

文章编号:1674-2869(2017)06-0600-07

黄磷尾渣超细粉粒度特性和掺量对混凝土性能的影响

刘林焱^{1,2,3}, 谢俊^{1,2,3}, 李先海^{1,2,3}, 张覃^{1,2,3*}

1. 贵州大学矿业学院, 贵州 贵阳 550025;

2. 喀斯特地区优势矿产资源高效利用国家地方联合工程实验室, 贵州 贵阳 550025;

3. 贵州省非金属矿产资源综合利用重点实验室, 贵州 贵阳 550025

摘要:对比棒磨和球磨条件下,黄磷尾渣-0.075 mm、-0.045 mm所占百分比与磨矿时间的关系,确定球磨为合适的磨矿方式;在球磨方式下,考察磨矿时间对黄磷尾渣的粒度特性和比表面积的影响;基于 Rosin-Rammler-Bennet (RRB) 分布方程建立模型,结果证实黄磷尾渣磨矿特性符合 RRB 分布. 黄磷尾渣超细粉的特征粒径(D_c)和比表面积对混凝土强度都呈现出先增大后减小的趋势,混凝土强度(凝结时间 1 d)最大值在特征粒径为 59.76 μm ,比表面积为 530.15 m^2/g ,黄磷尾渣掺量为 25%时出现,为 27.429 MPa.

关键词:黄磷尾渣;RRB 分布方程;特征粒径;比表面积;混凝土

中图分类号:TU528 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2017.06.013

Effect of Particle Size Characteristic and Mixing Amount of Yellow Phosphorus Slag on Concrete Performance

LIU Linyan^{1,2,3}, XIE Jun^{1,2,3}, LI Xianhai^{1,2,3}, ZHANG Qin^{1,2,3*}

1. Mining College, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. National & Local Joint Laboratory of Engineering for Effective Utilization of Regional Mineral Resources from Karst Areas, Guiyang 550025, China;

3. Guizhou Key Lab of Comprehensive Utilization of Non-Metallic Mineral Resources, Guiyang 550025, China

Abstract: The relation between the mass fraction of yellow phosphorus slag particles with -0.075 mm, -0.045 mm and the grinding time in the rod milling and the ball milling was investigated, indicating the ball milling being a better grinding method. Then, effects of the grinding time on characteristic particle size and specific surface area of yellow phosphorus slag were also studied in the ball mill. It was found that the size characteristics of slag were consistent with the Rosin-Rammler-Bennet (RRB) distribution through the model constructed by RRB distribution equation. As the characteristic particle size (D_c) and specific surface area of yellow phosphorus slag increases, the concrete strength increases firstly and then decreases. The maximum strength of 27.429 MPa (setting time 1 d) could be achieved when D_c , specific surface area and mixing amount of yellow phosphorus slag are 59.76 μm , 530.15 m^2/g and 25%, respectively.

Keywords: yellow phosphorus slag; RRB distribution equation; characteristic particle size; specific surface area; concrete

收稿日期:2017-05-27

基金项目:贵州省科学技术基金(黔科合JZ字[2014]2009号);贵州省重大专项[(2011)6023号]

作者简介:刘林焱,本科生. E-mail:1355254299@qq.com

*通讯作者:张覃,博士,教授,博士研究生导师. E-mail:qzhang@gzu.edu.cn

引文格式:刘林焱,谢俊,李先海,等. 黄磷尾渣超细粉粒度特性和掺量对混凝土性能的影响 [J]. 武汉工程大学学报, 2017, 39(6): 600-606.

LIU L Y, XIE J, LI X H, et al. Effect of particle size characteristic and mixing amount of yellow phosphorus slag on concrete performance [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2017, 39(6): 600-606.

黄磷尾渣是电炉法制备黄磷时的工业副产品^[1]. 在黄磷的制备过程中,焦炭和硅石用作还原剂和成渣剂,使磷矿石中的钙和二氧化硅形成熔融炉渣,排出后,经水淬急冷,形成磷渣,其主要成分为CaO和SiO₂^[2]. 黄磷渣在水泥^[3]、制砖^[4]、农肥^[5]、白炭黑^[6]、陶瓷^[7]等方面具有广泛的应用,熔融黄磷渣还可转化为微晶玻璃材料^[8],因此可将其归为二次资源. 目前,大量黄磷尾渣堆积,造成环境污染和资源浪费,因此对其进行开发利用显得较为重要^[9].

混凝土是复杂多相体系,浇捣过程中,集料周围会形成水膜,使集料附近水灰比变高、界面过渡区毛细孔变大、晶体富集并择优取向、各组分不易均匀和紧密堆积,形成大量微裂缝,影响其性能^[10]. 活性磷渣掺合料的加入可抑制水膜的形成和晶体界面区的生长,有效改善混凝土胶结材的结构^[11]. 因为粒状磷渣中存在大量玻璃态物质,可以和水泥发生二次水化反应,生成强度更高、稳定性更好的低碱度水化硅酸钙凝胶体和水化铝酸钙,从而改善水泥胶凝材料的组成,减少或消除游离石灰,

使水泥中磷渣水化,形成良性循环^[12]. 磷渣掺合料的颗粒尺寸、比表面积等对混凝土性能影响较显著,即矿物掺和料的“形貌效应”^[13].

本研究通过改变磨矿方式和磨矿时间,得到具有不同物理化学性质的黄磷尾渣细粉,基于Rosin-Rammler-Bennet (RRB) 分布方程^[14]建立模型,考察特征粒径(D_c)和均匀性系数(n)对混凝土性能的影响,从而为高性能混凝土的制作提供理论指导.

1 黄磷尾渣性质

黄磷尾渣的X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)分析如图1(a)所示,该样品无明显衍射峰,但样品在20°~35°之间出现了较为明显的宽化峰,说明样品中可能含有较多的无定型SiO₂. 结合黄磷尾渣切片的显微镜图[见图1(b)],可确定黄磷尾渣中含有较多的不定形SiO₂,其颗粒大小为3.9 μm~11.1 μm.

黄磷尾渣的化学分析表明,尾渣中SiO₂、CaO和MgO的质量分数分别为78.46%、18.10%和1.42%,其它杂质含量均较低.

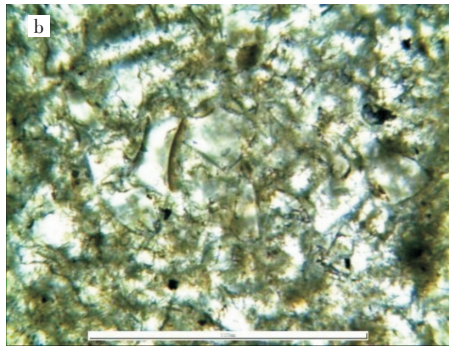
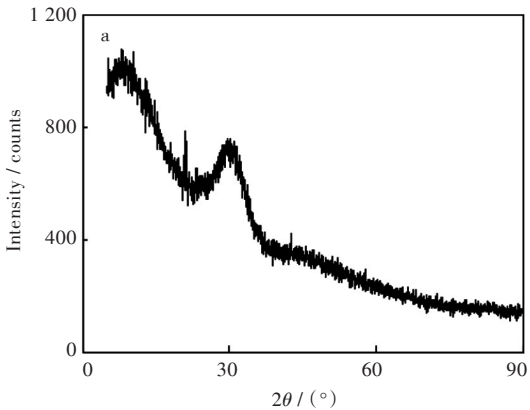


图1 黄磷尾渣的(a)XRD图和(b)切片显微镜图

Fig. 1 (a) XRD pattern and (b) micrograph of yellow phosphorus slag

2 磨矿试验

2.1 磨矿时间和磨矿方式对黄磷尾渣粒度特性的影响

取300 g黄磷尾渣,在磨矿浓度为60%(质量分数,下同)的条件下,分别考察棒磨和球磨时间对黄磷尾渣粒度组成的影响,结果列于表1和表2中.

黄磷尾渣用做掺料必须达到一定的细度,才能有效改善混凝土性能. 由表1、表2所列结果可知,未磨矿前,黄磷尾渣粒度较粗,+0.075 mm 粒级占87.08%,必须对黄磷尾渣细磨. 由化学分析结果可知,黄磷尾渣中SiO₂含量较高且硬度较大,较难磨. 为得到黄磷尾渣超细粉,选择一种高效的磨矿

方式,对比了棒磨和球磨时黄磷尾渣-0.075 mm和-0.045 mm两个粒级所占的百分比,结果如图2所示. 由图2可知:随着磨矿时间增加,黄磷尾渣-0.075 mm和-0.045 mm两个粒级所占百分比均增加;磨矿时间在0 min~9 min时,这两个粒级所占百分比增加较快;磨矿时间超过9 min后,这两个粒级所占百分比增加缓慢. 这是因为磨矿时间达到9 min时黄磷尾渣细度已较大,颗粒比表面积较大,表面能较高,继续增加磨矿时间,很难再减小颗粒尺寸,增加比表面积和表面能. 对比棒磨、球磨方式下黄磷渣-0.075 mm所占的百分比与磨矿时间的关系可知,随着磨矿时间的增加,两种磨矿方式对黄磷渣-0.075 mm所占百分比的影响几乎

一致,很难从黄磷渣该粒级所占百分比来判断哪种磨机效果更好.对比棒磨、球磨方式下黄磷渣-0.045 mm 所占的百分比与磨矿时间的关系可知:0 min~2 min 时,两种磨矿方式之间差距不大;超过 2 min 后,球磨、棒磨所对应的黄磷渣-0.045 mm 所占的百分比差距逐渐增加,球磨方式下,黄磷渣-0.045 mm 所占的百分比远大于棒磨条件下的百分比,9 min 时,球磨与棒磨该粒级所

占百分比相差最大,相差约 20%.对比表 1 表 2 中磨矿时间为 9 min 的黄磷尾渣粒度组成可知,较棒磨而言,9 min 时,球磨方式下黄磷渣中 0.075 mm~0.059 mm 粒级的大量颗粒转移到-0.038 5 mm 粒级中,导致-0.045 mm 粒级所占百分比增加而-0.075 mm 所占百分比几乎不变.

综合考虑磨矿效率和磨矿成本,选择球磨方式较合适.

表 1 棒磨时间与黄磷尾渣粒度组成的关系
Tab. 1 Relation between rod milling time and particle size distribution of yellow phosphorus slag

粒级 size fraction / mm	质量百分数 mass fraction / %								
	0 min	1 min	3 min	5 min	7 min	9 min	11 min	13 min	17 min
+0.301									
-0.301 +0.095	24.41	51.44	59.27	31.89	7.46	1.45	1.45	1.26	0.24
-0.095 +0.075	2.35	4.24	6.66	15.39	18.52	5.07	5.07	2.62	2.62
-0.075 +0.059	2.36	5.50	10.75	22.62	31.74	44.54	44.54	36.98	27.84
-0.059 +0.045	2.59	1.72	1.52	2.29	2.69	3.26	3.26	5.35	7.78
-0.045 +0.0385	2.66	2.87	3.22	5.12	8.02	12.97	12.97	16.88	20.06
-0.0385	4.75	13.52	18.58	22.69	31.57	32.71	32.71	36.91	41.46
合计	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

表 2 球磨时间与黄磷尾渣粒度组成的关系
Tab. 2 Relation between ball milling time and particle size distribution of yellow phosphorus slag

粒级 size fraction / mm	质量分数 mass fraction / %					
	0 min	1 min	5 min	9 min	13 min	17 min
+0.301						
-0.301 +0.095	24.41	43.74	26.93	3.78	0	0
-0.095 +0.075	2.35	10.05	14.13	10.10	2.47	0.72
-0.075 +0.059	2.62	8.85	20.71	24.15	22.25	14.91
-0.059 +0.045	2.59	0.53	4.05	4.30	10.23	8.42
-0.045 +0.0385	2.66	2.44	7.54	14.61	19.77	20.81
-0.0385	4.75	13.29	26.64	43.06	45.28	55.14
合计	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

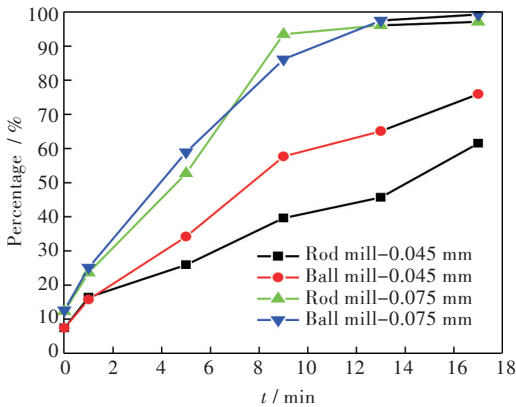


图 2 棒磨和球磨-0.075 mm、-0.045 mm 所占百分比与磨矿时间的关系
Fig. 2 Relation between mass fraction of particle size with -0.075 mm, -0.045 mm and grinding time in rod milling and ball milling

2.2 磨矿时间对黄磷尾渣比表面积的影响

以球磨方式对黄磷尾渣进行磨矿试验,考察不同磨矿时间对黄磷尾渣比表面积的影响.比表面积测定采用 Brunauer-Emmett-Teller(BET)方法,使用的仪器为 F-Sorb3400,黄磷尾渣比表面积与磨矿时间的关系如图 3 所示.

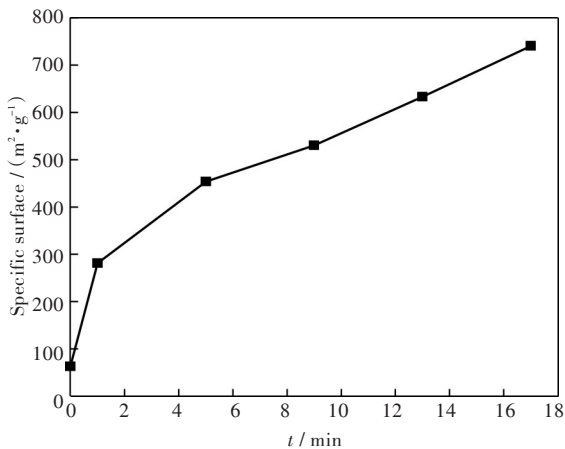


图 3 黄磷尾渣比表面积与球磨时间的关系
Fig. 3 Relation between specific surface area and ball milling time of yellow phosphorus slag

由图 3 可知,磨矿时间为 0 min~5 min 时,黄磷尾渣的比表面积增加较快,磨矿时间超过 5 min 后,比表面积随时间增加的趋势较之前稍有变缓.黄磷尾渣颗粒的比表面积对混凝土性能有较大影响,黄磷尾渣颗粒越小,比表面积越大,越有利于抑制混凝土集料周围水膜的形成和晶体界面区的

生长,同时黄磷尾渣比表面积越大,越利于与水泥发生二次水化反应,从而改善水泥中凝胶物质的组成^[15].

由图2所示的球磨时间与黄磷尾渣-0.045 mm所占百分比以及球磨时间与黄磷尾渣比表面积的关系,综合表2所列的球磨时间与黄磷尾渣粒度组成,确定磨矿时间为9 min较合适.

表3 混凝土中材料组成及黄磷尾渣掺量
Tab. 3 Composition of concrete and content of yellow phosphorus slag

编号 No.	1 m ³ 混凝土材料组成 / kg(1 m ³ concrete material composition / kg)						黄磷渣含量	外加剂含量	砂率含量
	水 water	水泥 cement	黄磷尾渣粉 yellow phosphorus slag	减水剂 water reducer	砂子 sand	碎石 gravel	yellow phosphorus slag content / %	additive content / %	sand content / %
A	250	500	0	2.5	635	800	0	0.1	29
B	250	400	100	2.5	635	800	20	0.1	29
C	250	375	125	2.5	635	800	25	0.1	29
D	250	350	150	2.5	635	800	30	0.1	29
E	250	325	175	2.5	635	800	35	0.1	29
F	250	300	200	2.5	635	800	40	0.1	29

3.1 RRB模型特征粒径和均匀性系数的计算

粉磨可得到水泥、高炉矿渣、钢渣和石灰石等混凝土掺合料粉体,通过 Rosin-Rammler-Bennet (RRB)分布方程可描述其粒度特性,拟合可得特征粒径(D_e)和均匀性系数(n),从而表征粉体粒度分布特征^[14].RRB方程表达式如下^[16]:

$$\log \log \left(\frac{100}{R} \right) = n \log \left(\frac{D}{D_e} \right) + \log(\log e) \quad (1)$$

式(1)中: R 为粒径为 D 时对应的筛上质量分数,%; D_e 为特征粒径,表示颗粒粗细程度,物理意义为 $R=36.8\%$ 时的颗粒粒径, μm ; n 为均匀性系数,表示粒度分布宽窄程度, n 值越大,粒度分布范围越窄.

D_e 的计算可分为2种方法.方法一:首先令 $y=\log \log (100/R)$ 、 $x=\log (D / D_e)$,使之成为线性方程 $y=nx-\log (\log e)$,根据最小二乘法原理进行线性回归,使 $\sum (y_i - y_j)^2$ 最小,从而求得与公式(1)相对应的 D_e 和 n 的最优值;方法二:根据不同球磨时间对应的黄磷尾渣粒度组成(见表2),采用线性插值法计算得到特征粒径 D_e ,在特征粒径 D_e 已知

3 黄磷尾渣粒度特征及掺量对混凝土强度的影响

本研究中将黄磷尾渣用于混凝土掺和料,混凝土中黄磷尾渣的掺量(黄磷尾渣与水泥的配比)及各组分含量如表3所示.

时,对 R 、 D 线性拟合得到线性方程 $y=nx-\log (\log e)$,方程斜率即为均匀性系数 n ^[17].

根据原始数据,直接采用插值法计算得到的特征粒径 D_e ,更能反映粉体的实际粒度特征^[18].采用方法二所得的黄磷尾渣特征粒径值如表4所示,由表4可知,随着磨矿时间增加,黄磷尾渣的特征粒径逐渐减小,球磨时间为1 min~13 min时,特征粒径减小的较快,颗粒群越来越细;球磨时间超过13 min后,特征粒径减小的较慢.在特征粒径 D_e 已知时,对 R 、 D 线性拟合可得均匀性系数 n ,不同球磨时间对应的RRB拟合曲线如图4所示,由图4可知,不同磨矿时间下,拟合曲线的线性相关性均较强,由曲线所得均匀性系数较准确.均匀性系数 n 值如表4所示,由表4可知,均匀性系数均大于1且基本在1.2左右,表明黄磷尾渣颗粒分布范围较窄,且随磨矿时间增加黄磷尾渣分布的宽窄程度基本不变,磨矿时间短时,黄磷尾渣主要在较窄的粗颗粒范围,随着磨矿时间增加,黄磷尾渣颗粒向细粒级转移,但分布范围仍较窄.特征粒径 D_e 和均匀性系数 n 与球磨时间的关系如图5所示.

表 4 不同球磨时间对应的特征粒径、线性方程和均匀性系数

球磨时间	特征粒径	RRB 拟合线性方程	均匀系数 n
ball milling time / min	characteristic particle size / μm	RRB fitted linear equation	uniformity coefficient n
1	227.058 5	$\log\log(100/R)=1.253\log(D/D_e)-0.286$	1.253
5	80.331 2	$\log\log(100/R)=1.441\log(D/D_e)-0.423$	1.441
9	59.764	$\log\log(100/R)=1.266\log(D/D_e)-0.167$	1.266
13	44.391 8	$\log\log(100/R)=1.152\log(D/D_e)-0.353$	1.152
17	41.017 5	$\log\log(100/R)=1.171\log(D/D_e)-0.268$	1.171

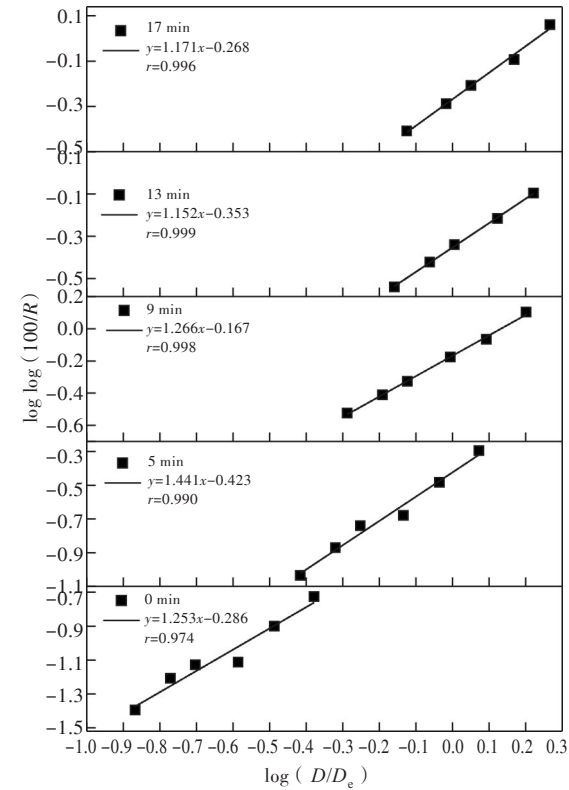


图 4 不同球磨时间对应的 RRB 拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of RRB with different ball milling times

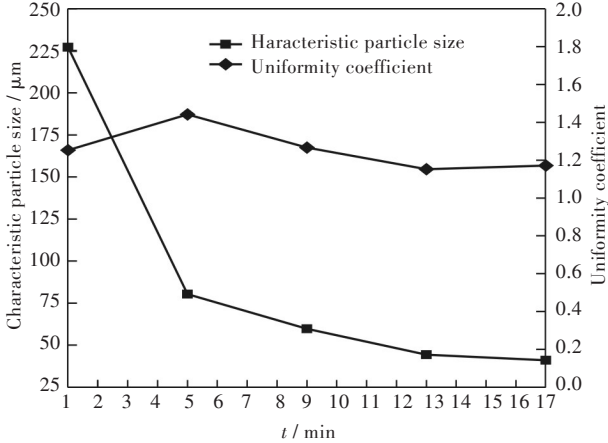


图 5 特征粒径 D_e 、均匀性系数 n 与球磨时间的关系

Fig. 5 Relation between characteristic particle size D_e , uniformity coefficient n and ball milling time

3.2 黄磷尾渣特征粒径对混凝土强度的影响

选取球磨时间分别为 5 min、9 min、13 min 的

黄磷尾渣(对应特征粒径为 80.33 μm 、59.76 μm 、44.39 μm),在黄磷尾渣掺量(质量分数,下同)为 20%、25%、30%、35%和 40%的条件下,考察黄磷尾渣特征粒径 D_e 对混凝土强度的影响规律,结果如图 6(a)所示。

由图 6(a)可知,当黄磷尾渣掺量为 20%时,随着黄磷尾渣特征粒径的增大,混凝土强度呈现逐渐降低的趋势,降低的幅度较小,主要原因在于此时的黄磷尾渣掺量是影响混凝土强度的主要因素,在掺量较小的情况下,虽然其特征粒径发生改变,但对混凝土强度的影响不大;其它 4 种掺量条件下,随着黄磷尾渣特征粒径的增大,混凝土强度呈现先增大后减小的趋势,在特征粒径为 59.76 μm 时,混凝土强度达到最大值,为 27.429 MPa;对比黄磷尾渣掺量分别为 25%、30%、35%和 40%时的混凝土强度可知,随着黄磷尾渣掺量的增加,混凝土强度呈现逐渐降低的趋势,降低的幅度较大,说明黄磷尾渣掺量对混凝土强度影响较大,在黄磷尾渣掺量为 25%时,混凝土强度达到最大值。

3.3 黄磷尾渣比表面积对混凝土强度的影响

选取球磨时间分别为 5 min、9 min、13 min 的黄磷尾渣(对应比表面积为 453.4 m^2/g 、530.2 m^2/g 、633.1 m^2/g),在黄磷尾渣掺量为 20%、25%、30%、35%和 40%的条件下,考察黄磷尾渣特征粒径 D_e 对混凝土强度的影响规律,结果如 6(b)所示。

由图 6(b)可知,当黄磷尾渣掺量为 20%时,随着黄磷尾渣比表面积的增大,混凝土强度逐渐增加,增加的幅度较小;当黄磷尾渣掺量为 25%、30%、35%和 40%时,随着黄磷尾渣比表面积增大,混凝土强度先增大后减小,在比表面积为 530.2 m^2/g 时,混凝土强度达到最大值;对比 4 种掺量时的混凝土强度可知,随着黄磷尾渣掺量的增加,混凝土强度逐渐降低,降低的幅度较大,在黄磷尾渣掺量为 25%时,混凝土强度达最大。

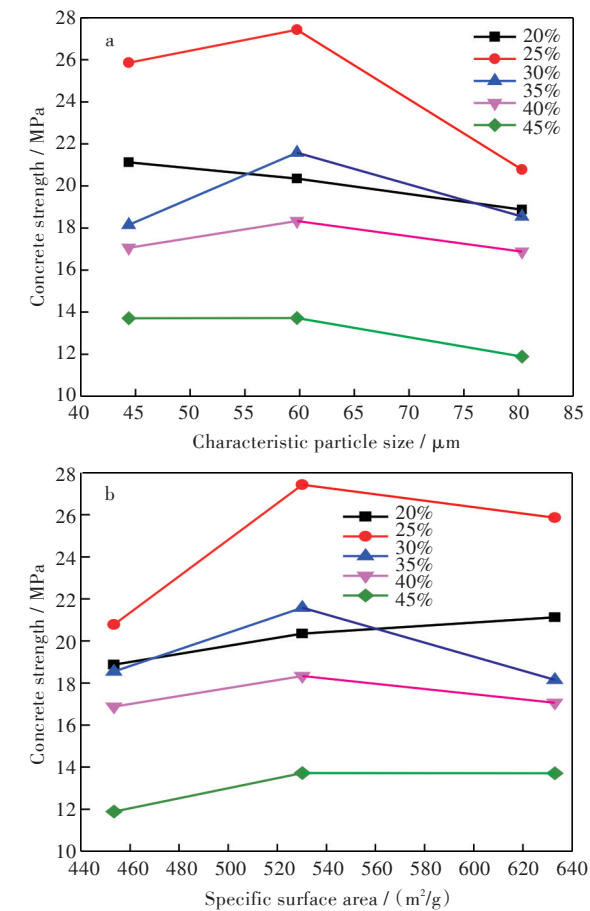


图6 混凝土强度与黄磷尾渣的(a)特征粒径和(b)比表面积的关系图

Fig. 6 Relation between concrete strength and (a)characteristic particle size and (b) specific surface area of yellow phosphorus slag

4 结 语

为充分利用黄磷尾渣作为掺和料,改善混凝土的性能,通过磨矿动力学及筛析试验考察棒磨和球磨两种方式以及磨矿时间对黄磷尾渣粒度特性的影响,考察磨矿时间对黄磷尾渣的粒度特性和比表面积的影响,并基于RRB分布方程建立模型,考察黄磷尾渣超细粉掺量、特征粒径(D_e)和比表面积对混凝土性能的影响。

1)相同磨矿时间下,球磨方式对应黄磷尾渣-0.075 mm所占百分比与棒磨方式差别不大,但球磨方式对应的黄磷尾渣-0.045 mm所占百分比远高于棒磨方式,考虑磨矿成本和磨矿效率,选择球磨方式较为合适。

2)随着球磨时间增加,黄磷尾渣的比表面积增加,磨矿时间为0 min~5 min时,黄磷尾渣比表面积增加较快,磨矿时间超过5 min后,比表面积随时间增加的趋势稍有变缓。

3)根据插值法得到不同球磨时间对应的特征粒径 D_e ,在 D_e 已知的情况下,通过RRB模型拟合可得不同球磨时间对应的均匀性系数 n ,拟合曲线的线性相关性均较强,所得均匀性系数较准确。随着球磨时间增加,特征粒径 D_e 逐渐减小,均匀性系数 n 基本在1.2左右,表明黄磷尾渣颗粒由粗颗粒转变到细颗粒,但粒级仍较窄。

4)在特征粒径为59.76 μm ,比表面积为530.2 m^2/g ,黄磷尾渣掺量为25%时,混凝土强度达到最大值,最大值为27.429 MPa。

参考文献:

[1] 李甫,沈毅. 贵州省黄磷渣资源化利用研究[J]. 中国非金属矿工业导刊,2007(4):18-20.
LI P, SHEN Y. Research on resourceful application of yellow phosphorus slag in Guizhou province[J]. China Non-Metallic Mining Industry Herald,2007(4):18-20.

[2] 高旭伟,吴勇生. 黄磷渣资源化利用的现状与发展趋势[J]. 中国资源综合利用,2010,28(1):28-30.
GAO X W, WU Y S. Current situation and development trend of yellow phosphorus residue utilization [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2010, 28 (1):28-30.

[3] 韩代水. 利用黄磷渣生产磷渣超微粉用于水泥添加剂[J]. 磷肥与复肥,2012,27(4):72-73.
HANG D S. Production of phosphorus slag ultrafine powder from elemental phosphorus slag used as cement additive [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2012, 27 (4):72-73.

[4] 周强武,杨林,张垠,等. 脱碳粉煤灰-磷石膏蒸压砖的制备研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版),2009,26(3):100-102.
ZHOU Q W, YANG L, ZHANG Y, et al. Study on preparation of decarburized fly ash-phosphogypsum autoclaved brick [J]. Journal of Guizhou University (Natural Science Edition), 2009, 26(3):100-102.

[5] 胡绵超. 高炉生产黄磷、无镉肥料,磷煤耦合共生[J]. 磷肥与复肥,2016,31(8):30-33.
HU M C. Production of yellow phosphorus and cadmium-free fertilizer with blast furnace, generative coupling phosphorus and coal [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2016, 31(8):30-33.

[6] 马艳丽,苏毅,李国斌,等. 黄磷炉渣精制白炭黑的实验研究[J]. 硅酸盐通报,2010,29(5):1202-1205.
MA Y L, SU Y, LI G B, et al. Experimental study on refining white carbon with yellow phosphorus slag[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2010, 29 (5): 1202-1205.

- [7] 江阔,霍冀川,腾远成,等.大掺量黄磷渣制作陶瓷素坯的矿物结构分析[J].硅酸盐通报,2001,20(6):53-57.
- JIANG K, HUO J C, TENG Y C, et al. The mineral structural analysis of ceramic biscuit with large numbers of residues of yellow phosphorus [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2001, 20 (6): 53-57.
- [8] 刘红盼,黄小凤,马丽萍,等.模拟熔融态黄磷炉渣制备微晶玻璃析晶规律研究[J].人工晶体学报,2016,45(11):2577-2584.
- LIU H P, HUANG X F, MA L P, et al. Crystallization law of glass-ceramics derived from simulated molten furnace slag of yellow phosphorus [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2016, 45(11): 2577-2584.
- [9] 蒋明,王重华,黄小凤,等.黄磷炉渣热态成型资源化过程的二次污染预测[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(3):1078-1084.
- JIANG M, WANG Z H, HUANG X F, et al. Secondary pollution prediction of recycling process of yellow phosphorus slag by moulding under thermal state [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(3): 1078-1084.
- [10] 刘喜,吕贝贝,刘全威,等.高强轻骨料陶粒混凝土配合比及强度影响因素试验研究[J].硅酸盐通报,2014,33(4):847-852.
- LIU X, LÜ B B, LIU Q W, et al. Mechanical properties of lightweight concrete under mix proportion and strength factors [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(4): 847-852.
- [11] 魏莹,李兆锋,李丙明,等.磷渣对水泥混凝土性能的影响及机理探讨[J].硅酸盐通报,2008,27(4):822-826.
- WEI Y, LI Z F, LI B M, et al. Study of effect of phosphorous slag on cement concrete performance and mechanics research [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2008, 27(4): 822-826.
- [12] 胡鹏刚,徐德龙,宋强,等.磷渣掺合料对水泥混凝土性能的影响及机理探讨[J].混凝土,2007(5):48-49,52.
- HU P G, XU D L, SONG Q, et al. Study of effect of phosphorous slag on cement concrete performance and mechanism researching [J]. Concrete, 2007 (5): 48-49, 52.
- [13] 刘冬梅,方坤河,石妍.磷渣对水泥浆体水化性能和孔结构的影响[J].硅酸盐学报,2007,35(1):109-113.
- LIU D M, FANG K H, SHI Y. Effects of phosphorus slag on hydration properties and pore structure of cement paste [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35 (1): 109-113.
- [14] 吴春芬,方莹,李镇,等.水泥熟料的粉磨动力学研究[J].硅酸盐通报,2010,29(1):235-238.
- WU C F, FANG Y, LI Z, et al. Research on the grinding dynamics of cement clinker [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2010, 29 (1): 235-238.
- [15] 周双喜,陈益民,张文生,等.颗粒分布、比表面积、化学组成对水泥强度的影响[J].硅酸盐通报,2006,25(1):81-85.
- ZHOU S X, CHEN Y M, ZHANG W S, et al. Effect of the particle size distribution, surface area and chemical composition on the cement strength [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2006, 25 (1): 81-85.
- [16] 李北星,陈梦义,王威,等.粉磨方式对铁尾矿—矿渣基胶凝材料的性能影响[J].硅酸盐通报,2013,32(8):1463-1467.
- LI B X, CHEN M Y, WANG W, et al. Effect of grinding method on performance of iron tailings-slag based cementitious material [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32 (8): 1463-1467.
- [17] 赵三银,赵旭光,余其俊. RRB 分布模型特征粒径和均匀性系数的准确计算[J].水泥,2006(5):1-3.
- ZHAO S Y, ZHAO X G, YU Q J. To accurately calculate cutting diameter of particles and factor n with RRB curve [J]. Cement, 2006(5): 1-3.
- [18] 罗帆.基于牛顿插值法的 D_x 粒径简便计算[J].水泥,2010(1):22-23.
- LUO F. Simple calculation of D_x particle size based on Newton interpolation method [J]. Cement, 2010 (1): 22-23.

本文编辑:苗 变