

焙烧与生石灰改性对磷石膏中可溶磷含量的影响*

耿乾^{1,2}, 孙红娟^{1,2}, 彭同江^{1,2,3}, 丁文金^{1,2}, 罗东山^{1,2}, 陈秋菊^{1,2}

(1. 西南科技大学 固体废物处理与资源化教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010; 2. 西南科技大学 矿物材料及应用研究所, 四川 绵阳 621010; 3. 西南科技大学 分析测试中心, 四川 绵阳 621010)

摘要: 磷石膏因含有可溶磷, 限制了其在建材领域的应用。以生石灰作为改性剂, 研究了不同生石灰/磷石膏质量比及不同焙烧温度下磷石膏中可溶磷含量的变化。采用 X 射线衍射仪、场发射扫描电镜、酸碱度仪和激光粒度分析仪等仪器对焙烧前后磷石膏的物相组成、微观形貌、酸碱度和粒度分布等进行分析对比。结果表明: 当焙烧温度为 100 ~ 200 °C 时, 磷石膏中的石膏全部转变为烧石膏, 磷石膏晶体表面发生破损, 导致可溶磷含量随着焙烧温度的升高而逐渐增加; 由于生石灰能促进可溶磷转化为难溶物质, 在加入改性剂生石灰焙烧后, 磷石膏中可溶磷得到有效降低, 且随生石灰用量的增加, 可溶磷含量不断降低; 通过对磷石膏改性焙烧, 可获得可溶磷含量极低的磷石膏。这将为磷石膏的资源化利用提供新的指导。

关键词: 磷石膏; 可溶磷; 生石灰; 焙烧; 改性

中图分类号: X754 文献标识码: A 文章编号: 1001 - 0076(2019)04 - 0009 - 05

DOI: 10. 13779/j. cnki. issn1001 - 0076. 2019. 04. 002

Effect of Roasting and Quicklime Modification on Soluble Phosphorus Content in Phosphogypsum

GENG Qian^{1,2}, SUN Hongjuan^{1,2}, PENG Tongjiang^{1,2,3}, DING Wenjin^{1,2}, LUO Dongshan^{1,2}, CHEN Qiuju^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Solid Waste Treatment and Resource Recycle, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. Institute of Mineral and Application, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 3. Analytical and Testing Center, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: Phosphogypsum contains soluble phosphorus, which limits the application of phosphogypsum in building materials. Using quicklime as a modifier, the content of soluble phosphorus in phosphogypsum under different mass ratio of quicklime/phosphogypsum and different calcination temperatures were studied. X - ray diffraction, field emission scanning electron microscopy, acidity - basicity analyzer and laser particle size analyzer were used to analyze and compare the phase composition, micro - morphology, acidity - basicity and particle size distribution of phosphogypsum before and after calcination. The results showed that all gypsum in phosphogypsum was converted to bassanite when the calcination temperature was between 100 °C and 200 °C. The surface of the phosphogypsum crystal was damaged, which caused the soluble phosphorus content to increase gradually with the calcination temperature. Since quicklime can promote the conversion of soluble phosphorus into insoluble substance, the soluble phosphorus in phosphogypsum can be reduced effectively after adding the modifier of quicklime. The content of soluble phosphorus decreased with quicklime dosage. Phosphogypsum with a slight content of soluble phosphorus can be obtained by modifying and calcining. This will provide new guidance for the resource utilization of phosphogypsum.

Key words: phosphogypsum; soluble phosphorus; quicklime; calcination; modification

* 收稿日期: 2019 - 04 - 09

基金项目: 西南科技大学 2017 年龙山学术人才科研支持团队项目(17LZXT11)

作者简介: 耿乾(1995 -), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, E - mail: gengqian166@163.com。

通信作者: 孙红娟(1976 -), 女, 安徽马鞍山人, 教授, 博士生导师, E - mail: sunhongjuan@swust.edu.cn。

引言

磷石膏是由磷化工行业生产磷酸时产生的工业副产物。每生产 1 t 磷酸,会产生 5 t 的磷石膏^[1]。随着磷石膏的不断累积,许多堆场已经饱和,而且磷石膏的堆存严重增加了环境风险^[2,3]。近年来,国家对于环境保护的重视程度不断提高,尤其是对磷化工行业提出了更加严格规定^[4],亟需为磷石膏找到大规模资源化利用的方式。

磷石膏中的磷的存在形态可以分为难溶磷、共晶磷与可溶磷。其中的可溶磷限制了磷石膏的直接资源化利用。张欢等^[5]研究发现可溶磷对磷石膏性能有较大影响,特别是以 H_3PO_4 形态存在的可溶磷对磷石膏的影响程度较大。磷石膏中的可溶磷会与钙离子发生反应,生成难溶的钙盐,阻碍二水硫酸钙的溶解,延长凝结时间^[6,7]。Singh Manjit^[8]研究发现磷石膏中的可溶磷导致了水化产物晶体间结合力减弱、晶粒粗化、结构疏松。针对以上问题,研究学者采用不同方法来处理磷石膏,根据实际情况可分为溶剂洗涤与热处理。

采用溶剂洗涤法处理磷石膏可降低磷石膏中的可溶磷的含量。Moallal R 等^[9]采用酸浸、浮选、过滤、洗涤等手段对磷石膏进行处理,获得了与天然石膏性能接近的净化磷石膏。刘路珍等^[10]采用水洗工艺对磷石膏进行预处理,降低了磷石膏中的可溶磷的含量。Ma Baoguo 等^[11]采用“盐酸-硫酸”法对磷矿石进行分解处理,获得了比传统硫酸法更加洁净的石膏。张茹等^[12]认为磷石膏经过洗涤后需要增加调节 pH 值、干燥等系列后续工艺。

溶剂洗涤法增加了整个除杂工艺的能耗,使得磷石膏净化成本上升。同时,磷石膏中可溶磷转移到了洗涤溶液中,并未实现对可溶磷的去除,反而可能因废液处理不当造成二次污染^[13]。

采用热处理法能够降低磷石膏中的可溶磷含量。任婷艳等^[14]研究了在焙烧温度 400 ~ 800 °C 下磷石膏的水溶性杂质的去除效果,结果表明:随着焙烧温度的提高磷石膏中的可溶物含量显著降低。Yang Jiakuan 等^[15]采用了蒸压法处理磷石膏,获得了能够制备承重建筑材料的石膏。李凤玲等^[16]对比研究了在 800 °C 快烧 30 s 与水洗后在 150 °C 煨烧 4 h 的磷石膏的可溶磷含量与胶凝性能,结果表明:同水洗后煨烧相比,快烧是一种相当有竞争力的处

理工艺。Alaa M. Rashad^[17]认为在 100 ~ 1 000 °C 之间焙烧对磷石膏中的可溶磷均有一定的降低效果。

在热处理时,过高的焙烧温度,不仅会使石膏失去自身的胶凝性能^[18],而且增加了处理成本。因此,需要选择适当的焙烧处理温度,既能最大程度去除磷石膏中的可溶磷杂质,同时保证磷石膏仍具备良好的胶凝水化性能。

丁萌等^[19]对磷石膏中杂质及预处理对半水石膏的性能进行了研究,结果表明,可溶磷的存在降低了半水石膏的性能,而经石灰处理后的磷石膏具有较好的强度。李永靖等^[20]比较研究了水洗、酸浸以及石灰中和对磷石膏中杂质的影响,结果表明:以上方法均能去除其中杂质,加入石灰能够获得强度达到 15.3 MPa 的制品。Chen Xuemei 等^[21]研究了加碱中和对半水磷石膏浆料的胶凝性能的影响,结果表明:改性后的磷石膏可以作为建筑材料使用,但是同脱硫石膏相比强度有所下降,凝结速度变快。巴太斌等^[22]研究了不同焙烧温度与石灰改性条件下磷石膏的物理性能变化,结果表明:采用石灰中和能有效降低磷石膏中可溶杂质,生石灰添加量对于产物的胶凝性能影响较大。Jiang Guanzhao 等^[23]在研究磷石膏作为粘合剂制作填充材料时发现生石灰可以缩短胶凝材料的凝结时间并提升其早期强度。

综上所述,中和和改性可以降低磷石膏中可溶磷含量、改变磷石膏力学性能。尽管国内外研究学者针对磷石膏已经开展了很多有价值的工作,但目前还缺少针对磷石膏中可溶磷去除的变化过程和影响机制的研究。

本研究针对磷石膏中可溶磷的去除,采用焙烧与生石灰中和的方法,研究直接焙烧与生石灰改性焙烧对磷石膏中可溶磷含量的变化规律,通过分析磷石膏样品的物相组成、微观形貌、酸碱度及粒度分布等的变化探讨焙烧与生石灰改性磷石膏的作用机理,以期对磷石膏资源化利用提供新的指导。

1 实验

1.1 原料与试剂

磷石膏,取自四川什邡某磷化工厂,外观呈粉状、灰白色,其主要物相为石膏 ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) 与烧石膏 ($CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$)。由化学成分分析可知,磷石膏主要化学成分为 SO_3 48.17%, CaO 36.07%,

SiO₂ 5.43%, Al₂O₃ 4.13%, P₂O₅ 2.08%, 含少量 Fe₂O₃、F 等,烧失量为 1.0%。磷石膏原样的总磷含量为 0.91%,可溶磷含量为 0.12%。

生石灰,实验室制备,将石灰石在 1 000 °C 煅烧 40 min 所得,其纯度为 98%。

去离子水,实验室自制,电阻率 > 18.2 MΩ · cm。

1.2 实验方法

将磷石膏置于 40 °C 烘箱中烘干 12 h,用 SP-7441 型磨粉机处理 60 s,后装入密封袋中待用。

磷石膏焙烧温度分别采用 100、120、150、170、200 °C。生石灰添加量按生石灰与磷石膏质量比,采用 0.1%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%。每次均用为 FA 2004 型的天平称取约 50.00 g 磷石膏,并称量对应质量的生石灰,精确至 0.001 g。使用 SP-7441 型磨粉机将磷石膏与生石灰混合搅拌 30 s,平铺于 6.0 × 12.0 cm² 的坩埚中,其厚度约为 10 mm。将混合后的样品放入 XT-881-2 型烘箱中,设置温度,保持焙烧时间 2h,后取出密封备用。

1.3 样品表征

(1) 磷石膏的可溶磷及总磷的测定

根据标准 GB/T 23456—2018《磷石膏》采用磷钒钼黄双波长光度法测定焙烧改性前后样品中的可溶磷含量。根据标准 GB/T 5484—2012《石膏化学分析方法》采用磷钼蓝分光光度法方法测定总磷的含量。

(2) 磷石膏的 pH 值测定

根据标准 GB/T 5484—2012《石膏化学分析方法》采用离子选择电极法对焙烧改性前后样品的 pH 值进行测定。

(3) 其他表征

采用荷兰帕纳科公司 Axios 型 X 射线荧光光谱仪(波长色散型) XRF 对磷石膏原样进行化学成分分析,测试条件:陶瓷 X 射线光管, Rh 靶,最大功率 2.4 kW。采用日本理学仪器株式会社的 Ultima IV 型 X 射线衍射仪对样品进行物相分析,测试条件: Cu 靶,管电压 40 kV,管电流 40 mA,功率 2.2 kW,扫描范围:3° ~ 80°,连续扫描。采用德国 ZEISS 仪器公司生产的 Ultra 55 型场发射扫描电子显微镜观测磷石膏的微观形貌。采用美国 Beckman Coulter 公司的 LS13320 型激光粒度分析仪对磷石膏物料粒度分布进行测定,测试粒径范围为 0.375 ~ 2 000 μm。

2 结果与讨论

2.1 焙烧温度对可溶磷的影响

焙烧温度一直是焙烧过程中极其重要的一个参数。不同的焙烧温度决定了焙烧之后磷石膏的物相、形貌特点以及物理性能^[3]。

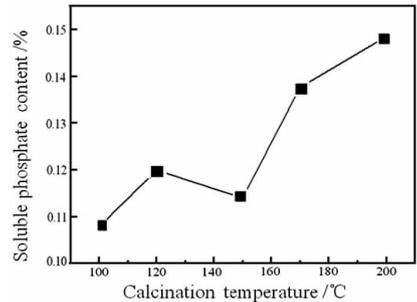
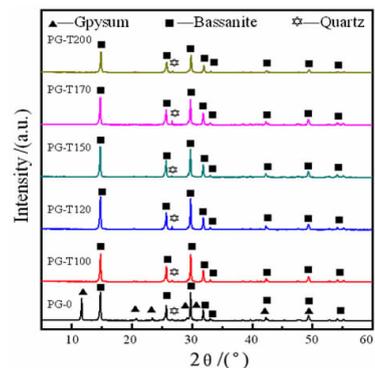


图1 不同焙烧温度磷石膏中可溶磷含量变化
Figure 1 Changes of soluble phosphorus at different calcination temperatures

图1为不同焙烧温度磷石膏中可溶磷含量变化图。由图1可知,在焙烧时间为 2 h 的条件下,样品中可溶性磷含量随着焙烧温度的升高总体上呈现上升趋势。当焙烧温度为 120 °C,可溶磷含量略高于焙烧温度为 100 °C 与 150 °C;当焙烧温度为 200 °C,可溶磷含量最高,约为 0.15%。



PG-0: 磷石膏原样; PG-T100 ~ PG-T200: 100 ~ 200 °C 下焙烧的磷石膏样品

图2 不同焙烧温度磷石膏样品的 XRD 图
Figure 2 XRD pattern of phosphogypsum samples at different calcination temperatures

图2为不同焙烧温度磷石膏样品的 XRD 图。由图2可知,磷石膏原样的主要物相是石膏与烧石膏,经焙烧后其主要物相为烧石膏。在 100 ~ 200 °C 焙烧使得磷石膏发生脱水,磷石膏物相由石膏与烧石膏的混合物相,转变为单一的烧石膏物相,石膏的衍射峰消失,烧石膏的衍射峰的峰强变强。

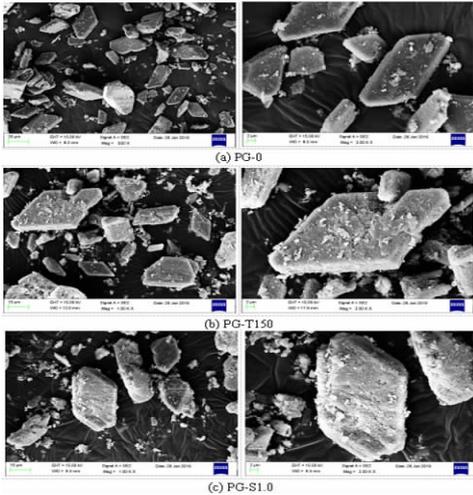


图3 不同磷石膏样品的微观形貌

Figure 3 Microscopic morphology of different phosphogypsum samples

图3为磷石膏焙烧处理前后微观形貌的变化。由图3(a)可知,磷石膏原样主要为菱形板片状,其表面较为平整。有一些细小的颗粒附着在表面上。在板片状的石膏周围存在着一些小颗粒。由图3(b)可知,焙烧后的磷石膏,主要形貌仍为板片状,但其表面破损、缺陷明显增多。同时,板片状磷石膏周围分布的细小颗粒也明显变多。

比较图3(a)和(b)可知,焙烧后磷石膏表面破损,裂隙增加,这导致可溶磷更加容易释放出来。

选择磷石膏原样与150℃焙烧以及1.0%生石灰添加量、150℃焙烧的磷石膏样品进行粒度分析测试,对应样品编号为PG-0、PG-T150和PG-S1.0。表1为激光粒度分析仪对以上样品的粒度分布值以及变异系数的统计。其中 $d_{10} \sim d_{90}$ 代表对应粒度累计分布为10%~90%处的磷石膏样品的粒度值。

表1 不同条件下磷石膏样品的的粒径分布表
Table 1 Particle size distribution of phosphogypsum samples under different conditions

粒度分布/ μm	d_{10}	d_{25}	d_{50}	d_{75}
PG-0	1.256	4.239	28.14	78.63
PG-T150	1.035	2.700	27.82	205.0
PG-S1.0	2.092	8.023	28.46	52.10
粒度分布/ μm	d_{90}	<i>S. D.</i>	<i>Mean</i>	<i>C. V.</i>
PG-0	169.8	69.40	56.01	124%
PG-T150	288.0	117.5	101.2	116%
PG-S1.0	80.08	31.83	35.27	90.3%

C. V. 是指变异系数,是一个描述数据的差异程度的统计量^[24]。计算方法如式(1):

$$C. V. = \frac{S. D.}{Mean} \times 100\% \quad (1)$$

其中,*S. D.* 表示标准差;*Mean* 表示均值。

由表1可知,磷石膏原样粒度分布较为分散,其变异系数大于焙烧后的磷石膏。这说明焙烧改变了磷石膏的粒度分布。而且从表1的 d_{25} 可以看出,焙烧后的磷石膏中颗粒细小的部分多于磷石膏原样。庞英等^[25]研究磷石膏中可溶磷与粒径分布的关系后,发现磷石膏中可溶磷多集中分布于较小粒度的磷石膏颗粒中。这进一步证明,磷石膏的物相改变,使得磷石膏中含有可溶磷的细小颗粒从其表面剥离脱落出来,从而导致可溶磷的含量增加。

2.2 生石灰添加量对可溶磷的影响

图4为不同温度与生石灰添加量下磷石膏中可溶磷变化。在不同的焙烧条件下,磷石膏中可溶磷含量不同,焙烧温度与生石灰添加量对可溶磷含量影响均较大。焙烧温度在100℃、120℃、150℃、170℃、200℃时,随着生石灰添加量的增加,可溶磷含量总体均呈下降趋势。

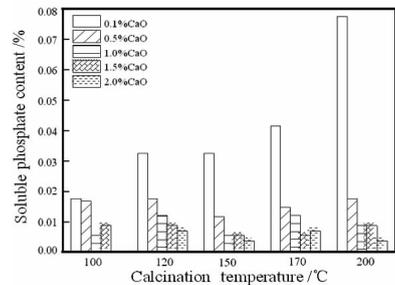


图4 不同温度与生石灰添加量下磷石膏中可溶磷变化图
Figure 4 Changes of soluble phosphorus at different calcination temperatures and quicklime content

在图4中,磷石膏在不同质量分数的生石灰与不同的焙烧温度共同作用下,磷石膏中可溶磷含量呈现出一定的变化规律。当生石灰添加量较少时(其质量分数低于0.5%),温度升高后可溶磷含量也相应地提高,这与直接焙烧处理的效果一致,此时,磷石膏因脱去部分结晶水,物相改变,表面破损增多,导致可溶磷含量增加。当生石灰添加量较高时(其质量分数在0.5%~2.0%之间),随着焙烧温度的提高,可溶磷含量总体呈现降低的趋势。当生石灰添加量达到1.0%及以上时,可溶磷含量在较低的浓度范围中浮动。这说明,磷石膏中的可溶磷

因生石灰的中和与固化作用而减少。

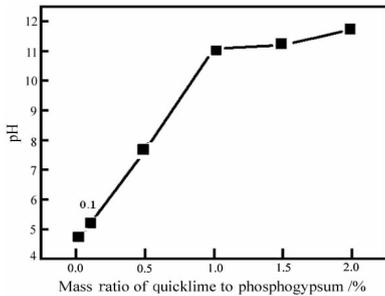
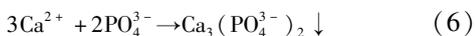
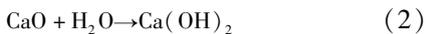


图5 磷石膏 pH 值随生石灰添加量变化图
Figure 5 Variation pH of phosphogypsum with addition of quicklime

图5为磷石膏 pH 值随生石灰添加量的变化。由图5可知,未添加生石灰的磷石膏样品 pH 值最低,为4.71。随着生石灰添加量的增加,磷石膏样品的 pH 值不断上升。当添加生石灰的质量分数达到1%时,磷石膏样品的 pH 值趋于稳定,为11.08。继续增加生石灰,磷石膏样品的 pH 值变化较小,说明此时改性剂生石灰已将磷石膏中酸性物质如可溶磷等,中和完全。

综合图4与图5可知,可溶磷含量变化与磷石膏的 pH 值为负相关。这与之前生石灰对磷石膏的中和作用的推断相符。

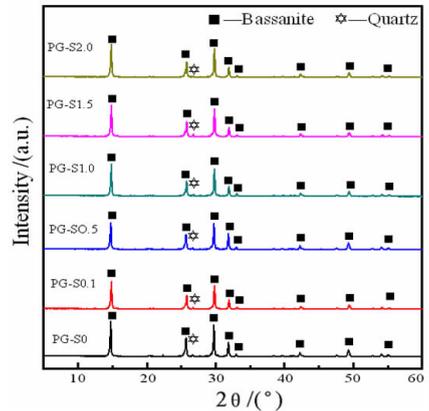
当生石灰改性的磷石膏发生水化时,生石灰先水化为氢氧化钙,氢氧化钙在水中电离出钙离子与氢氧根,溶液中的氢氧根与溶液中的氢离子发生中和反应,使得 pH 值上升,溶液呈碱性,同时生石灰溶解后电离出的钙离子与磷石膏中的可溶磷(磷酸根)发生复分解反应,形成难溶于水的物质,如磷酸氢钙、磷酸钙等^[26]。生石灰中和与固化可溶磷的反应方程式如下:



从图6可知150℃下不同生石灰添加量的磷石膏的焙烧产物,其物相均为烧石膏。磷石膏的物相与焙烧温度关系密切,而与磷石膏中生石灰添加量无关。

对比图3(c)与图3(b)可以看出,添加生石灰焙烧的磷石膏与仅焙烧处理的磷石膏表面形貌相似,均为表面附着细小颗粒的板状晶体。由表1可

知磷石膏在添加1.0%生石灰后,其变异系数为三者的最低,说明生石灰改性导致磷石膏的粒度差异程度变小。



PG-S0:未添加生石灰150℃焙烧的样品;
PG-S0.1~PG-S2.0:生石灰/磷石膏质量比为0.1%~2.0%并于150℃焙烧的样品

图6 150℃下不同生石灰添加量磷石膏样品的XRD图
Figure 6 XRD pattern of different quicklime additions of phosphogypsum samples at 150℃

因此,磷石膏中可溶磷含量的降低,主要在于添加的生石灰提高了磷石膏水化时溶液的 pH 值,使得磷石膏中的可溶磷转化为难溶的物质。

3 结论

原样磷石膏的主要物相为石膏、烧石膏,其微观形貌为板片状的晶体。在100~200℃的条件下,随着焙烧温度的升高,磷石膏的可溶磷含量上升。由于磷石膏在焙烧时发生物相转变,脱去自身的部分结晶水,使得晶体表面发生破损,促进样品中可溶磷溶出。随着生石灰添加量的增加,磷石膏中可溶磷的含量降低。原因在于添加的生石灰提高了磷石膏水化时溶液的 pH 值,促使磷石膏中的可溶磷转化为难溶的物质。在对磷石膏进行预处理时,宜同时采用焙烧与生石灰改性的方法来降低磷石膏中可溶磷含量。

参考文献:

- [1] Tayibi H, Choura M, López F A, et al. Environmental impact and management of phosphogypsum[J]. Journal of environmental management, 2009, 90(8):2377-2386.
- [2] 王圳,张均,陈芳,等.贵州省磷矿固体废物治理现状与建议[J].矿产综合利用,2019(1):11-15.
- [3] Değirmenci N. Utilization of phosphogypsum as raw and calcined material in manufacturing of building products[J]. Construction and building materials, 2008, 22(8):1857-1862.

参考文献:

[1] 曹海英. 萤石与方解石及石英的浮选分离[D]. 赣州:江西理工大学,2013.

[2] 钱愉红,崔天放,张菁. 萤石浮选捕收剂研究进展[J]. 辽宁化工,2015,44(2):148-151,154.

[3] 邓冲. 红柱石与石英浮选分离技术与机理研究[D]. 赣州:江西理工大学,2016.

[4] 吴兵. 石英陶瓷的应用[J]. 建材世界,2010,31(6):10-11.

[5] 杨涛,蒋述兴. 高纯超细电子级石英粉的制备技术综述[J]. 化工矿产地质,2006(3):185-188.

[6] 朱志雄,黄佩,王兵. 某石英砂矿提纯制取高纯石英初探

[J]. 贵州地质,2017,34(1):50-54.

[7] 王华庆,张树光,李江山. 石英砂永磁强磁选-酸浸提纯试验研究[J]. 非金属矿,2015,38(3):52-54.

[8] 陈述明,王杨. 石英矿提纯方法及所得石英产品:CN104150489A[P]. 2014-11-19.

[9] 汪本高,李丹妮. 乐山石英砂岩除铁提纯试验研究[J]. 中国非金属矿工业导刊,2013(3):24-27.

[10] K. A. 马蒂斯,魏明安. 菱镁矿和白云石的脂肪酸浮选[J]. 国外金属矿选矿,1995(5):26-34.

[11] 朱从杰. 矿泥对氧化锌矿物浮选行为的影响[J]. 矿产综合利用,2005(1):7-11.

引用格式:刘航,孙伟,陈攀,等. 从萤石尾矿中回收石英的试验研究[J]. 矿产保护与利用,2019,39(4):78-82.

LIU Hang, SUN Wei, CHEN Pan, et al. Experimental study on the recovery of quartz in fluorite tailings[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2019, 39(4):78-82.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn

(上接第13页)

[4] 杨冬蕾. 我国磷石膏和钛石膏资源化利用进展及展望[J]. 硫酸工业, 2018(10):5-10.

[5] 张欢,彭家惠,郑云. 不同形态可溶磷对石膏性能的影响[J]. 硅酸盐通报,2013,32(12):2455-2459.

[6] Huang Y, Qian J, Liu C, et al. Influence of phosphorus impurities on the performances of calcium sulfoaluminate cement[J]. Construction & building materials, 2017, 149:37-44.

[7] 杨敏,钱觉时,王智,等. 杂质对磷石膏应用性能的影响[J]. 材料导报,2007(6):104-106.

[8] Singh M. Role of phosphogypsum impurities on strength and microstructure of selenite plaster[J]. Construction and building materials, 2005, 19(6):480-486.

[9] Moalla R, Gargouri M, Khmiri F, et al. Phosphogypsum purification for plaster production: A process optimization using full factorial design[J]. Environmental engineering research, 2017, 23(1):36-45.

[10] 刘路珍,陈德玉,刘宇浩,等. 磷石膏预处理及制备建筑石膏的研究[J]. 非金属矿,2014,37(3):30-32.

[11] Ma B, Lu W, Ying S, et al. Synthesis of α -hemihydrate gypsum from cleaner phosphogypsum[J]. Journal of cleaner production, 2018, 195:396-405.

[12] 张茹,李艳军,刘杰,等. 磷石膏的综合利用及有害元素处理方法[J]. 矿产保护与利用,2015(2):50-54.

[13] 杨耿,秦延文,马迎群,等. 沱江流域磷石膏的磷形态组成及潜在释放特征[J]. 环境工程技术学报,2018,8(6):610-616.

[14] 任婷艳,杨家宽,奚蓉. 煅烧和蒸养预处理对磷石膏中水溶性杂质去除效果的对比研究[J]. 广东化工,2018,45(10):97-99.

[15] Yang J, Liu W, Zhang L, et al. Preparation of load-bearing

building materials from autoclaved phosphogypsum[J]. Construction and building materials, 2009, 23(2):687-693.

[16] 李凤玲,钱觉时,倪小琴,等. 快烧对磷石膏脱水相组成及胶凝性能的影响[J]. 硅酸盐学报,2015,43(5):579-584.

[17] Rashad A M. Phosphogypsum as a construction material[J]. Journal of cleaner production, 2017, 166:732-743.

[18] 姜伟,范立瑛,王志. 煅烧温度对脱磷石膏性能影响[J]. 济南大学学报(自然科学版),2008(3):244-247.

[19] 丁萌,李建锡,李兵兵. 磷石膏中杂质及预处理对 α 半水石膏性能的影响[J]. 环境工程学报,2014,8(9):4017-4021.

[20] 李永靖,岳玮琦,潘铨,等. 预处理工艺影响磷石膏水泥砂浆性能研究[J]. 非金属矿,2018,41(1):15-17.

[21] Chen X, Gao J, Liu C, et al. Effect of neutralization on the setting and hardening characters of hemihydrate phosphogypsum plaster[J]. Construction and building materials, 2018, 190:53-64.

[22] 巴太斌,徐亚中,卢文运,等. 石灰中和预处理磷石膏试验研究[J]. 新型建筑材料,2018,45(2):96-99.

[23] Jiang G, Wu A, Wang Y, et al. Low cost and high efficiency utilization of hemihydrate phosphogypsum: Used as binder to prepare filling material[J]. Construction and building materials, 2018, 167:263-270.

[24] Yu R C, Teh H W, Jaques P A, et al. Quality control of semi-continuous mobility size-fractionated particle number concentration data[J]. Atmospheric environment, 2004, 38(20):3341-3348.

[25] 庞英,杨林,杨敏,等. 磷石膏中杂质的存在形态及其分布情况研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版),2009,26(3):95-99.

[26] 孙正. 磷石膏中的磷和氟对硅酸盐水泥水化影响的机理研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2010.

引用格式:耿乾,孙红娟,彭同江,等. 焙烧与生石灰改性对磷石膏中可溶磷含量的影响[J]. 矿产保护与利用,2019,39(4):9-13,82.

GENG Qian, SUN Hongjuan, PENG Tongjiang, et al. Effect of roasting and quicklime modification on soluble phosphorus content in phosphogypsum[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2019, 39(4):9-13,82.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn