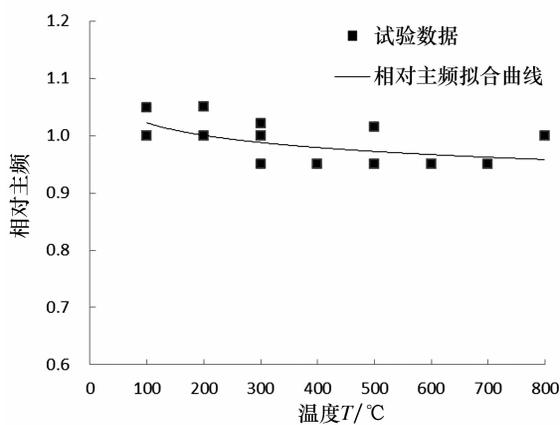


图3 相对主频和受热温度的关系

Fig.3 Relationship between relative frequency and temperature

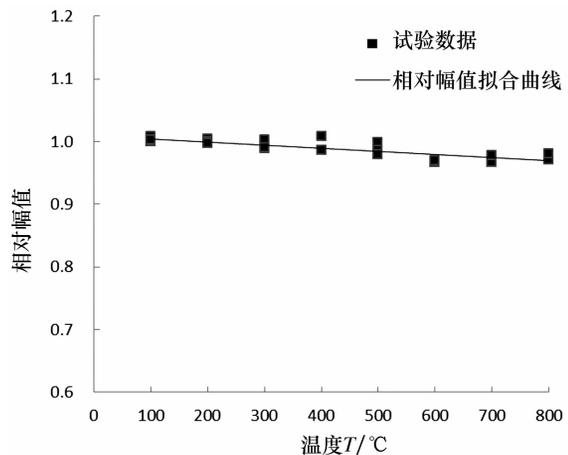


图4 相对幅值和受热温度的关系

Fig.4 Relationship between relative amplitudes and temperature

表7 不同受热温度后RPC各超声参数的拟合结果

Tab.7 Each ultrasonic parameter fitting results of RPC after different temperatures

超声参数	回归拟合公式	$R^2$ (拟合系数的平方)	平均绝对误差	平均相对误差/%
相对波速 $v_R$	$v_R = -0.9 \frac{T}{1000} + 1.12$	0.96	0.033	5.4
损伤度 $D$	$D = 1.3 \frac{T}{1000} - 0.13$	0.95	0.047	13.8
相对主频 $f_R$	$f_R = 1.18T^{-0.031}$	0.34	0.025	2.6
相对幅值 $A_R$	$A_R = -5 \times 10^{-5} T + 1.01$	0.69	0.006	0.6

## 2.5 相对波速、损伤度与立方体抗压强度损失率的关系

根据表6中抗压强度损失率可知,在100~300 °C范围,RPC的抗压强度损失率不大于零,即在300 °C内的RPC抗压强度不低于常温下的RPC抗压强度.这是因为RPC从常温开始升温,一直到300 °C左右,经历了“高温养护”二次水化反应的过程,导

致抗压强度增大,而超声波传播受多种因素影响,并没有反映出这一内部微观变化.但是从结构安全性角度来讲,300 °C前RPC强度的提高对结构是有利的,因此讨论相对波速、损伤度与立方体抗压强度损失率的关系时暂不考虑300 °C内这一区段.

图5和图6所示为RPC的相对波速、损伤度随目标温度变化的试验数据与理论曲线,分别选用合

适的函数(图 5 采用对数函数、图 6 采用指数函数)进行回归分析,所得拟合结果及误差统计见表 8.比较相对波速和损伤度拟合结果,损伤度拟合所得  $R^2$  最大,为 0.95,平均相对误差较小,为 15.0%,即采用损伤度评价 RPC 高温后抗压强度损失率,是可行的.

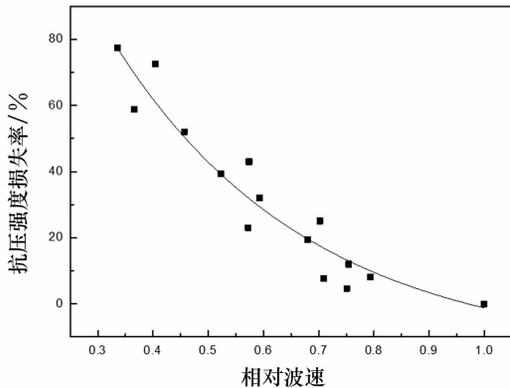


图 5 高温后 RPC 相对波速和抗压强度损失率的关系  
Fig.5 Relationship between relative velocity and compressive strength loss rate of RPC after high temperatures

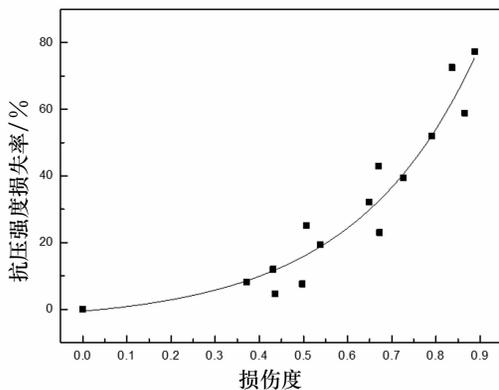


图 6 高温后 RPC 损伤度和抗压强度损失率的关系  
Fig.6 Relationship between damage degree and compressive strength loss rate of RPC after high temperatures

表 8 高温后 RPC 不同超声参数与抗压强度损失率拟合结果

Tab.8 Fitting results between different ultrasonic parameters and compressive strength loss rate of RPC after high temperatures

评价参数	拟合公式	$R^2$	平均绝对误差	平均相对误差/%
$V_R$	$C_1 = -69.94 \ln V_R - 4.28$	0.93	0.057	17.4
$D$	$C_1 = 3.28 e^{3.59D} - 3.88$	0.95	0.040	15.0

注: $C_1$ 表示 RPC 的抗压强度损失率.

### 2.6 微观分析

不同纤维的 RPC 高温后 SEM 基本类似.图 7 为不同温度作用后 RPC 基体 SEM 照片,由图可知:常温下 RPC 内部基体较为紧密、整齐和完整,这是

因为 RPC 不含粗骨料,掺入的硅灰等填入水泥颗粒间的孔隙,养护完成后,硅灰中的活性  $\text{SiO}_2$  与水泥水化生成的产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生火山灰反应,产物为水化硅酸钙 C-S-H 凝胶,其将孔隙填充得更加密实,物相主要是水化硅酸钙 C-S-H 凝胶和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ;200 °C 作用后由基体照片可知,与常温时相比变化不明显,但因为内部自由水和毛细水汽化逸出,某方面来说相当于“养护”过程,水泥水化反应和火山灰反应继续发生,内部  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  被消耗,并生成 C-S-H 凝胶,在宏观上表现为立方体抗压强度较常温下有所提高;400 °C 作用后微观结构较 200 °C 时发生了一定的变化,但仍较为密实,除自由水和毛细孔水基本蒸发外,还伴随有水化硅酸钙 C-S-H 凝胶中的吸附水散失,水泥水化物间联结明显减弱,水泥浆体松散,表面并出现了细小微裂缝,强度较 200 °C 有所下降;600 °C 作用后,水泥水化产物全部分解,水化和未水化的颗粒之间的结合松弛,C-S-H 凝胶破坏,水泥浆体结构破碎,导致 RPC 已不存在连续的或大块的水化产物凝胶体,结构松弛分散,且 573 °C 时, $\alpha$  型石英( $\alpha\text{-SiO}_2$ )相变为  $\beta$  型石英( $\beta\text{-SiO}_2$ ),同时体积突然发生膨胀,在宏观上显示表面出现细长裂纹,强度继续下降;800 °C 作用后 RPC 基体结构呈现蜂窝状,已完全没有了水化硅酸钙 C-S-H 凝胶体,并出现大量孔洞,同时约 750 °C 时,碳化生成的  $\text{CaCO}_3$  受热分解,宏观上大量的贯通裂纹出现在试件表面,内部密实性继续下降,而立方体抗压强度下降为不到原来一半<sup>[22-24]</sup>.

在 RPC 基体中掺入适量的钢纤维可大大改善其延性,并提高火灾后力学性能,抑制高温爆裂,但相应钢纤维和基体界面处变成 RPC 内部薄弱区,成为裂缝出现的高频区.图 8 所示为不同温度作用后 RPC 钢纤维与基体黏结界面的 SEM 照片,由图可知:钢纤维和基体界面处的裂纹随温度升高逐渐形成并发展,界面处越来越疏松,同时升温过程中钢纤维逐渐氧化和脱碳,宏观上表现为强度退化.常温下(如图 8(a)所示)钢纤维与基体黏结界面区密实、完整,宏观上 RPC 的受力性能表现良好,因钢纤维在受力破坏被拔出时,需消耗大量能量;200 °C 作用后(如图 8(b)所示),钢纤维与基体黏结界面与常温时变化不大,仍保持完整致密,钢纤维未发生氧化脱碳;400 °C 作用后(如图 8(c)所示),RPC 钢纤维和基体界面过渡区的孔洞不断增多,并出现微裂缝,这是因为钢纤维和浆体的热膨胀系数不同,过渡区出现应力,同时界面处的水泥浆体随温度升高

变得疏松,钢纤维氧化不明显;600 °C作用后(如图 8 (d)所示),宏观上 RPC 试件表面出现裂纹,钢纤维失去部分作用,强度继续下降,微观上结构继续恶化,从图可知钢纤维与基体界面区裂纹宽度增大,过渡区变得疏松,基体出现裂纹,钢纤维发生明显

氧化和脱碳;800 °C作用后(如图 8(e)所示),钢纤维和基体间裂缝加宽,有脱黏现象,同时钢纤维已完全氧化脱碳,宏观表现为颜色发黑,轻折易断,RPC 强度丧失.

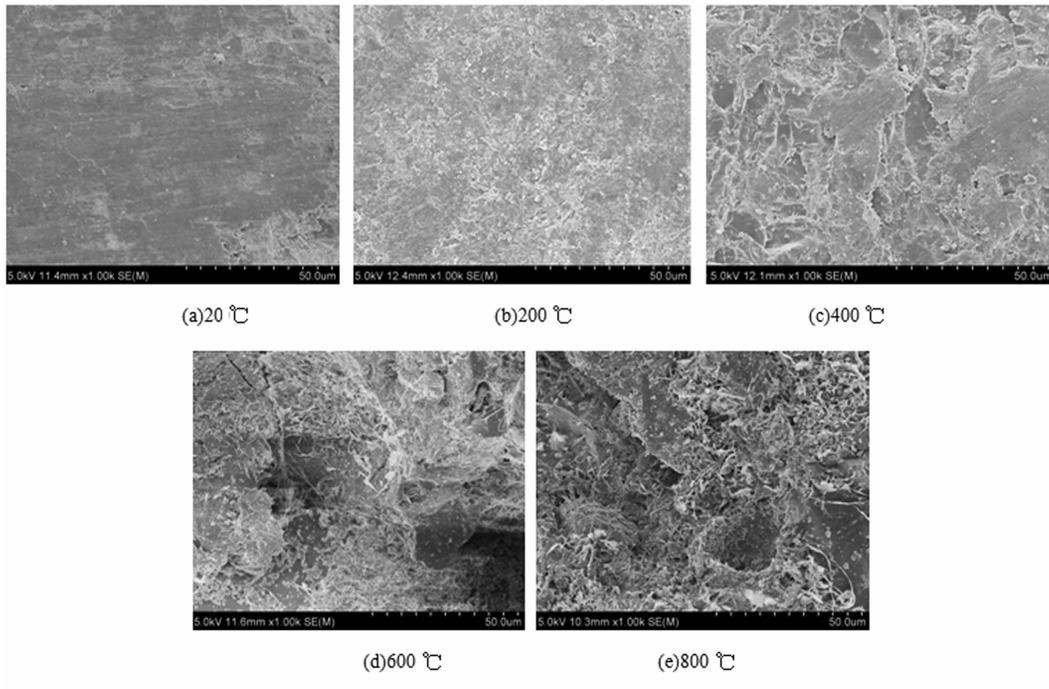


图 7 不同温度作用后 RPC 基体 SEM 照片

Fig.7 SEM images of substrate in RPC after different temperature

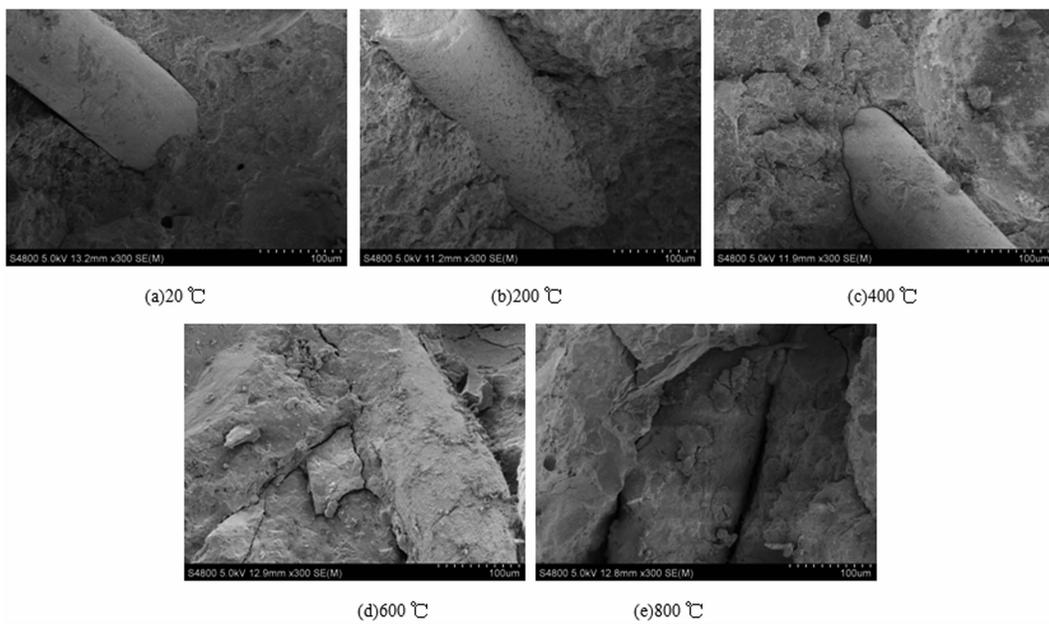


图 8 不同温度作用后 RPC 中钢纤维及其与基体黏结界面 SEM 照片

Fig.8 SEM images of steel fiber and matrix interface in RPC after different temperature

图 9 为不同温度作用后 HRPC 中 PPF 及熔化孔道 SEM 照片,由图可知:常温下 PPF 与基体同样

黏结紧密,界面区密实;随着温度的升高,PPF 在 165 °C左右熔化并在 RPC 内部形成众多相互交织

的孔隙通道,为内部水分蒸发提供孔道,降低蒸气压力,从而抑制了爆裂的发生,但熔化形成的孔隙也增加内部缺陷,二者联合效应在宏观上表现为:

在 400 °C 前,掺 PPF 的 HRPC-3 强度损失率大于不掺 PPF 的 RPC-3 强度损失率,400 °C 后则正好相反.

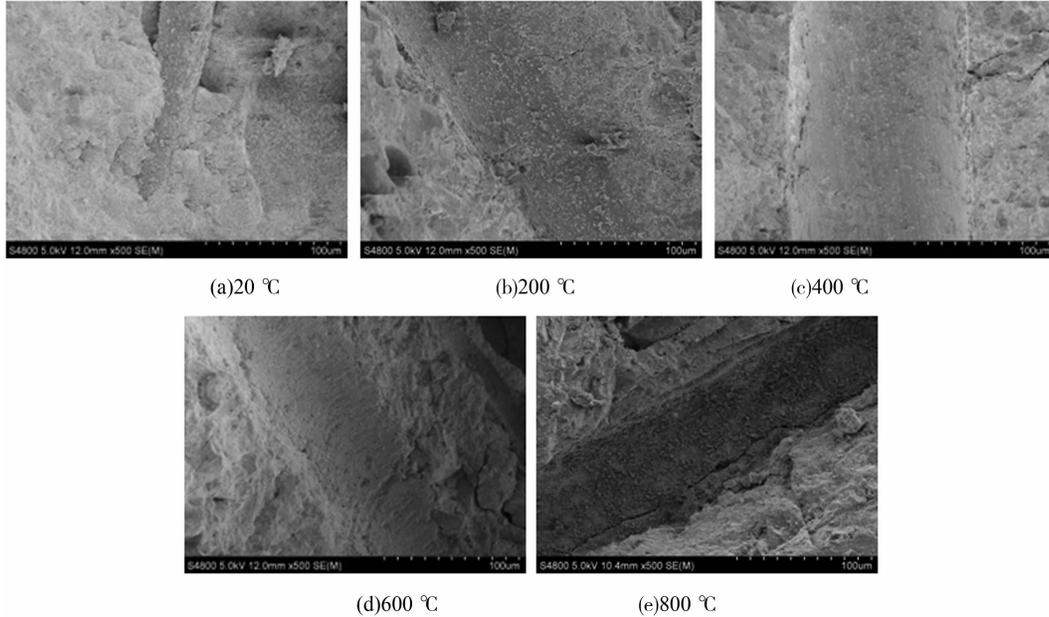


图 9 不同温度作用后 HRPC 中 PPF 及其熔化孔道 SEM 照片

Fig.9 SEM images of PPF and it's melting channel in HRPC after different temperature

### 3 结 论

1)通过增大钢纤维掺量来抑制 RPC 爆裂的发生;同一目标温度下,质量损失率大小为:HRPC-3 >RPC-3 >RPC-2 >RPC-1 >素 RPC,即随着钢纤维掺量增加,RPC 质量损失率增加,掺入 PPF 的 HRPC-3 由于 PPF 在 165 °C 后开始熔化,质量损失率略大于 RPC-3;随目标温度升高,质量损失增大.

2)采用损伤度和相对波速作为评估参数,对高温后 RPC 性能进行评定,评判结果较好,回归公式相关系数较大,拟合度高;而使用相对主频和相对幅值评估高温后 RPC 性能时,试验值与拟合值的相关性较小,评价结果误差较大.即相对波速和损伤度对 RPC 高温作用后受损程度的反映更准确.

3)随着温度升高,RPC 内部凝胶由整体变成分散相、钢纤维与基体交界面形成微裂纹并逐渐扩展.聚丙烯纤维熔化后形成孔道等导致微观结构不断恶化,基体疏松,内部空隙及表面裂纹增多,抗压强度损失率增大.

### 参考文献

[1] 徐峰.几种非破损测试方法的特征及其比较[J].混凝土, 1991 (2):48-51.  
XU F. Characteristics and comparison of several non-

destructive testing methods [J].Concrete, 1991 (2): 48-51. (In Chinese)

- [2] DORSCH D F. Assessment and repair of fire-damaged concrete structures[C]//Innovation in Repair Techniques of Concrete Structures. Reston, Virginia: ASCE, 2015: 1-6.
- [3] 李敏.高强混凝土受火损伤及其综合评价研究[D].南京:东南大学材料科学与工程学院, 2005: 5-12.  
LI M. The fire damage of high strength concrete and its comprehensive evaluation [D]. Nanjing: College of Materials Science and Engineering, Southeast University, 2005: 5-12. (In Chinese)
- [4] 黄政宇, 纪学灵, 黄靓, 等.超声波检测混凝土缺陷成像的定性分析法[J].湖南大学学报(自然科学版), 2008, 35(8): 5-8.  
HUANG Z Y, JI X L, HUANG L, et al. A qualitative analysis method for ultrasonic testing of concrete defects [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2008, 35 (8): 5-8. (In Chinese)
- [5] 陆洲导, 朱伯龙.混凝土结构火灾后的检测方法研究[J].工业建筑, 1995, 25(12): 37-41.  
LU Z D, ZHU B L. Study on the detection method of concrete structure after fire [J]. Industrial Building, 1995, 25 (12): 37-41. (In Chinese)
- [6] SHORT N R, PURKISS J A, GUISE S E. Assessment of fire-damaged concrete using crack density measurements[J]. Structural Concrete, 2002, 3(3): 137-143.
- [7] 王妍.掺聚丙烯纤维高强混凝土高温后红外与超声无损检测研究[D].太原:太原理工大学建筑与土木工程学院, 2011: 1-82.

- WANG Y. Study on infrared and ultrasonic nondestructive testing of polypropylene fiber reinforced high-strength concrete after high temperature [D]. Taiyuan: College of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, 2011; 1–82. (In Chinese)
- [8] CHIANG C H, HUANG C T. Characterization of acoustic wave propagation in a concrete member after fire exposure[J]. AIP Conference Proceedings, 2001, 557(1): 1164–1170.
- [9] LIN Y, HSIAO C, YANG H, *et al.* The effect of post-fire-curing on strength-velocity relationship for nondestructive assessment of fire-damaged concrete strength [J]. Fire Safety Journal, 2011, 46(4): 178–185.
- [10] 陈华艳. 超声波检测在钢纤维混凝土中的应用[D]. 武汉: 华中科技大学土木工程与力学学院, 2005: 23–42.  
CHEN H Y. Application of ultrasonic testing in steel fiber reinforced concrete [D]. Wuhan: School of Civil Engineering & Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, 2005: 23–42. (In Chinese)
- [11] 陈天红. 应用超声波法评价不同类型混凝土高温后性能[D]. 秦皇岛: 燕山大学建筑工程与力学学院, 2013: 25–51.  
CHEN T H. Application of ultrasonic method in evaluating the performance of different types of concrete after high temperature [D]. Qinhuangdao: College of Civil Engineering and Mechanics, Yanshan University, 2013: 25–51. (In Chinese)
- [12] CANBAZ M. The effect of high temperature on reactive powder concrete[J]. Construction & Building Materials, 2014, 70: 508–513.
- [13] RICHAND P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes[J]. Cement & Concrete Research, 1995, 25(7): 1501–1511.
- [14] LONG G, WANG X, XIE Y. Very-high-performance concrete with ultrafine powders [J]. Cement & Concrete Research, 2002, 32(4): 601–605.
- [15] YAZICI H, YARDIMCI M Y, YIGİTER H. Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag [J]. Cement & Concrete Composites, 2010, 32(8): 639–648.
- [16] 单波. 活性粉末混凝土基本力学性能的试验与研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2002: 18–37.
- SHAN B. Experimental study on basic mechanical property of reactive powder concrete [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2002: 18–37. (In Chinese)
- [17] ZHANG Y, SUN W, LIU S, *et al.* Preparation of C200 green reactive powder concrete and its static-dynamic behaviors [J]. Cement & Concrete Composites, 2008, 30(9): 831–838.
- [18] ZHENG W, LI H, WANG Y. Compressive behaviour of hybrid fiber-reinforced reactive powder concrete after high temperature [J]. Materials & Design, 2012, 41: 403–409.
- [19] KIM Y S, LEE T G, KIM G Y. An experimental study on the residual mechanical properties of fiber reinforced concrete with high temperature and load [J]. Materials and Structures, 2013, 46(4): 607–620.
- [20] ZHANG B. Effects of moisture evaporation (weight loss) on fracture properties of high performance concrete subjected to high temperatures [J]. Fire Safety Journal, 2011, 46(8): 543–549.
- [21] PENG G F, HUANG Z S. Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures [J]. Construction & Building Materials, 2008, 22(4): 593–599.
- [22] 王华, 韩松, 安明喆, 等. 活性粉末混凝土材料微观结构的研究现状 [J]. 材料导报, 2014, 28(7): 95–98.  
WANG H, HAN S, AN M Z, *et al.* Research status of microstructure of reactive powder concrete [J]. Materials Review, 2014, 28(7): 95–98. (In Chinese)
- [23] 李海艳, 王英, 解恒燕, 等. 高温后活性粉末混凝土微观结构分析 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(5): 71–75.  
LI H Y, WANG Y, XIE H Y, *et al.* Microstructure analysis of reactive powder concrete after exposed to high temperature [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(5): 71–75. (In Chinese)
- [24] PANG B J, WANG L W, YANG Z Q, *et al.* The effect on dynamic properties of reactive powder concrete under high temperature burnt and its micro-structure analysis [J]. Key Engineering Materials, 2010, 452/453: 109–112.