



磷渣粉的粒径分布与其活性的灰色关联分析

彭艳周^{1,2}, 柯 锦^{1,2}, 张 俊^{1,2}, 刘冬梅¹

(1. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002)

摘 要:研究了磷渣粉比表面积对其胶凝活性的影响,运用灰色关联理论分析了其粒径分布与活性指数的关系。结果表明:粒径 30.2 μm 以上的颗粒对磷渣粉的活性起削弱作用,粒径 0.00~30.2 μm 的颗粒对其活性起增强作用。其中,粒径 5.0~10.0 μm 颗粒的含量是影响磷渣粉 7 d 活性指数 A_7 的关键因子,粒径 10.0~20.0 μm 颗粒的含量是影响 28 d 活性指数 A_{28} 的关键因子。为提高磷渣粉的胶凝活性,其比表面积不宜低于 $397 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$,同时,应尽可能提高磷渣中粒径为 5.0~30.2 μm ,尤其是粒径 5.0~20.0 μm 的颗粒含量,并减少或限制粒径大于 30.2 μm 的颗粒含量。

关键词:磷渣粉;比表面积;活性指数;粒径分布;灰色关联度分析

中图分类号:TU528.041 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)02-0115-06

Grey relation analysis between particle size distribution and cementitious reactivity of phosphorous slag powder

Peng Yanzhou^{1,2}, Ke Jin^{1,2}, Zhang Jun^{1,2}, Liu Dongmei¹

(1. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, P. R. China;

2. Collaborative Innovation Center for Geo-Hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area, Hubei province, Yichang 443002, Hubei, P. R. China)

Abstract: The influence of specific surface area on cementitious reactivity of phosphorous slag powder (PS) was studied and the grey relation degree and relation polarity between the particle size distribution characteristics and the activity coefficients of PS were investigated. The results indicated that particles could weaken the hydration activity of PS and when particle size is greater than 30.2 μm and enhance that when smaller than 30.2 μm . The volume fraction of particles with size of 5.0~10.0 μm and 10.0~20.0

收稿日期:2014-05-04

基金项目:湖北省科技支撑计划项目(2014BCB035);硅酸盐建筑材料国家重点实验室(武汉理工大学)开放课题基金(SYSJJ2014-05);湖北省教育厅科学技术研究项目(Q20121308);2011年度湖北省建设科技计划项目;三峡大学2014年硕士学位论文培优基金(2014PY016)。

作者简介:彭艳周(1974-),男,副教授,博士,主要从事高性能水泥基复合材料的研究,(E-mail)pnyzh@163.com。

Received:2014-05-04

Foundation item: Science and Technology Supporting Project of Hubei Province(No. 2014BCB035), Open Fund of State Key Laboratory of Silicate Materials for Architecture in Wuhan University of Technology (No. SYSJJ2014-05), Science and Technology Research Project of the Hubei Provincial Department of Education(No. Q20121308), 2011 Construction Science and Technology Project of the Department of Housing and Urban-Rural Development of Hubei Province and China Three Gorges University Fund for Master's Degree Thesis(No. 2014PY016)

Author brief: Peng Yanzhou(1974-), associate professor, PhD, main research interest: high performance cement-based composites, (E-mail)pnyzh@163.com.

μm are important determinant of the early activity index (i. e. A_7) and activity index A_{28} , respectively. Therefore, specific surface area should be greater than $397 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ to improve the hydration activity of PS and it is important to increase the content of particles with size of $5.0 \sim 30.2 \mu\text{m}$, especially with size of $5.0 \sim 20.0 \mu\text{m}$ and decrease that of particles bigger than $30.2 \mu\text{m}$.

Key words: phosphorous slag power; specific surface area; activity coefficient; particle size distribution; grey relation analysis

活性粉末混凝土 (Reactive Powder Concrete, RPC) 是一种新型超高性能混凝土^[1-7], 但由于其水泥用量高、生产成本和能耗大, 一定程度上限制了其推广应用。在满足 RPC 中活性组分的提前下达到实际应用要求, 并设法降低 RPC 材料中的水泥用量, 是 RPC 材料研究的热点之一^[8-9]。磷渣是电热法生产黄磷得到的工业废渣, 通常每生产 1 t 黄磷约排放 8~10 t 磷渣^[10]。中国各地磷渣的化学成分相近, 主要有 SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 等, 其中 SiO_2 、 CaO 等总量 85% 以上。熔融磷渣采用水淬冷却时, 将形成粒化磷渣, 其中玻璃结构的含量可高达 90% 以上, 具有潜在的胶凝活性^[10-11]。因此, 从化学组成上看, 粒化磷渣 (以下简称磷渣) 具备用于 RPC 的条件。由于磷渣中 Al_2O_3 含量较少、早期活性较低, 且含有一定量 P_2O_5 等成分, 对水泥有一定缓凝作用, 会影响水泥基材料早期强度的发展。因此, 使用磷渣作为活性组分进行 RPC 材料的制备之前, 应设法提高磷渣粉的活性。

采用机械粉磨增大矿物掺合料的比表面积、减小其颗粒粒径, 是提高胶凝活性的常用措施之一。张永娟等^[12]、王伟等^[13]及蒋永惠等^[14]分别研究了水泥基材料中矿渣粉、粉煤灰等掺合料的比表面积对混合水泥强度的影响。但是, 仅用比表面积表征掺合料的活性可能还不够, 掺合料的颗粒粒径及其分布对其活性也有重要影响^[12-15]。笔者研究了磷渣粉的比表面积对其活性的影响, 运用灰色关联理论探讨了磷渣粉的颗粒粒径分布对其活性的影响规律, 以期通过调整和控制磷渣粉的颗粒粒径分布, 来进一步提高磷渣粉粒径群的胶凝活性, 以便将其用于高性能、超高性能混凝土材料中。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

水泥 (C): P · O 52.5, 由华新水泥厂生产, 7 d 抗压强度 42.7 MPa, 28 d 抗压强度为 53.5 MPa; 磷渣粉 (PS): 宜昌亚泰化工公司生产, 用 SYM-500 × 500 型实验小磨分别粉磨 40、60、80、100 min 得到 4 种比表面积的磷渣粉, 测得其比表面积分别为 340、371、397、423 $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$; 石英砂 (S): 中国 ISO 标准

砂, 由厦门艾思欧标准砂公司生产; 拌合水 (W): 洁净自来水。

表 1 水泥、磷渣的化学成分 (质量百分比)
Table 1 Chemical composition of cement, phosphorous slag powder (mass percentage) /%

成分	C	PS
SiO_2	21.05	38.84
Al_2O_3	5.11	3.46
Fe_2O_3	2.90	1.40
CaO	61.46	46.09
MgO	1.34	1.83
P_2O_5	0.18	2.45
SO_3	3.64	1.34
K_2O	0.92	1.27
Na_2O	0.25	0.49

1.2 试样制备与试验方法

磷渣粉的比表面积按照《水泥比表面积测定方法勃氏法》(GB/T 8074—2008) 进行测定, 所用仪器为 SBT-127 型水泥比表面积测定仪。

掺磷渣粉的水泥胶砂配比如表 2 所示。按表 2 所示配比称量好各种原料, 将磷渣粉、水泥及水倒入水泥胶砂搅拌机的搅拌锅内搅拌 30 s, 在第 2 个 30 s 开始时同时均匀地加入砂子, 再高速搅拌 30 s, 停拌 90 s 后, 再高速搅拌 60 s。拌匀后将浆体浇注于 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ 三联试模内, 在水泥胶砂振实台上振捣成型, 再送入标准养护室, 1 d 后拆模, 拆模后的试件继续标准养护至 7 和 28 d, 按照 GB/T 17671—1999 测试试件抗折和抗压强度。

表 2 掺磷渣粉的胶砂试件配比
Table 2 Mix proportion of mortar specimens containing phosphorous slag powder

水泥/g	磷渣粉/g	中国 ISO 标准砂/g	水/mL
315	135	1 350	225

2 结果与讨论

2.1 磷渣粉的比表面积对其活性的影响

掺 30% 磷渣粉的水泥胶砂试件 7 和 28 d 强度 (抗折和抗压) 如图 1 所示。由图 1(b) 所示结果按

照《用于水泥和混凝土中的粒化电炉磷渣粉》(GB/T 26751-2011)可得到不同比表面积磷渣粉的 7 与 28 d 的活性指数 A_7 、 A_{28} , 结果见图 2。

由图 1、2 可知,随着磷渣粉比表面积的增大,掺磷渣粉胶砂试件的强度(抗折和抗压)提高,即磷渣粉的活性增强。比表面积 $397 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上时,磷渣粉的活性指数可达 L85 级以上。分析认为:一方面,随着比表面积的增加,磷渣粉粒径变小,颗粒表面的晶格畸变和化学键断裂的数量也会增加^[11-17],因而,在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 及石膏的激发作用下,磷渣玻璃体结构中 Ca^{2+} 、 $[\text{AlO}_4]^{5-}$ 、 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 等离子溶入水化溶液的速度和数量增加,水化反应的程度和速度也提高^[11,17-21],从而磷渣粉的活性逐渐提高;另一方面,磷渣粒径减小,大量细小的磷渣颗粒填充于水泥颗粒间隙,也能起到物理填充作用,提高硬化浆体的密实度^[22],从而也有利于试件强度和磷渣活性的提高。但由于磷渣中 Al_2O_3 含量较低、且含有一定量的 P_2O_5 ,其早期活性的增长仍然有限。

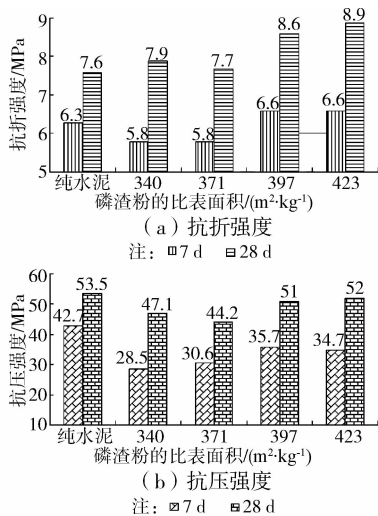


图 1 磷渣粉比表面积对掺磷渣胶砂试件强度的影响

Fig. 1 Influence of specific surface area of phosphorous slag powder on strength of the specimens

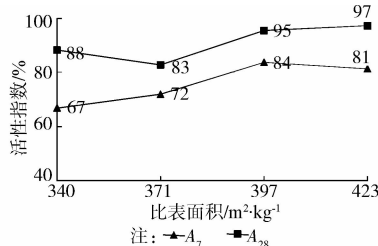


图 2 磷渣粉的比表面积对其活性指数的影响

Fig. 2 Influence of specific surface area on activity coefficient of phosphorous slag powder

另外,试验中还发现,4 组掺磷渣粉胶砂试件的 28 d 抗折强度均高于纯水泥胶砂试件(图 1)。这很可能是由于水泥中掺入磷渣粉后,减少了熟料量,相应地也就减少片状水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的生成量。同时,28 d 龄期内磷渣粉的水化反应消耗大量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,同时生成了新的水化产物,从而对抗折强度的改善效果比抗压强度更好。当然,这还有待于微观试验研究的证实。磷渣粉的活性越高,其改善效果越好。综合以上结果与分析,磷渣粉的比表面积宜控制在 $397 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上。

2.2 磷渣粉的粒径分布与活性指数的灰色关联分析

2.2.1 灰色关联分析的基本原理 灰色关联分析是为了考察各行为因素之间的几何接近,以确定各因素之间的影响程度或若干个子因素(子序列)对主因素(母序列)的贡献度的一种分析方法。关联度是因素之间关联性的量度,关联度的数值愈大,表明子序列与母序列的相关性越大。正关联表示子序列对母序列起积极或增强作用,负关联表示子序列对母序列起消极或削弱作用。

对于某一灰色系统,考虑有 m 个时间序列,代表有 m 种影响因素:

$$\{X_1(k)\}, k = 1, 2, \dots, N_1$$

$$\{X_2(k)\}, k = 1, 2, \dots, N_2$$

⋮

$$\{X_m(k)\}, k = 1, 2, \dots, N_m$$

N_1, \dots, N_m 均属于自然数集,且不一定相等。再给定时间序列 $\{X_0(k)\} (k = 1, 2, \dots, N_0)$ 称为母序列(又称参考序列),相应地有子序列(又称对比序列) $\{X_i(k)\} (i = 1, 2, \dots, m)$ 。则子序列 X_i 对母序列 X_0 在 k 时刻的关联系数 $\xi_{0i}(k)$,也即 $X_i(k)$ 对 $X_0(k)$ 的关联系数 $\xi_{0i}(k)$ 为

$$\xi_{0i}(k) =$$

$$\frac{\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{|X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|} \quad (1)$$

式中: ρ 为分辨系数,且 $\rho \in (0, 1)$,通常取 $\rho = 0.5$ 。则子序列 X_i 对母序列 X_0 的关联度 $r_{0i}(k)$ 为

$$r_{0i}(k) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_{0i}(k) \quad (2)$$

关联极性的判定方法为

$$\sigma_i = \sum_{k=1}^n kX_i(k) - \sum_{k=1}^n X_i(k) \sum_{k=1}^n \frac{k}{n} \quad (3)$$

$$\sigma_k = \sum_{k=1}^n k^2 - \left(\sum_{k=1}^n k\right)^2 / n \quad (4)$$

式中: n 为 $X_i(k)$ 样本量。则 $\{X_i(k)\}$ 与 $\{X_j(k)\}$ 的关联极性可按下述准则判断:

若 $\text{sgn}\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_k}\right) = \text{sgn}\left(\frac{\sigma_j}{\sigma_k}\right)$, 则 $\{X_i(k)\}$ 与 $\{X_j(k)\}$

为正关联; 若 $\text{sgn}\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_k}\right) = -\text{sgn}\left(\frac{\sigma_j}{\sigma_k}\right)$, 则 $\{X_i(k)\}$ 与 $\{X_j(k)\}$ 为负关联。

2.2.2 灰色关联度的计算和分析 用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪测试了前述 4 种比表面积磷渣

粉的粒径分布, 结果见表 3。将颗粒粒径由小到大分为 $0.0 \sim 5.0$ 、 $5.0 \sim 10.0$ 、 $10.0 \sim 20.0$ 、 $20.0 \sim 30.2$ 、 $30.2 \sim 45.7$ 、 $>45.7 \mu\text{m}$ 共 6 个区间, 以磷渣粉的颗粒粒径分布为子序列, 依次记为 $X_i, i=1, 2, \dots, 6$; 再分别以磷渣粉的活性指数 A_7 、 A_{28} 为母序列(即 2 个母序列), 依次记为 X_{01} 、 X_{02} 。

表 3 不同比表面积磷渣粉的活性指数及其颗粒粒径分布

Table 3 Activity coefficient and particle size distribution(PSD) of phosphorous slag powder with varied specific surface area

比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	活性指数/%							
	X_{01}	X_{02}	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
340	67	88	13.91	12.94	21.89	12.88	10.54	27.84
371	72	83	21.71	21.33	23.56	10.97	8.03	14.40
397	84	95	41.82	16.77	19.12	9.68	6.32	6.29
423	81	97	41.67	17.24	19.52	9.98	6.48	5.11

运用灰色关联度分析了磷渣粉颗粒分布与其活性指数(A_7 、 A_{28})的关联度; 分别对各母序列和各子序列进行均值化处理, 得到新的母序列(X'_{0i})和子序列(X'_i), 结果见表 4; 根据表 4 的数据, 按式(1)~(4)可

得母序列 $X_{0i}(i=1, 2)$ 与各子序列 $X_i(i=1, 2, \dots, 6)$ 的关联度及关联极性, 即磷渣粉各粒径范围的颗粒含量与其活性指数的关联度和关联极性, 见表 5。

表 4 经处理后的母序列(X'_{0i})和子序列(X'_i)

Table 4 Parent series(X'_{0i}) and subseries(X'_i)

活性指数/%							
X'_{01}	X'_{02}	X'_1	X'_2	X'_3	X'_4	X'_5	X'_6
0.88	0.97	0.47	0.76	1.04	1.18	1.35	2.07
0.95	0.92	0.73	1.25	1.12	1.00	1.03	1.07
1.10	1.05	1.40	0.98	0.91	0.89	0.81	0.47
1.07	1.07	1.39	1.00	0.93	0.92	0.83	0.38

表 5 磷渣粉的颗粒粒径分布与磷渣活性指数的关联度和关联极性

Table 5 Grey correlation degree and correlation polarity between particle size distribution(PSD) and activity coefficient of phosphorous slag powder

活性指数	$0.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$	$5.0 \sim 10.0 \mu\text{m}$	$10.0 \sim 20.0 \mu\text{m}$	$20.0 \sim 30.2 \mu\text{m}$	$30.2 \sim 45.7 \mu\text{m}$	$>45.7 \mu\text{m}$
A_7	0.72	0.89	0.86	0.85	-0.77	-0.58
A_{28}	0.69	0.87	0.89	0.87	-0.78	-0.56

由表 5 可见:

1) 磷渣粉的活性指数(A_7 、 A_{28})与磷渣粉中粒径 $0.0 \sim 5.0$ 、 $5.0 \sim 10.0$ 、 $10.0 \sim 20.0$ 、 $20.0 \sim 30.2 \mu\text{m}$ 的颗粒正关联, 与粒径 $30.2 \sim 45.7$ 、 $>45.7 \mu\text{m}$ 的颗粒负关联。即粒径小于 $30.2 \mu\text{m}$ 的磷渣粉颗粒对其活性起增强作用, 而粒径大于 $30 \mu\text{m}$ 的颗粒则起削弱作用。

2) 粒径范围与磷渣 7 d 活性指数(A_7)、28 d 活性指数(A_{28})关联度的大小顺序不同: 与 7 d 活性指

数 A_7 关联度的大小顺序是: $5.0 \sim 10.0 \mu\text{m} > 10.0 \sim 20.0 \mu\text{m} > 20.0 \sim 30.2 \mu\text{m} > 0.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$, 与 28 d 活性指数 A_{28} 关联度的大小顺序是: $10.0 \sim 20.0 \mu\text{m} > 5.0 \sim 10.0 \mu\text{m} > 20.0 \sim 30.2 \mu\text{m} > 0.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 。粒径 $0.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 的颗粒对活性的增强作用不如 $5.0 \sim 10.0$ 、 $10.0 \sim 20.0$ 、 $20.0 \sim 30.2 \mu\text{m}$ 的颗粒, 这很可能是由于粒径减小时磷渣粉的需水量增加, 从而对浆体的流动性和成型密实度有负面影响所致。

粒径范围与磷渣活性指数(A_7 、 A_{28})关联度的大

小顺序表明:粒径 $5.0\sim 10.0\ \mu\text{m}$ 的颗粒与磷渣粉 7 d 活性指数 A_7 的关联度最大,是影响磷渣 7 d 活性的关键因子,该粒径范围的颗粒含量越大,磷渣粉 7 d 活性就越高;粒径 $10.0\sim 20.0\ \mu\text{m}$ 的颗粒与 28 d 活性指数 A_{28} 的关联度最大,是影响磷渣粉 28 d 活性的关键因子。因此, $5\sim 20\ \mu\text{m}$ 颗粒是磷渣水化活性起关键作用的因子。由表 3 可知:比表面积 340 、 371 、 397 和 $423\ \text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ 磷渣中, $5\sim 20\ \mu\text{m}$ 颗粒占总颗粒的比例分别为 34.83% 、 44.89% 、 35.89% 和 36.76% ,但 4 种磷渣粉活性大小不同。这是因为,一方面,与比表面积 $340\ \text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ 的磷渣相比, $371\ \text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ 磷渣中对活性起关键作用的 $5\sim 20\ \mu\text{m}$ 颗粒比例增大了,且 $0\sim 5\ \mu\text{m}$ 颗粒(与活性正关联)的比例也增加,同时,与活性负关联的颗粒($30.2\sim 45.7\ \mu\text{m}$, $>45.7\ \mu\text{m}$ 的颗粒)比例下降,因此,比表面积 $371\ \text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ 磷渣粉的活性高于 $340\ \text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ 的磷渣粉;另一方面,在 397 、 $423\ \text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ 2 种磷渣中,尽管 $5\sim 20\ \mu\text{m}$ 颗粒的比例分别为 35.89% 和 36.76% ,比 $371\ \text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ 磷渣中比例低 $8\%\sim 9\%$,但是,这两种磷渣粉中与活性正关联的 $0\sim 5\ \mu\text{m}$ 颗粒的比例增加了近 1 倍、且与活性负关联的颗粒($>30.2\ \mu\text{m}$)的比例下降了约 1 倍,因而,其活性仍比 $371\ \text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ 的磷渣活性略高。

上述磷渣粉活性指数是由掺磷渣粉胶砂试件的抗压强度得到的。实际上,胶砂试件的强度不仅与整个颗粒体系的颗粒群特征密切相关(即物理效应或密实填充效应),更与整个胶凝体系(包含矿物掺合料)的胶凝性能(化学效应或火山灰效应)密不可分。以上不同粒径颗粒对磷渣粉活性指数的影响规律,可能正是磷渣粉颗粒群对整个复合体系密实度和胶凝性能影响的综合反映。综合以上分析,为提高磷渣粉的活性,应尽可能减少或限制磷渣粉中粒径 $30.2\ \mu\text{m}$ 以上颗粒的含量,提高 $5.0\sim 30.2\ \mu\text{m}$,尤其是 $5.0\sim 20.0\ \mu\text{m}$ 颗粒的含量。

3 结论

粒径 $30.2\ \mu\text{m}$ 以上的颗粒对磷渣粉的活性起削弱作用,粒径 $0.0\sim 30.2\ \mu\text{m}$ 的颗粒对其活性起增强作用,其中粒径 $5.0\sim 10.0\ \mu\text{m}$ 的颗粒对 7 d 活性的增强作用最大,粒径 $10.0\sim 20.0\ \mu\text{m}$ 的颗粒对 28 d 活性的增强作用最大,分别是影响磷渣粉 7、28 d 活性的关键因子。因此,为提高磷渣粉粒径群的活性,其比表面积不宜小于 $397\ \text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ 。同时,应尽可能提高磷渣中粒径为 $5.0\sim 30.2\ \mu\text{m}$,尤其是粒径 $5.0\sim 20.0\ \mu\text{m}$ 的颗粒含量,并减少或限制粒径大于 $30.2\ \mu\text{m}$

的颗粒的含量。

参考文献:

- [1] Richard P, Cheyrezy M. Composition of reactive powder concretes [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7): 1501-1511.
- [2] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
- [3] Tai Y S, Pan H H, Kung Y N. Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching $800\ ^\circ\text{C}$ [J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(7): 2416-2424.
- [4] Liu C T, Huang J S. Fire performance of highly flowable reactive powder concrete [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(5): 2072-2079.
- [5] Yi N H, Kim J H J, Han T S, et al. Blast-resistant characteristics of ultra-high strength concrete and reactive powder concrete [J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1): 694-707.
- [6] Zheng W Z, Li H Y, Wang Y. Compressive stress-strain relationship of steel fiber-reinforced reactive powder concrete after exposure to elevated temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2012, 35(10): 931-940.
- [7] Zhou W, Hu H B, Zheng W Z. Bearing capacity of reactive powder concrete reinforced by steel fibers [J]. Construction and Building Materials, 2013, 48(11): 1179-1186.
- [8] Yi giter H, Aydın S, Yazıcı H, et al. Mechanical performance of low cement reactive powder concrete (LCRPC) [J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(8): 2907-2914.
- [9] Peng Y Z, Hu S G, Ding Q J. Preparation of reactive powder concrete using fly ash and steel slag powder [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition, 2010, 25(2): 349-354.
- [10] 陈明, 孙振平, 刘建山. 磷渣活性激发方法及机理研究进展[J]. 材料导报, 2013, 27(21): 112-116.
Chen M, Sun Z P, Liu J S. State of the art review on activating techniques and mechanism of phosphorus slag [J]. Materials Review, 2013, 27(21): 112-116. (in Chinese)
- [11] 史才军, 郑克仁. 碱-激发水泥和混凝土[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [12] 张永娟, 张雄, 窦竟. 矿渣微粉颗粒分布与其活性指数的灰色关联分析[J]. 建筑材料学报, 2001, 4(1): 44-48.
Zhang Y J, Zhang X, Dou J. Grey connection analysis

- between particle size distribution of slag powder and its activity coefficient [J]. *Journal of Building Materials*, 2001, 4(1): 44-48. (in Chinese)
- [13] 王伟,王文奎,徐兆辉,等. 矿渣粉比表面积及粒度分布对水泥强度的影响[J]. *中国粉体技术*, 2011, 17(2): 80-82.
Wang W, Wang W K, Xu Z H, et al. Influence of specific surface area and particle size distribution of superfine slag particles on strength of cement [J]. *China Powder Science and Technology*, 2011, 17(2): 80-82. (in Chinese)
- [14] 蒋惠惠,阎春霞. 粉煤灰颗粒分布对水泥强度影响的灰色度系统研究[J]. *硅酸盐学报*, 1998, 26(4): 424-429.
Jiang Y H, Yan C X. Gray system study on the influence of particle size distribution of fly ash on strength of fly ash cement [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 1998, 26(4): 424-429. (in Chinese)
- [15] 彭艳周,陈凯,胡曙光. 钢渣粉颗粒特征对活性粉末混凝土强度的影响[J]. *建筑材料学报*, 2011, 14(4): 541-545.
Peng Y Z, Chen K, Hu S G. Influence of the steel slag powder particle characteristics on compressive strength of reactive powder concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2011, 14(4): 541-545. (in Chinese)
- [16] 王培铭,孙杰,刘贤萍. 粉煤灰-硅酸盐混合水泥粒度分布分形维数与其比表面积和抗压强度的关系[J]. *武汉理工大学学报*, 2011, 33(4): 24-28.
Wang P M, Sun J, Liu X P. Effect of particle size distributional fractal dimensions of fly ash-portland blended cements on specific surface area and compressive strengths of mortars [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2011, 33(4): 24-28. (in Chinese)
- [17] 史才军,李荫余,唐修仁. 磷渣活性激发机理初探[J]. *东南大学学报:自然科学版*, 1989, 19(1): 141-145.
Shi C J, Li Y Y, Tang X R. Preliminary investigation on the activation mechanism of phosphorus slag [J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 1989, 19(1): 141-145. (in Chinese)
- [18] 陈霞,易俊新,曾力. 磷渣的活性机械激发试验及分析[J]. *粉煤灰综合利用*, 2006(4): 16-18.
Chen X, Yi J X, Zeng L. Experiment on the mechanical activation of phosphorus slag and the analysis involved [J]. *Fly Ash Comprehensive Utilization*, 2006(4): 16-18. (in Chinese)
- [19] Li D X, Shen J L, Chen L, et al. The influence of fast-setting/early-strength agent on high phosphorous slag content cement [J]. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31(1): 19-24.
- [20] 郭成洲,朱教群,周卫兵,等. NaOH 和 Na_2CO_3 对磷渣水化过程的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2012, 31(2): 377-381.
Guo C Z, Zhu J Q, Zhou W B, et al. Effect of NaOH and Na_2CO_3 on hydration process of phosphorous slag [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2012, 31(2): 377-381. (in Chinese)
- [21] Allahverdi A, Mahinroosta M. Mechanical activation of chemically activated high phosphorous slag content cement [J]. *Powder Technology*, 2013(245): 182-188.
- [22] Peng Y Z, Hu S G, Ding Q J. Dense packing properties of mineral admixtures in cementitious material [J]. *Particuology*, 2009, 7(5): 399-402.

(编辑 郭 飞)