

# 金川全尾砂棒磨砂新型充填胶凝材料试验研究

侯春华<sup>1</sup>, 杨志强<sup>1,2</sup>, 高 谦<sup>1</sup>, 陈得信<sup>2</sup>

(1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 金川集团股份有限公司, 甘肃 金昌 737100)

**摘 要:**利用矿渣、粉煤灰等固体废弃物,开展新型充填胶凝材料试验,是解决金川矿山固体废弃物资源化利用和降低充填成本的重要途径。对金川矿区可以利用的尾砂、棒磨砂等充填骨料的物化特性进行分析和颗粒级配研究;进行新型充填胶凝材料配比正交试验。在此基础上,采用统计回归分析和参数拟合方法,建立新型充填胶凝材料胶结充填体强度与激发剂掺量的函数关系,并以胶结充填体强度为优化目标,以激发剂掺量范围作为约束条件,建立新型充填胶凝材料配比的优化模型。求解优化模型获得全尾砂-棒磨砂混合充填料的新型充填胶凝材料优化配比。最后,对新型充填胶凝材料进行验证试验。结果表明,开发的新型充填胶凝材料满足金川矿山对胶凝材料的要求,从而为金川矿山固体废弃物利用提供了依据。

**关键词:**全尾砂;棒磨砂;配合比;添加剂

中图分类号:TD853.34

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2015)03-0078-07

## Experimental Research on a New Filling Material Compound of Whole Tailings and Rod Milling Sand in Jinchuan Mine

Hou Chunhua<sup>1</sup>, Yang Zhiqiang<sup>1,2</sup>, Gao Qian<sup>1</sup>, Chen Dexin<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of High Efficient Mining and Safety of Metal Mine, Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Jinchuan Group Co. Ltd, Jinchang, Gansu 737100, China)

**Abstract:** Carrying out new filling material experiments with solid wastes like slag and fly ash is an important way to solve the problem of solid wastes resource utilization and filling cost reduction in Jinchuan Mine. At first, the physicochemical characteristics and grain composition of the useful materials such as tailing and rod-milling sand in Jinchuan Mine were analyzed. Then the ratio of new filling cementing material was determined with orthogonal design. On this basis, the functional relationship between the strength of the mixed filling materials and the amount of activator was established by using the methods of statistical regression analysis and parameter fitting. At the same time, with the filling body strength as optimization target and the amount of activator as constraint condition, the optimization model of the newly filling cementing material ratio was built. The optimized ratio of whole tailings and rod milling sand was obtained by solving the optimization model. At last, the verified test was carried out for newly backfilling cementing material. The results show that the newly developed filling cementing material can meet the requirement for cementing material and provide a theoretical basis for the utilization of solid wastes resource in Jinchuan Mine.

**Key words:** whole tailings; rod-milling sand; mix ratio; activator

收稿日期:2014-10-26

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目(SS2012AA062405)

作者简介:侯春华(1989—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要从事金属矿山充填法采矿技术与胶凝材料开发试验研究。

E-mail:houchunhua123@126.com

高 谦(1956—),男,江苏徐州人,教授,博士生导师,主要从事岩石力学、充填采矿技术和新型充填胶凝材料等方面的研究,本文通信作者。E-mail:gaoqian@ces.ustb.edu.cn

我国是一个矿业生产大国,矿业固体废料的积存量和年排放量巨大。矿产资源开发利用过程中形成的尾矿已成为体量最大的工业固体废弃物,约占总量的 80%。每年产生的矿山尾矿超过 6.5 亿 t,并以每年 4 亿 t~5 亿 t 的增量递增<sup>[1]</sup>。目前我国尾矿利用率很低,占工业固体废物 30% 的固体尾矿,其利用率仅为 7%<sup>[2]</sup>。大量尾矿堆放不仅占用大量土地,而且还造成环境污染,并存在严重的安全隐患<sup>[3]</sup>。金川镍矿目前充填骨料主要是砂石厂生产的棒磨砂和部分河砂。为了利用尾矿资源,变废为宝,同时矿山充填料的需求量随着矿山生产能力的增加逐步提高,棒磨砂现有生产能力难以满足充填料的需求,而且其加工成本居高不下。有效利用廉价的全尾砂作为充填料进行充填法采矿,既能够降低矿产资源开发过程中产生的大量尾矿对环境的污染,也能够降低充填采矿成本,提高矿石回采率,同时还能为回采工作创造安全采矿条件。但采用全尾砂与棒磨砂混合充填时,由于二者力学性质和粒径相差较悬殊,将影响充填体强度。因此,开展全尾砂与棒磨砂混合料掺量配比及其添加剂掺量研究,对实现安全采矿具有重要意义。

## 1 充填材料物化特性检测与分析

试验材料取自金川尾矿坝的全尾砂,三矿区砂石场生产的棒磨砂。充填材料物理性质和化学成分检测结果见表 1~3。从表 2 可见,棒磨砂平均粒径约 0.62 mm,尾砂平均粒径仅为 0.037 mm,两种充填物料粒径相差 15 倍以上。根据表 3 的全尾砂充填料分析结果可见,全尾砂属于中性材料,没有胶结活性,满足矿山充填材料的要求<sup>[4]</sup>。

表 1 棒磨砂及全尾砂的物理性质

Tab. 1 The physical properties of rod milling sand and whole tailings

充填材料	密度/(t·m <sup>-3</sup> )	容重/(kN·m <sup>-3</sup> )	孔隙率/%
棒磨砂	2.67	14.21	45.7
全尾砂	2.87	11.96	57.5

表 2 棒磨砂和全尾砂的粒径级配的特征值

Tab. 2 Particle size gradation eigenvalues of rod milling sand and whole tailings

充填材料	d <sub>10</sub> /mm	d <sub>50</sub> /mm	d <sub>60</sub> /mm	d <sub>90</sub> /mm	d <sub>p</sub> /mm	不均匀系数(d <sub>60</sub> /d <sub>10</sub> )
棒磨砂	0.163 00	0.863 0	1.331	3.153	0.620	8.2
全尾砂	0.001 64	0.034 4	—	0.144	0.037	22.5

表 3 全尾砂质量计算结果

Tab. 3 The mass calculation of whole tailings

评价指标	计算公式	结果说明
碱性指数	$M_o = \frac{m(\text{CaO} + \text{MgO})}{m(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)} = 1.0$	中性物质
活性率	$M_a = \frac{m(\text{Al}_2\text{O}_3)}{m(\text{SiO}_2)} = 0.15 < 0.17$	全尾砂没有胶结活性,属于惰性材料,满足充填材料要求。
质量系数	$K = \frac{m(\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO})}{m(\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2 + \text{MgO})} = 0.023 < 1.6$	

### 1.1 全尾砂-棒磨砂混合料粒径分析

根据全尾砂质量分析结果,结合棒磨砂的粒度分布情况及之前做过的工业现场试验全尾砂与棒磨砂的比例宜控制在 3 : 7<sup>[5]</sup>。表 4 是全尾砂与棒磨砂按 3 : 7 混合后的粒度分布情况。

### 1.2 新型充填胶凝材料的主要潜在活性材料

新型充填胶凝材料以粉煤灰和矿渣微粉为主,采用脱硫石膏和石灰等复合激发剂进行激发,从而形成水硬化作用的胶凝材料。

粉煤灰取自金川公司热电厂,其主要化学成分见表 5。由此可见,粉煤灰主要化学成分是酸性氧化物  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,其含量超过 57%,因此呈弱酸性,在碱性环境中  $\text{OH}^-$  有助于  $\text{Si-O}$  和  $\text{Al-O}$  键断裂。粉煤灰的主要组成为玻璃态物质,内能高、热力学上处于不稳定状态,具有潜在活性<sup>[6-8]</sup>,可以部分替代水泥,降低充填成本。同时还可以提高充填料浆的流动性,减少管道的磨损。粉煤灰中  $\text{SiO}_2$  与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  化合生成  $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}(\text{C-S-H})$  类物质,称为粉煤灰的碱性激发<sup>[9]</sup>。

试验采用的矿渣微粉由唐龙新型建材有限公司生产,矿渣取自唐钢二炼铁冶炼排放的水淬渣,化学成分见表 6,由此计算该矿渣的碱性指数  $M_o=0.97<1$ ,属于碱性矿渣;质量系数  $K=1.91$ 。根据国标规定质量系数  $K>1.9$  为高活性矿渣。

矿渣水化反应过程中破坏矿渣玻璃体表面结构,然后向内部扩散,矿渣玻璃体表面的  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  等吸附碱性溶液中的  $\text{H}^+$  和  $\text{OH}^-$ ,使矿渣玻璃体分散、溶解,玻璃体表面结构被破坏,促使矿渣水化。 $\text{OH}^-$  离子与矿渣玻璃体中的活性  $\text{SiO}_2$  反应生成  $\text{C-S-H}$  凝胶。随着水化产物  $\text{C-S-H}$  凝胶逐步增加,胶凝材料的强度逐渐变大<sup>[10-12]</sup>。

表 4 全尾砂与棒磨砂按 3:7 混合后的粒度组成

Tab. 4 The size composition of the whole tailings and rod milling sand according to 3:7 after mixing

粒径/mm	产率/%	筛上累计/%	筛下累计/%
$\geq 5.000$	1.81	1.81	100.00
3.000(含)~5.000	6.88	8.69	98.19
1.600(含)~3.000	2.32	11.02	91.31
0.840(含)~1.600	15.30	26.32	88.99
0.545(含)~0.840	9.72	36.04	73.69
0.287(含)~0.545	12.47	48.50	63.97
0.197(含)~0.287	6.36	54.86	51.50
0.150(含)~0.197	4.83	59.69	45.14
0.100(含)~0.150	6.28	65.97	40.31
0.071(含)~0.100	3.66	69.63	34.03
0.064(含)~0.071	10.18	79.81	30.37
0.048(含)~0.064	1.95	81.76	20.19
0.032(含)~0.048	3.63	85.39	18.24
0.016(含)~0.032	2.37	87.76	14.61
0.008(含)~0.016	4.62	92.38	12.24
0.004(含)~0.008	3.24	95.52	7.62
0.002(含)~0.004	1.86	97.38	4.38
0.001(含)~0.002	1.47	98.85	2.52
$< 0.001$	1.05	99.90	1.05
平均粒径/mm	0.724	不均匀系数	41.67

表 5 粉煤灰主要化学成分

Tab. 5 The main chemical constituents of fly ash

成分	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	CaO	MgO
含量/%	38.38	19.57	3.13	0.82

表 6 矿渣化学成分

Tab. 6 The chemical constituents of slag

成分	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Cl <sup>-</sup>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S <sup>2-</sup>	SO <sub>3</sub>	其他
含量/%	38.16	33.38	16.23	0.44	0.03	10.10	0.62	0.17	0.07	0.08

### 1.3 复合激发剂材料和早强剂

为了提供粉煤灰和矿渣微粉活性激发速度,采用以脱硫灰渣和生石灰为主的复合激发剂。脱硫灰渣取自金川电厂的干法脱硫灰渣,平均粒径为 17.5 μm,含硫物相以 CaSO<sub>3</sub> 为主,SO<sub>3</sub> 含量达到 35%左右。脱硫灰渣具有火山灰活性,与碱性物质混合具有激发作用。灰渣中的活性氧化硅与 Ca(OH)<sub>2</sub> 反应生成水化硅酸钙(C—S—H)凝胶。

生石灰为唐山永顺石灰厂生产。根据 X 射线衍射分析,进行相应的定量拟合计算,其化学成分组成见表 7。可见,生石灰中的 CaO, MgO, CaCO<sub>3</sub>, Ca(OH)<sub>2</sub> 的总量达到 98.92%,是优质石灰,将会产生较好的碱性环境;芒硝、氢氧化钠为购买的高纯度工业原料。

综上所述,试验采用生石灰、脱硫灰渣作为复合碱激发剂,并与早强剂共同作用,可以加快 Si—O 和 Al—O 断裂,产生比较好的早期强度<sup>[13-14]</sup>。

表 7 生石灰的化学成分组成

Tab. 7 The chemical constituents of quicklime

组成	CaO	MgO	CaCO <sub>3</sub>	Ca(OH) <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	其他
含量/%	39.02	8.52	15.84	35.54	1.07	0.01

## 2 试验方案设计及优化决策

根据前期室内试验结果,采用胶砂比为 1:4,浓度为 78%,以全尾砂:棒磨砂为 3:7 混合充填料。通过分析,采用 5 因素 4 水平正交试验,试验指标为胶结充填体的单轴抗压强度,因素为生石灰添加百分比、脱硫灰渣添加百分比、粉煤灰添加百分比、芒硝添加百分比和氢氧化钠添加百分比,剩余百分比用矿渣填充。各因素取值见表 8。根据正交试验规律,并结合实际情况,选用 L<sub>16</sub>(4<sup>5</sup>) 正交表,把因素水平表中的因素、水平填入表 8 中,列出每组试验的具体条件。

表 8 新型充填胶凝材料正交设计因素与水平

Tab. 8 The orthogonal factors and levels of cementing material

因素 水平	%				
	生石灰	脱硫灰渣	粉煤灰	芒硝	氢氧化钠
1	3	16	0	0	0
2	5	18	5	1	0.5
3	7	20	10	3	1.0
4	9	22	15	5	1.5

试验材料用量按照每个磨具 2 200 g,根据胶砂比和浓度算出每种材料以及水和骨料的用量。试验过程严格按照《金川公司高浓度细砂管道胶结充填技术标准》进行,全尾砂从金川公司新尾矿坝选取,棒磨砂从龙首矿充填工区现场选取。按照国标 GB/T17671—1999《水泥胶砂强度检验方法》,用电子秤计量,用 JJ-5 型行星式水泥砂胶搅拌机搅拌,然后将砂浆倒入 7.07 cm×7.07 cm×7.07 cm 标准试验模具,然后立即用水泥

胶砂试体成型振实台进行振实成型。放到温度 25~28℃、湿度(90±5)%的 YH-40B 型标准养护箱中养护 48 h, 然后进行脱模, 脱模后对试块进行编号, 继续放到养护箱直至达到养护龄期, 分别为 3, 7, 28 d。在 SANS 数显固定位移压机上分别测试试块各个龄期的抗压强度, 试验结果见表 9。

通过对试验结果进行分析, 可见:

1) 此次试验结果 3 d 强度不满足金川矿山  $R_{3d} \geq 1.5$  MPa 的要求, 还需要进一步的优化配比并做实验进行验证分析。7 d 和 28 d 的强度满足金川矿山的要求。

2) 掺加粉煤灰的新型充填胶凝材料, 3 d 充填体强度普遍偏低。因此粉煤灰在一定程度上影响胶凝材料的早期强度。

3) 在 16 组的正交试验中, B6 组的充填体强度最高, 对应的胶凝材料的配比分别为生石灰 5%、脱硫灰渣 18%、粉煤灰 0、芒硝 5%、氢氧化钠 1% 和矿渣微粉为 71%。

表 9 新型充填胶凝材料正交试验方案与结果

Tab. 9 The orthogonal test plan and results of cementing material

试件编号	生石灰/%	脱硫灰渣/%	粉煤灰/%	芒硝/%	氢氧化钠/%	矿渣/%	抗压强度/MPa		
							3 d	7 d	28 d
B1	3	16	0	0	0	81.0	0.37	2.11	8.86
B2	3	18	5	1	0.5	72.5	0.55	3.16	7.04
B3	3	20	10	3	1.0	63.0	0.41	3.06	6.77
B4	3	22	15	5	1.5	53.5	0.30	2.84	5.07
B5	5	16	5	3	1.5	69.5	0.80	2.98	5.27
B6	5	18	0	5	1.0	71.0	1.25	3.10	5.52
B7	5	20	15	0	0.5	59.5	0.11	1.82	7.09
B8	5	22	10	1	0.0	62.0	0.09	1.47	8.34
B9	7	16	10	5	0.5	61.5	0.50	3.21	4.73
B10	7	18	15	3	0	57.0	0.15	2.00	5.77
B11	7	20	0	1	1.5	70.5	0.58	3.47	7.35
B12	7	22	5	0	1.0	65.0	0.15	2.30	9.06
B13	9	16	15	1	1.0	58.0	0.24	2.41	6.79
B14	9	18	10	0	1.5	61.5	0.24	2.63	9.02
B15	9	20	5	5	0	61.0	0.13	2.01	5.85
B16	9	22	0	3	0.5	65.5	0.09	2.80	7.06

## 2.1 新型充填胶凝材料配比试验数据建模分析

对掺加粉煤灰的胶凝材料试验数据用 DPS 统计分析软件进行二次多项式回归分析, 由此获得 3, 7 和 28 d 充填体强度与激发剂材料配比的函数关系并通过对函数进行极大值求解得到最优配比:

$$R_{3d} = -1.132 - 0.526X_1 + 0.045X_2 + 1.170X_3 - 0.154X_4 - 2.081X_5 - 0.009X_1^2 + 0.006X_2^2 + 0.115X_4^2 + 1.441X_5^2 + 0.018X_1X_2 - 0.027X_1X_4 + 0.008X_1X_5 - 0.060X_2X_3 - 0.023X_3X_4. \quad (1)$$

3 d 充填体强度最优化配比为: 生石灰 3%、脱硫灰渣 22%、粉煤灰 0、芒硝 5%、氢氧化钠 0。

$$R_{3d} = 3.07 \text{ MPa}.$$

$$R_{7d} = -48.173 + 5.199X_2 - 1.073X_4 + 9.342X_5 - 0.129X_2^2 + 0.002X_3^2 + 0.053X_4^2 - 1.715X_5^2 - 0.006X_1X_3 + 0.023X_1X_4 + 0.149X_1X_5 - 0.011X_2X_3 - 0.411X_2X_5 + 0.077X_3X_4 + 0.371X_4X_5. \quad (2)$$

7 d 的充填体强度最优化配比为: 生石灰 9%、脱硫灰渣 18.9%、粉煤灰 0、芒硝 0、氢氧化钠 0.86%。

$$R_{7d} = 4.41 \text{ MPa}.$$

$$R_{28d} = 20.834 - 6.873X_1 - 3.973X_3 + 12.35X_4 - 4.607X_5 + 0.572X_1^2 + 0.014X_2^2 + 0.033X_3^2 - 0.288X_4^2 + 0.852X_5^2 + 0.075X_1X_3 + 0.027X_1X_4 + 0.158X_2X_3 - 0.609X_2X_4 + 0.202X_2X_5. \quad (3)$$

28 d 充填体强度的最优化配比为:生石灰 9%、脱硫灰渣 22%、粉煤灰 15%、芒硝 0、氢氧化钠 1.5%。

$$R_{28d} = 8.85 \text{ MPa}.$$

其中: $R_{3d}$ ,  $R_{7d}$ ,  $R_{28d}$ —充填体 3d, 7d 和 28d 的抗压强度, MPa;  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$ —生石灰、脱硫灰渣、粉煤灰、芒硝和氢氧化钠的添加量, %。

然后进行建模优化决策分析, 目标函数为  $\text{Max}(R_{3d} + R_{7d} + R_{28d})$ , 通过 Matlab 建模优化。

通过优化模型获得的胶凝材料的最优配比是:生石灰 2%、脱硫灰渣 20.7%、粉煤灰 5.0%、芒硝 4.27%、氢氧化钠 0.95%, 充填体强度: $R_{3d} = 1.54 \text{ MPa}$ ,  $R_{7d} = 2.56 \text{ MPa}$ ,  $R_{28d} = 7.61 \text{ MPa}$ 。3, 7, 28 d 充填体强度均满足金川矿山的充填要求。

### 2.2 优化配比后的验证试验

通过以上试验以及建模优化决策分析, 采用胶凝材料最优配比, 严格按照规定的实验方法得到 1#、2#、3# 的 3, 7, 28 d 单轴抗压强度结果如表 10 所示。由此可见, 按照上述优化决策得到的最优配比进行试验得到的结果完全满足金川矿山提出的  $R_{3d} \geq 1.5 \text{ MPa}$ ,  $R_{7d} \geq 2.5 \text{ MPa}$ ,  $R_{28d} \geq 5 \text{ MPa}$  的要求。

表 10 全尾砂-棒磨砂新型充填胶凝材料验证试验强度

Tab. 10 The verification test strength of cemented filling with whole tailings and rod milling sand

3 d 抗压强度/MPa				7 d 抗压强度/MPa				28 d 抗压强度/MPa			
1#	2#	3#	平均	1#	2#	3#	平均	1#	2#	3#	平均
1.78	1.52	1.55	1.62	2.66	2.60	2.58	2.61	7.22	7.25	6.98	7.15

### 3 结论

1) 通过对金川全尾砂的质量分析结得出金川全尾砂属于中性材料, 没有胶结活性, 可以作为充填骨料。

2) 在正交方差分析基础上运用 DPS 回归分析得到了 3, 7, 28 d 的强度与因素添加量函数关系方程, 然后运用 MATLAB 进行建模优化, 最终确定采用全尾砂与棒磨砂比例为 3 : 7, 生石灰添加量为 2%, 脱硫灰渣添加量为 20.7%, 粉煤灰添加量为 5%, 芒硝添加量为 4.27%, 氢氧化钠添加量为 0.95%, 料浆浓度为 78% 的实验方案。

3) 根据最后优化的配比和验证试验, 按照生石灰 330 元/t, 芒硝 1 000 元/t, 氢氧化钠 2 100 元/t 和渣粉 110 元/t 计算, 新型胶凝充填材料的成本为:  $330 \times 2\% + 1000 \times 4.27\% + 2100 \times 0.95 + 110 \times 67.08 = 143.038 \text{ 元/t}$ 。与原来水泥充填 187 元/t 的成本相比, 节省 43.9 元/t, 降低了充填成本。

### 参考文献:

[1] 崔学奇, 胡术刚, 葛会超, 等. 复合胶凝材料在矿山尾矿胶结中的应用研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2007, 26(1): 49-52.  
Cui Xueqi, Hu Shugang, Ge Huichao, et al. Study on application of compound binding materials in cementation of mine tailings[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2007, 26(1): 49-52.

[2] 孟跃辉. 我国尾矿综合利用发展现状及前景[J]. 中国矿山工程, 2010, 39(5): 4-9.  
Meng Yaohui. Current state of ore tailings reusing and its future development in China[J]. China Mine Engineering, 2010, 39(5): 4-9.

[3] 蒲含勇, 张应红. 论我国矿产资源的综合利用[J]. 矿产综合利用, 2001(4): 19-22.  
Pu Hanyong, Zhang Yinghong. Multipurpose utilization of mineral resources[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2001(4): 19-22.

[4] 中华人民共和国国家标准. GB/T 203-1994, 用于水泥中的粒化高炉矿渣[S].

[5] 杨志强, 高谦, 陈得信, 等. 金川镍矿全尾砂-棒磨砂混合充填材料工业充填试验研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版,

2014,33(2):40-47.

Yang Zhiqiang, Gao Qian, Chen Dexin, et al. Industrial filling experiment on full tailings-rod milled sands as mixed filling materials in Jinchuan Nickel Mine[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2014, 33(2):40-47.

- [6] 张若江, 张新国, 白继文, 等. 膏体充填材料配比试验与水化反应机理研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2012, 31(6):62-68.

Zhang Ruojiang, Zhang Xinguo, Bai Jiwen, et al. Research on proportion test and hydration mechanism of paste filling material[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2012, 31(6):62-68.

- [7] 潘群雄, 张长森. 影响碱-粉煤灰-矿渣基胶凝材料性能因素的探讨[J]. 水泥工程, 1999(2):1-3.

Pan Qunxiong, Zhang Changsen. On the factors influencing the property of alkali-flyash-slag based cementitious material[J]. Cement Engineering, 1999(2):1-3.

- [8] 陈晓波. 粉煤灰胶凝材料体系混凝土的应用研究[J]. 浙江建筑, 2009, 26(8):66-69.

Chen Xiaobo. Study on application of concrete in fly ash cement material system[J]. Zhejiang Construction, 2009, 26(8):66-69.

- [9] 梁慧. 粉煤灰活性效应研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007:47-49.

- [10] 伏程红, 倪文, 张旭芳, 等. 矿渣-粉煤灰基高性能混凝土专用胶凝材料[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(5):606-613.

Fu Chenghong, Ni Wen, Zhang Xufang, et al. Slag-fly ash based cementitious materials special for high performance concrete[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(5):606-613.

- [11] 代奎, 艾池. 矿渣-粉煤灰混合胶凝材料的水化及硬化实验[J]. 大庆石油学院学报, 2008, 32(3):43-45.

Dai Kui, Ai Chi. Experiment with hydration and hardening of mixture of slag-fly ash and cementitious materials[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2008, 32(3):43-45.

- [12] 李书进, 厉见芬. 碱激发大掺量粉煤灰胶凝材料的试验研究[J]. 粉煤灰, 2010(6):10-14.

Li Shujin, Li Jianfen. Experimental study of alkali activated large-volume fly ash cementitious materials[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2010(6):10-14.

- [13] 雷雨滋, 郑南翔, 李炜. 低活性粉煤灰化学激活方法研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(10):16-19.

Lei Yuzi, Zheng Nanxiang, Li Wei. Research on chemical activation method of low activity fly-ash[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(10):16-19.

(责任编辑: 吕海亮)