

中低品位磷矿及磷尾矿提质处理技术的实验研究

韩瑜, 卢玉莲, 张富强, 张澜曦, 张娇

(贵州省化工研究院, 贵州 贵阳 550002)

[摘要] 我国当前随着经济飞速发展, 对磷化工产品的需求量与日俱增, 然而磷矿富矿却日益减少。针对中低品位磷矿及磷尾矿的加工利用率偏低, 以及日益严格的环保政策致使磷矿选后尾矿处置困难等问题, 结合目前国内外对中低品位磷矿及磷尾矿回收利用的不同技术, 探索提出先热处理活化磷矿粉, 再用硝酸铵冷热处理磷矿粉的技术。采用该技术处理后, 使磷矿及磷尾矿 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 由 5%~27% 提升到 29%~38%、 $w(\text{MgO}) \leq 1\%$, 同时分离钙、镁离子, 并使其成为经济价值较高的质量分数 $\geq 98.5\%$ 、白度 98% 的轻质碳酸钙和质量分数 $\geq 99\%$ 、白度 98% 的氢氧化镁产品, 让资源得到有效利用, 并为相关领域发展提供理论支撑。

[关键词] 中低品位磷矿; 磷尾矿; 磷精矿; 综合利用

[中图分类号] TD97; X781 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2026) 02-0024-05

Experimental research on processing technologies for improving quality of medium-low grade phosphate ore and phosphate tailings

HAN Yu, LU Yulian, ZHANG Fuqiang, ZHANG Lanxi, ZHANG Jiao

(Guizhou Chemical Research Institute, Guiyang 550002, China)

Abstract: At present, with the rapid economic development in China, the demand for phosphorus chemical products is increasing day by day. However, the rich phosphorus ore resources are becoming increasingly scarce. Regarding the low utilization rate of processing for medium-low grade phosphorus ores and phosphorus tailings, as well as the difficulty in disposing of the post-selection tailings of phosphorus ore due to increasingly strict environmental protection policies, combined with the different technologies for the recycling and utilization of medium-low grade phosphorus ores and phosphorus tailings currently available both domestically and internationally, this paper explores and proposes a technology of first conducting thermal treatment to activate the phosphorus ore powder, and then using ammonium nitrate for cold and hot treatment of the phosphorus ore powder. After applying this technology, the $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ of the phosphate ore and phosphate tailings can be increased from 5%-27% to 29%-38%, $w(\text{MgO})$ can be reduced to $\leq 1\%$, while separating calcium and magnesium ions, and converting them into high-quality calcium carbonate with a mass fraction $\geq 98.5\%$ and a whiteness of 98%, and magnesium hydroxide with a mass fraction $\geq 99\%$ and a whiteness of 98%, so as to effectively utilize the resources and provide theoretical support for the development of related fields.

Key words: medium-low grade phosphate ore; phosphate tailings; phosphate concentrate; comprehensive utilization

0 引言

磷矿资源是我国重要的非金属战略矿产之一, 是制备磷肥、精细磷化工产品以及其他含磷产品的基础原料, 在磷化工和粮食生产中占有极其重要的

地位, 属于我国重要战略资源。虽然我国磷矿资源储量基数大, 但是分布不均, 主要分布在云南、贵州、四川、湖北等省, 我国磷矿 90% 以上都是 $w(\text{P}_2\text{O}_5) < 26\%$ 的中低品位磷矿, $w(\text{P}_2\text{O}_5) > 30\%$ 的富

收稿日期: 2025-09-11; 修回日期: 2025-11-19

作者简介: 韩瑜 (1990—), 男, 贵州遵义人, 高级工程师, 从事磷化工工艺研究、环保治理及工程咨询工作。

通信作者: 卢玉莲 (1989—), 女, 贵州惠水人, 高级工程师, 从事磷化工工艺技术研究、分析检测工作。

基金项目: 贵州省科技计划项目“中低品位磷矿及磷尾矿新型选矿创新技术”(黔科合成果[2022]重点004); 贵阳市科技计划项目“中低品位磷矿/磷尾矿热化选磷精矿深加工制备电池用磷酸二氢铵技术研究”(筑科合同[2023]3号); 贵州科学院青年科学基金“热化选磷精矿用于硫酸法萃取磷酸工艺技术研究”(黔科院J字[2024]24号); 贵州科学院青年科学基金“低镁磷精矿湿法制备农用聚磷酸铵的工艺技术研究”(黔科院J字[2023]9号)

矿只占总储量的7%，我国磷矿平均品位 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 只有18%^[1]，低于世界磷矿平均品位($w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 21.5%)。经过长期的采富弃贫，高品位磷矿储量越来越少，且开采难度越来越大，成本越来越高。我国现有磷尾矿库总量12 718座，新建磷尾矿库占12%，数据显示在2018年年底时我国磷尾矿堆存量已达200亿t，且以每年18亿t以上产生量在持续排放，但因 $w(\text{P}_2\text{O}_5) < 10\%$ 、 $w(\text{MgO}) > 15\%$ ，使得磷尾矿综合利用量只有3亿t/a。伴随着我国工业、经济的不断发展，对磷矿资源的需求不断加大，必定会加大对磷矿资源的开采，进而又会排放大量磷尾矿。近年来随着人们对生活品质和绿色健康生活方式的追求、国家对生态环保的重视和环保要求的提高，以及对稀缺的战略性矿产资源储备的考虑，中低品位磷矿及磷尾矿的综合高效开发利用迫在眉睫^[2]。笔者对现有中低品位磷矿及磷尾矿综合利用技术进行总结，并针对贵州某中低品位磷矿及磷尾矿进行综合利用实验研究，以期对该领域的发展提供理论依据。

1 国内外中低品位磷矿综合利用现状

1.1 直接利用法

1.1.1 物理粉磨法生产磷矿粉

为提高磷矿中磷的溶解与释放能力，通常采用将其破碎的方法，破坏磷矿的晶体结构，使其具有普通磷矿粉不具有的物理化学性质。我国20世纪50年代就已经开始推广磷矿粉在农业上的应用，现已取得明显效果^[3]。

1.1.2 磷矿粉和其他材料混合使用

中低品位磷矿粉直接使用效率较低，通常是利用其中的水溶磷，目前多数低品位磷矿粉都和硫材料及过磷酸钙混合使用促进磷的利用，以及改善土壤酸碱性和透气保水能力和提高肥效，很多实验显示磷矿粉和过磷酸钙按质量比1:1混合的肥效与同等质量过磷酸钙相当^[4]。

1.2 化学处理法

1.2.1 热分解法

中低品位磷矿的热分解法有电炉法、窑法。采用电炉法加工已有上百年历史，积累了不少数据和经验。20世纪40年代美国制成含有微量元素的玻璃肥料。20世纪50年代初期，美国、苏联都制得了含有多种微量元素的玻璃肥料，而日本则开始用电炉法生产钙镁磷肥。我国在20世纪70年代，许秀成等^[5]发明了玻璃结构因子配料法，为玻璃肥的研究提供了理论基础，该方法可以直接利用中低

品位磷矿，促进了融融钙镁磷肥的推广。

1.2.2 生物处理法

由于中低品位磷矿主要是以氟磷酸钙的形式存在，很难被植物直接吸收利用。而一些微生物在代谢过程中会产生大量有机酸、腐殖质等，在磷矿粉与有机废物堆肥过程中这些代谢产物具有螯合金属离子和降低pH值的作用，能促进磷矿中难溶性磷酸盐溶解。因此中低品位磷矿粉成为绝大多数有机肥中磷元素的主要来源。

2 国内外磷尾矿综合利用现状

2.1 磷尾矿再选

对磷尾矿中各有用组分充分回收利用是提高资源利用^[6]效率的重要途径。磷尾矿再选回收利用研究起步较早，在理论研究方面已取得很大进展。美国采取直接浮选的方法回收富含白云石磷尾矿中的磷酸盐，在综合利用磷尾矿的探索上具有重要意义。

2.2 露天采坑或采空区回填

利用矿山开采过程和浮选过程中产生的尾矿回填露天采坑和采空区，可以节省新建、扩建尾矿库的费用，也能使矿山开采区地势稳定，是尾矿综合利用便捷有效措施之一。目前磷尾矿有53%左右用于采空区的回填，此方法虽然便捷，但是经济附加值低，开采出来的磷矿石中很多有用组分没有得到合理利用。而且现在磷石膏也大量用于充填矿坑和采空区，虽然磷石膏和磷尾矿都在积极探索综合利用途径^[7]，但是都还没有取得较大突破，距离大规模工业化应用有一定距离。

2.3 生产建筑材料

20世纪80年代我国便已开始利用磷尾矿生产建筑材料的研究，主要用于生产水泥^[8]和建筑用砖等，利用总量约占尾矿的40%，虽然该方法对尾矿的利用量大，但很多高附加值元素没有得到有效利用。由于其中水溶磷及一些重金属的存在，应用范围也受到限制。

2.4 生产含磷有机肥

磷尾矿中除含有磷元素外还含有多种有利于植物生长的微量元素，将磷尾矿粉和农家肥混合起来既可以起到合理利用磷尾矿提高肥效的作用，也能有效改善土壤环境。该方法在用鸡粪作为原料生产的有机肥^[9]用于标准较高的农作物（如茶叶）时，需要特别注意重金属含量。

2.5 生产微晶玻璃

利用磷尾矿生产微晶玻璃是目前磷尾矿综合利

用研究领域比较热门的课题,磷尾矿^[10]生产出的微晶玻璃具有高工业附加值、高性能、低污染等优点。根据对玻璃性能要求的不同,有多种不同的技术方法。该研究探索为综合利用磷尾矿资源提供了新思路。

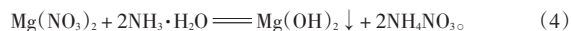
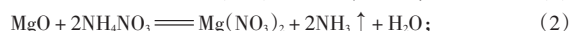
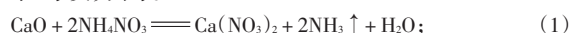
3 硝酸铵冷热两段处理中低品位磷矿及磷尾矿

为解决我国中低品位磷矿总量多、利用率低、很多磷矿伴生资源得不到合理利用,以及磷尾矿带来的资源浪费和环境问题,本实验研究将探索采用冷-热两段浸取实现钙镁分离并富集磷精矿的中低品位磷矿及磷尾矿综合利用技术。

3.1 冷-热两段浸取钙镁分离原理

煅烧后的中低品位磷矿及磷尾矿先与硝酸铵溶液在30℃以下反应30~50 min,经过滤分离,磷矿中氧化钙会与硝酸铵反应生成硝酸钙进入溶液,矿中氧化镁在该温度下不会反应生成硝酸镁进入液相。一浸滤渣再与硝酸铵溶液配制成料浆送入高温反应塔,在95℃循环反应2 h,固相中的

镁与硝酸铵反应生成硝酸镁进入溶液,经过滤得磷精矿。一浸液经碳化得碳酸钙和再生硝酸铵溶液,二浸液经氨水中和反应生成氢氧化镁和硝酸铵溶液,再生液经交叉循环后一浸液中氧化镁含量会越来越低,直至0.1%左右。由于二浸反应为高温反应,在一浸中未完全反应的钙会反应进入二浸液中,二浸液中钙不会影响氢氧化镁品质,再生液去一浸工序。从而实现中低品位磷矿及磷尾矿中钙镁分离。



3.2 中低品位磷矿及磷尾矿的前处理

实验中低品位磷矿为贵州瓮安、福泉地区中低品位磷矿,磷尾矿为瓮安、川恒、云南尾矿。先用烘箱把所得尾矿烘干后放入煅烧炉加热活化处理(950℃煅烧2 h)。实验原料矿粉分析数据见表1,热处理后矿粉分析数据见表2。

表1 实验原料矿粉分析数据

Table 1 Analysis data of experimental raw phosphorus ore powder

| 矿粉 | w(P ₂ O ₅)/% | w(CaO)/% | w(MgO)/% | w(Fe ₂ O ₃)/% | w(Al ₂ O ₃)/% | w(F)/% | w(A.I.)/% | w(烧失)/% |
|---------|-------------------------------------|----------|----------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------|-----------|---------|
| 牛场原矿 | 26.87 | 46.53 | 6.23 | 0.26 | 0.32 | 2.61 | 2.52 | 15.50 |
| 瓮安原矿 | 26.08 | 42.33 | 4.73 | 0.88 | 0.88 | 2.36 | 11.29 | 10.75 |
| 瓮安低品位磷矿 | 16.89 | 39.75 | 12.69 | 0.81 | 0.82 | 2.51 | 10.23 | 35.10 |
| 瓮安尾矿 | 7.23 | 34.94 | 17.65 | 0.22 | 0.24 | 0.62 | | 38.70 |
| 川恒尾矿 | 5.64 | 33.87 | 18.28 | 0.26 | 0.37 | 0.52 | | 40.10 |

表2 热处理后矿粉分析数据

Table 2 Analysis data of phosphorus ore powder after heat treatment

| 矿粉 | w(P ₂ O ₅)/% | w(CaO)/% | w(MgO)/% | w(Fe ₂ O ₃)/% | w(Al ₂ O ₃)/% | w(F)/% |
|---------|-------------------------------------|----------|----------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------|
| 牛场原矿 | 31.7 | 54.9 | 7.3 | 0.31 | 0.38 | 3.10 |
| 瓮安原矿 | 29.3 | 47.6 | 5.30 | 0.99 | 0.98 | 2.65 |
| 瓮安低品位磷矿 | 19.9 | 46.9 | 14.9 | 0.96 | 0.97 | 2.96 |
| 瓮安尾矿 | 11.5 | 55.4 | 28.20 | 0.30 | 0.20 | 0.15 |
| 川恒尾矿 | 9.6 | 55.2 | 30.7 | 0.33 | 0.51 | 0.90 |

从以上分析数据可以看出,由于磷尾矿中白云石含量较高,所以烧失量较大,且其中MgCO₃形式存在的镁较多,但是尾矿中氟含量较原矿中低。

3.3 硝酸铵冷处理中低品位磷矿及磷尾矿

把上述经过热处理的矿粉100 g加入硝酸铵溶液,保持温度小于40℃,硝酸铵的量为磷矿粉中CaO含量的65%,控制硝酸铵溶液质量分数在10%~35%。反应1 h后抽滤,滤饼用少量热清水洗涤

(30 g)。滤饼不用烘干接着进行硝酸铵热处理,滤液(一浸液)分析检测后待用。

3.4 硝酸铵热处理中低品位磷矿及磷尾矿

把经过一浸冷处理后的湿矿渣加入硝酸铵溶液中,硝酸铵的量为矿粉中MgO含量的110%,加热反应90 min后过滤(反应过程中需要补水保证溶液不被蒸干,液固质量比在3:1左右),滤饼用热水洗涤后烘干检测(见表3),滤液(二浸液)分析检测后待用。

表3 二浸渣分析数据

Table 3 Analysis data of the residue from the second filtration

| 原料 | 质量/g | $w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$ | $w(\text{CaO})/\%$ | $w(\text{MgO})/\%$ |
|--------|------|------------------------------|--------------------|--------------------|
| 牛场原矿 | 69.5 | 38.30 | 53.90 | 0.23 |
| 瓮安原矿 | 75.3 | 38.50 | 46.70 | 0.29 |
| 瓮安低品位矿 | 45.3 | 37.28 | 46.52 | 0.52 |
| 瓮安尾矿 | 35 | 31.10 | 46.40 | 0.83 |
| 川恒尾矿 | 31.2 | 29.90 | 47.70 | 0.92 |

由表3可知,在用硝酸铵溶液热处理一浸矿渣时矿粉中镁浸出率高,最后得到镁含量低的高品质磷精矿。中低品位磷矿经过处理后可以得到 $w(\text{MgO}) < 1\%$ 、 $w(\text{P}_2\text{O}_5) > 38\%$ 的磷精矿,由于对磷酸加工影响较大的 $w(\text{MgO})$ 被控制在1%以下,所以该矿可以满足现有任何湿法磷酸的加工要求。磷尾矿更是将 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 从只有10%左右提升到30%左右, $w(\text{MgO})$ 同样被控制在1%左右,可以满足大多数磷加工对磷矿石品位的要求,且运用该技术处理磷矿粉磷的回收率在99%以上。

4 浸液的脱钙、脱镁处理

4.1 一浸液的脱钙处理

将盛有一浸液的烧杯置于搅拌状态下,并控制温度在30℃左右,向一浸液里先加入氨水,然后再缓慢加入碳酸氢铵(碳酸氢铵单位时间的加入量影响碳酸钙晶体形态)。加完后反应30~50 min过滤,用热水(200 g)洗涤并将滤饼(含镁碳酸钙)烘干,滤液分析组分含量后可以用于浸矿工序循环使用。一浸液分析数据见表4,滤饼(含镁碳酸钙)分析数据见表5。

表4 一浸液分析数据

Table 4 Analysis data of the first leaching solution

| 原料 | 浸液质量/g | $w(\text{CaO})/\%$ | $w(\text{MgO})/\%$ |
|--------|--------|--------------------|--------------------|
| 牛场原矿 | 340 | 4.75 | 0.11 |
| 瓮安原矿 | 360 | 3.36 | 0.13 |
| 瓮安低品位矿 | 373 | 3.85 | 0.12 |
| 瓮安尾矿 | 680 | 5.48 | 0.12 |
| 川恒尾矿 | 695 | 5.59 | 0.13 |

表5 滤饼(含镁碳酸钙)分析数据

Table 5 Analysis data of the filter cake (calcium carbonate containing magnesium)

| 原料 | 滤饼质量/g | $w(\text{CaO})/\%$ | $w(\text{CaCO}_3)/\%$ | $w(\text{MgO})/\%$ | $w(\text{MgCO}_3)/\%$ |
|-------|--------|--------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| 牛场原矿 | 28.5 | 55.41 | 98.93 | 0.06 | 0.028 |
| 瓮安原矿 | 21.1 | 55.16 | 98.50 | 0.08 | 0.038 |
| 瓮安低品位 | 24.8 | 55.19 | 98.55 | 0.07 | 0.029 |
| 瓮安尾矿 | 65.0 | 55.17 | 98.52 | 0.11 | 0.052 |
| 川恒尾矿 | 68.7 | 55.21 | 98.59 | 0.09 | 0.043 |

从表4一浸液数据看出,在用硝酸铵溶液冷处理烧过的矿粉时,镁基本不出来,钙浸出较多。

从表5看出,一浸液沉出的碳酸钙从液相中的回收效率表现优异,回收率稳定维持在94%以上,且产品的主要指标均处于较高水平,其 $w(\text{CaCO}_3)$ 大于98.5%,白度也超过98%。这些优异的性能指标表明,该产品属于高品质的轻质碳酸钙,具有出色的物理和化学性质。因此,它可以作为一种理想的填充材料,广泛应用于塑料和橡胶工业中,有效改善材料的机械性能和加工性能。同时,由于其高白度和良好的分散性,它也适用于油漆涂料行业,能够提升涂层的光泽和遮盖力;此外,在造纸工艺中它可用作填料和涂层材料,改善纸张的白度、平滑度和印刷适性。总体来看,该产品具有多领域的应用潜力。

4.2 二浸液脱镁处理

将盛有二浸液的烧杯置于搅拌状态下,向二浸液里缓慢加入氨水,等反应20 min后开始升温,控制温度在60℃左右,氨水全部加完后反应60 min过滤,用热水(200 g)洗涤并将滤饼(氢氧化镁)烘干,滤液分析组分含量后可以用于浸矿工序循环使用。二浸液分析数据见表6,滤饼(氢氧化镁)分析数据见表7。

表6 二浸液分析数据

Table 6 Analysis data of the second leaching solution

| 原料 | 浸液质量/g | $w(\text{CaO})/\%$ | $w(\text{MgO})/\%$ |
|--------|--------|--------------------|--------------------|
| 牛场原矿 | 260 | 0.23 | 2.62 |
| 瓮安原矿 | 235 | 0.21 | 2.11 |
| 瓮安低品位矿 | 355 | 0.24 | 3.51 |
| 瓮安尾矿 | 598 | 0.28 | 4.25 |
| 川恒尾矿 | 580 | 0.39 | 4.87 |

由表6二浸液数据可得出,中低品位磷矿及磷尾矿经过一浸冷处理后矿粉中活性钙基本以硝酸钙形式浸出,由于料浆pH在12以上,矿粉中镁会反应生成氢氧化镁继续和磷矿一起进入二浸,再

表7 滤饼(氢氧化镁)分析数据

Table 7 Analysis data of the filter cake (magnesium hydroxide)

| 原料 | 滤饼质量/g | $w(\text{CaO})/\%$ | $w(\text{MgO})/\%$ | $w(\text{Mg}(\text{OH})_2)/\%$ |
|-------|--------|--------------------|--------------------|--------------------------------|
| 牛场原矿 | 6.3 | 0.02 | 68.37 | 99.13 |
| 瓮安原矿 | 4.5 | 0.03 | 68.59 | 99.45 |
| 瓮安低品位 | 17.8 | 0.03 | 68.29 | 99.02 |
| 瓮安尾矿 | 25.6 | 0.02 | 68.63 | 99.52 |
| 川恒尾矿 | 28.3 | 0.04 | 68.70 | 99.61 |

经过二浸对磷矿粉和硝酸铵在95℃以上进行热处理,让磷矿中活性较高的部分镁以及冷浸过程中残留的钙在高温段被浸出。该工艺技术已在中试装置上得到充分验证,再生硝酸铵溶液经交叉循环后,进入一浸段,反应结束后一浸液 $w(\text{MgO}) \leq 0.3\%$ 。

由表7氢氧化镁数据可知,中低品位磷矿及磷尾矿经过二浸硝酸铵热处理后的滤液在加入氨水脱镁的过程中,镁回收率只有64%左右,得到 $w(\text{Mg}(\text{OH})_2) > 99\%$ 、白度98%以上的氢氧化镁。脱镁滤液在分析检测后用碳酸氢铵沉出剩余部分镁,再用于浸矿工序循环使用。

5 结论

本实验研究着力于中低品位磷矿及磷尾矿加工处理、资源回收利用难、厂区处置环保压力大等问题,从源头解决了传统选矿工艺对中低品位磷矿及磷尾矿因为 P_2O_5 含量低、杂质含量高、伴生资源利用率低,加工利用成本高的难题。探索出一条有效分离中低品位磷矿及磷尾矿中磷、钙、镁的技术途径,使其转化为具有较高经济附加价值的产品,并为磷尾矿处理找到一个既环保又经济的处理办法。通过本实验研究得出:

(1) 工艺技术可行。该工艺能够高效处理从原矿到尾矿的各类中低品位磷资源。对于 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 仅5%~7%的磷尾矿,可将其富集为 $w(\text{P}_2\text{O}_5) > 29\%$ 、 $w(\text{MgO}) < 1\%$ 的合格磷精矿;对于中低品位原矿,可产出 $w(\text{P}_2\text{O}_5) > 37\%$ 、 $w(\text{MgO}) < 0.3\%$ 的优质磷精矿。磷总回收率超过99%。

(2) 实现了钙镁的高选择性分离与高值化回收。通过低温冷浸与高温热浸的巧妙结合,成功解决了钙镁分离难题。并分别从浸出液中回收得到纯度 $\geq 98.5\%$ 的高白度轻质碳酸钙和纯度 $\geq 99\%$ 的高白度氢氧化镁两种高附加值化工产品。

(3) 体现了绿色循环理念。工艺核心试剂硝酸铵通过沉淀反应实现再生,具备闭路循环潜力,大幅降低了新鲜试剂消耗和废水排放。

(4) 综合效益显著。该工艺将传统选矿废弃的低值尾矿或难利用的中低品位矿,转化为三种具有良好市场前景的商品,实现了“变废为宝、吃干榨尽”,兼具显著的环境效益、资源效益和潜在的经济效益。

本研究为中低品位磷矿及巨量磷尾矿的资源化利用开辟了一条全新的技术途径。后续研究应集中于:针对不同产地、不同矿物学特征的原料进行工艺适应性试验与参数优化;开展连续式中试,验证工艺的稳定性、可靠性与工程放大规律;进行深入的技术经济评价与生命周期评估,为该技术的工业化推广应用提供坚实依据。

[参考文献]

- [1] 许秀成,侯翠红,赵秉强,等.我国磷矿资源开采的可持续性[J].化工矿物与加工,2014(4):56.
- [2] 佚名.合理利用磷矿资源迫在眉睫[J].化工矿物与加工,2014(4):57.
- [3] 何振全.超微细磷矿粉的释磷特征及对冬小麦的营养效应[D].泰安:山东农业大学,2010.
HE Z Q. The phosphorus-releasing characteristics of ultra-fine rock phosphate powder and its nutritional effects on wheat[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2010.
- [4] 许秀成,侯翠红,赵秉强,等.合理利用资源用中低品位磷矿制土壤调理剂[J].中国农资,2015(9):21.
- [5] 许秀成.钙镁磷肥发展现状及前景[J].中国农资,2006(4):54-56.
- [6] 卢玉莲,张钦,张富强,等.中低品位磷矿及磷尾矿高效清洁利用集成技术应用前景展望[J].化工矿物与加工,2019,48(8):68-71.
LU Y L, ZHANG Q, ZHANG F Q, et al. Application prospect of integrated technology for efficient and clean utilization of mid-low grade phosphate ore and phosphate tailings[J]. Industrial Minerals & Processing, 2019,48(8):68-71.
- [7] 佚名.磷石膏综合利用行动方案[J].磷肥与复肥,2024,39(4):35.
- [8] 管宗甫,陈益民,郭随华,等.磷矿石、磷渣、磷尾矿在烧成高强度水泥熟料中的作用[J].硅酸盐通报,2005,4(3):81-84.
GUAN Z F, CHEN Y M, GUO S H, et al. Effect of Phosphor Slag, Phosphor Mineral, Phosphor Tailings on High-Strength Portland Clinker[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2005,4(3):81-84.
- [9] 郑君花,王修俊,冯廷萃,等.利用磷尾矿生产含磷有机肥料的固体发酵研究[J].广东农业科学,2014,41(14):61-65,79.
ZHENG J H, WANG X J, FENG T C, et al. Study on solid-state fermentation of producing phosphorus-containing organic fertilizer using phosphate tailings[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014,41(14):61-65,79.
- [10] 李艳峰,方明山.贵州瓮福磷尾矿工艺矿物学研究[J].有色金属(选矿部分),2013(4):1-4.
LI Y F, FANG M S. Process Mineralogy Research on Wengfu Phosphorus Tailings in Guizhou[J]. Nonferrous Metal (Mineral Processing Section), 2013(4):1-4.