

废机油在磷石膏浮选除杂中的应用研究

张佳妮, 周富佳, 张 昱, 余伟健, 管青军

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

[摘要] 磷石膏是湿法制取磷酸工艺中产生的大宗固废,其堆放对环境造成了严重的危害。针对磷石膏白度低和 SiO_2 含量高,难于资源化利用的问题,以贵州某磷化工企业产生的磷石膏为研究对象,研究了煤油、油酸钠和废机油药剂对磷石膏浮选提纯的影响。结果表明,废机油可以有效去除磷石膏中的 SiO_2 和有机质等杂质,浮选效果最佳。废机油去除磷石膏的最佳条件:矿浆pH值为2.0,浮选矿浆浓度为20%,废机油用量为40 g/t,起泡剂MIBC用量为300 g/t。在此最佳条件下,可获得精矿产率为91.72%,白度为63.43%,品位为97.54%,实现二水硫酸钙与有机质的有效分离,该研究对磷石膏后续实现资源化、高值化利用具有重要的指导意义。

[关键词] 磷石膏; 浮选; 有机质去除; 二氧化硅; 白度

[中图分类号] TQ177.3⁺75

[文献标志码] A

[文章编号] 2097-2423(2025)02-0030-08

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.02.005

0 引言

磷石膏是湿法工艺制备磷酸生产过程中产生的固体废弃物^[1],主要成分是二水硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),其含量达到85%以上,是一种潜力巨大的再生石膏资源^[2]。每生产1t湿法磷酸,产生4~5t的磷石膏^[3-4]。我国磷石膏堆存已超过5亿t,且每年堆存量以2倍的速率增长^[5-6]。磷石膏的堆存不仅占用大量土地资源,还造成了很大的生态环境问题。解决磷石膏的堆存和利用问题对于磷化工行业的可持续发展以及实现生态和“碳中和”目标至关重要^[7]。与天然石膏相比,磷石膏含有大量杂质,包括磷、氟、

有机物以及重金属,甚至放射性元素等^[8],这极大限制了磷石膏的资源化利用^[9]。因此,如何脱除磷石膏中的杂质是实现磷石膏资源化以及高值化利用的关键所在。

磷石膏的 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 含量通常可达到87%以上^[10],具有多种应用的潜力。磷石膏主要用作水泥缓凝剂、石膏板和砌块等建筑材料,缓解了天然石膏的稀缺问题。磷石膏含有Ca和S等元素,使其成为农业肥料和土壤改良剂的候选材料^[11]。此外,磷石膏还是生产硫酸、硫酸铵和硫酸钾等化学品的原料^[12]。由于磷石膏的杂质降低了其资源产品的性能,特别是在建筑应用中,杂质会改变凝固时间和削弱机械强度,并影响产品的质量^[13],因此,开发高效的磷石膏提纯和处理技术对于其高值化利用至关重要。

目前,磷石膏净化除杂的方法大致包括水洗^[14]、酸碱中和改性^[15]、煅烧^[16]、浮选等。其中,浮选法作为一种高效率、低成本物质分离方法,因其去除各种杂质的能力强、简单、高效和易于工业化,已被证明是一种优良的磷石膏除杂方法。王进明等^[17]通过反浮选+正浮选联用,采用甲基异丁基甲醇进行反浮选和十二胺进行正浮选,使磷石膏精矿白度从19.4%提升至41.1%,纯度从73.12%提升至96.41%。时春昱等^[18]采用煤油和十二烷基三甲基氯化铵作为捕收剂通过双反浮选,使磷石膏精矿

[收稿日期] 2024-10-14

[基金项目] 国家自然科学基金区域创新发展联合基金(U23A20602),湖南省自然科学基金优秀青年基金(2023JJ20025),湖南省科技创新计划资助(2024RC3214)。

[作者简介] 张佳妮(1998—),女,湖南岳阳人,硕士研究生,主要从事矿山固废综合利用研究。

[通信作者] 管青军(1988—),男,山东诸城人,博士,副教授,研究生导师,主要从事矿山固废综合利用研究。

[引用格式] 张佳妮,周富佳,张昱,等.废机油在磷石膏浮选除杂中的应用研究[J].绿色矿冶,2025,41(2):30-37,80.

ZHANG Jiani, ZHOU Fujia, ZHANG Yu, et al. Research on the application of waste oil in the flotation of phosphogypsum[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025, 41(2): 30-37, 80.

白度提升至 58.15%，纯度达 97.28%。李俊旺等^[19]采用胺类捕收剂 BK421B 进行反浮选，可获得 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 品位为 96.85%、 SiO_2 含量为 1.85% 的磷石膏精矿。韦家斌等^[20]通过反浮选 + 正浮选联合工艺，采用新型氨基酸型两性捕收剂 OP-10 和 CQR-3，使磷石膏精矿白度稳定在 55% 以上。张革利等^[21]在强酸性条件下，以阳离子捕收剂 T-609 为捕收剂，可获得 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 品位为 99.40%、精矿回收率为 96.22% 的磷石膏精矿。陈小红等^[22]通过共反浮选工艺，采用新型苄基季铵盐捕收剂 PG-1，可使磷石膏白度由 32.59% 提升至 63.74%， $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 品位提高至 93.52%。顾云翔等^[23]采用季铵盐类捕收剂 LSG-1 进行反浮选，可使磷石膏白度提升至 65.19%、 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 品位提高至 93.61%。

从以上研究可以看出，白度是评价磷石膏浮选除杂效果的重要指标之一，而影响磷石膏白度的主要杂质是有机质，非极性烃类油（如煤油、轻柴油、改性煤油等）是此类物质良好的捕收剂。机油在使用过程中混入了水分、灰尘、其他杂油和机件磨损产生的金属粉末等杂质，颜色变黑、黏度增大，或者发生变质，生成了有机酸、胶质和沥青状物质，从而产生了废机油。废机油与非极性烃类油具有相似的化学成分，相关研究证明在煤泥浮选中废机油可以替代非极性烃类油，获得良好的捕收效果^[24]。因此，废机油极有可能是一种分离磷石膏中有机质的良好捕收剂。我国每年产生 3 000 万 t 废机油并急需处置，如果在磷石膏浮选中实现大量使用，不仅可以有效降低磷石膏浮选除杂的成本，而且为废机油的资源化利用开辟了一种新途径。

针对废机油在磷石膏除杂中的应用，本文系统对比了三种捕收剂（煤油、油酸钠、废机油）在磷石膏除杂提白中的效果，并初步探讨了废机油除杂机理，为废机油在磷石膏除杂中的应用奠定一定的基础。

1 试验部分

1.1 试验材料

磷石膏来源于贵州省某磷化集团有限公司，在 60℃ 烘箱中干燥后呈灰色，白度为 40.6%，20% 矿浆浓度的磷石膏 pH 值为 2.8。

试验采用煤油、油酸钠、废机油作为捕收剂，废机油（牌号 0W30）取自汽车修理厂，动力黏度（25℃）为

9.6 mPa·s，采用甲基异丁基甲醇（MIBC）为起泡剂，以氢氧化钠溶液和稀硫酸为 pH 调整剂。除废机油外，其他药剂均为分析纯。

1.2 试验方法

浮选试验在 LFM01 型 0.5 L 单槽浮选机中进行。将磷石膏与去离子水混合形成矿浆浓度（质量分数）为 20% 的磷石膏浆液，以稀硫酸或氢氧化钠溶液为 pH 调整剂，搅拌速度为 1 500 r/m，依次加入捕收剂和起泡剂进行浮选。加入捕收剂后搅拌 3 min，再加入起泡剂搅拌 5 min，接着充气，流量调整为 2~3 L/min，最后刮泡浮选 2~4 min，得到浮选精矿和尾矿；浮选分离后的精矿立刻进行过滤、洗涤，经 60℃ 恒温干燥箱处理，得到石膏产品。

试验流程如图 1 所示。

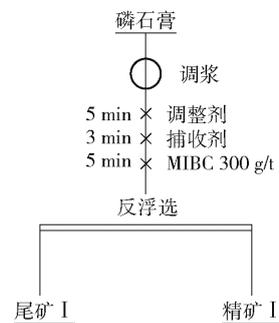


图 1 磷石膏浮选试验流程

1.3 分析测试方法

1.3.1 白度测试

采用上海尚普仪器设备有限公司生产的 SN-WSB-2 型白度仪测试磷石膏样品的白度，使用黑筒对屏幕示数进行调零，再放入标准白板进行校准，将样品盒装满并抹平样品表面，读取屏幕示数，重复操作 3~4 次后，取平均值，白度测量范围为 0%~99%。

1.3.2 X 射线荧光光谱测试

采用 X 射线荧光光谱（XRF）方法分析磷石膏的元素，设备为日本公司生产的 Rigaku ZSX Primus III + 型 X 射线荧光光谱分析仪。

1.3.3 X 射线衍射测试

通过 X 射线衍射（XRD）测定矿物物相。本文试验矿样表征采用德国布鲁克公司制造的 Bruker D8 Advance 型 X 射线衍射仪对磷石膏尾矿的干燥粉末进行测试分析。

1.3.4 SEM 扫描电子显微镜测试

为了反映磷石膏在浸出过程中的相变过程，使

用场发射扫描电子显微镜进行微观形貌观测。测试使用德国公司制造的 ZEISS Sigma 300 型扫描电镜。

1.3.5 结晶水含量测试

按照《石膏化学分析方法》(GB/T 5484—2012)测定磷石膏的结晶水含量,计算公式见式(1)。

$$\omega_{\text{结晶水}} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

式中, $\omega_{\text{结晶水}}$ 为结晶水含量,%; m_1 为试验产品质量, m_2 为 230 ± 5 °C 温度条件下烘干后试验产品质量。

1.3.6 精矿产率和品位测试

磷石膏精矿的产率和品位计算见式(2)~(3)。

$$\gamma_{ac} = \frac{Q_{M_c}}{Q_{M_0}} \times 100\% \quad (2)$$

表1 磷石膏的化学组成 XRF 结果

化学成分	SO ₃	CaO	SiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	K ₂ O
质量分数/%	42.00	34.72	3.43	0.89	0.20	0.14
化学成分	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	PbO	SrO	结晶水
质量分数/%	0.11	0.10	0.08	0.07	0.06	18.17

由表1可知,磷石膏样品中的主要成分为 SO₃、CaO,其含量分别为 42.00% 和 34.72%,以 SO₃ 含量推算磷石膏中二水硫酸钙(CaSO₄·2H₂O)含量为 90.3%,以结晶水含量推算二水硫酸钙含量为 86.8%。

X 射线衍射(XRD)物相分析结果如图2所示。由图2可知,磷石膏样品中不仅存在二水石膏,同时还有半水石膏,因此无论是通过 SO₃ 含量还是结晶水含量,都很难准确推断出磷石膏中二水石膏的准确含量,但是从这些结果基本可以得出磷石膏中主要成分为二水石膏,且其含量在 80% 以上。另外,磷石膏中主要杂质是石英(SiO₂)和磷杂质,分布占 3.43% 和 0.89%。因石膏物相的强峰对杂质物相特征峰有较强遮蔽作用,石英的特征衍射峰较微弱。

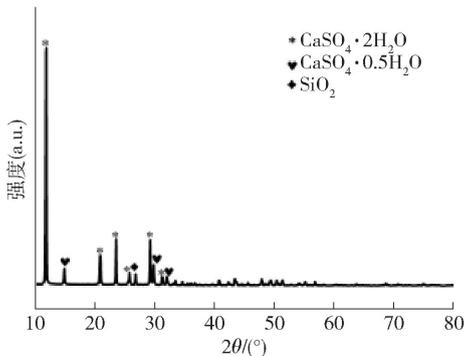


图2 磷石膏 XRD 图

$$\beta(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) = \frac{\beta(\text{SO}_3)}{\alpha(\text{SO}_3)/\alpha(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})} \times 100\% \quad (3)$$

式中: γ_{ac} 为精矿产率,%; Q_{M_c} 和 Q_{M_0} 分别为精矿重量和原矿重量; $\beta(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ 为精矿品位,%; $\alpha(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ 和 $\alpha(\text{SO}_3)$ 分别为二水硫酸钙相对分子质量和三氧化硫相对分子质量, $\beta(\text{SO}_3)$ 为 XRF 检测出的 SO₃ 含量。

2 结果与讨论

2.1 磷石膏物化性质分析

磷石膏样品 X 射线荧光分析(XRF)结果见表1。

利用扫描电子显微镜(SEM)对磷石膏原矿的微观形貌进行分析,结果如图3所示。从图3可知,磷石膏样品主要呈板状、菱片状,同时还有较多碎片以及细小颗粒聚集。

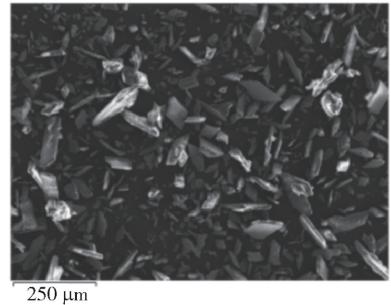


图3 磷石膏扫描电镜(SEM)图

为了进一步研究磷石膏各种组分的分布情况,对磷石膏样品进行了 EDS 面扫描分析,结果如图4所示。由图4可知,磷石膏原矿中含量较高的元素为 O、S 和 Ca,其分布分别占 59.65%、15.97% 和 21.26%。以 S 的含量推算磷石膏中二水石膏的含量,结果为 85.9%,基本与 XRF 结果(表1)对应;另外,主要杂质为 Si 和 P,这也与 XRF 结果一致。由于 EDS 面扫描分析是半定量分析,准确度较低,所以具体含量可能与 XRF 结果有所出入。另外,从图4中可以明显看出, Si 杂质主要以细碎的小碎片状存在。

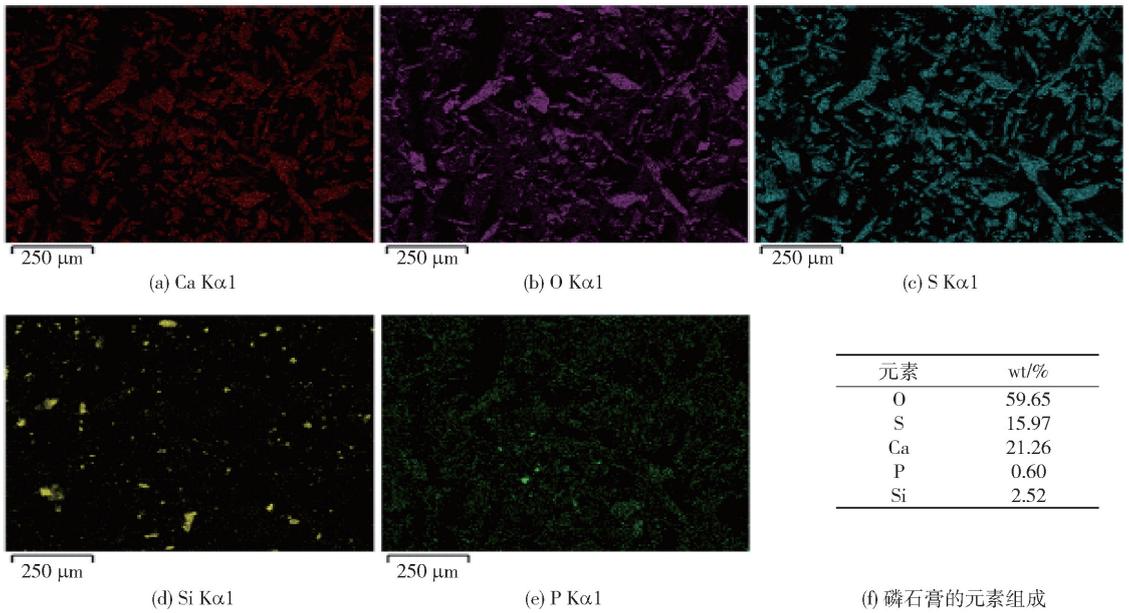


图4 磷石膏原矿能谱(EDS)分析

磷石膏粒度分布如图5所示。由图5可知,磷石膏表面积平均粒径 $D(3, 2) = 12.03 \mu\text{m}$, 体积平均粒径 $D(4, 3) = 50.54 \mu\text{m}$, $d(0.1) = 6.63 \mu\text{m}$, $d(0.5) = 41.05 \mu\text{m}$, $d(0.9) = 109.99 \mu\text{m}$, 从这些数据可以得出磷石膏样品的粒度较大,且分布范围较宽,分布不均匀。

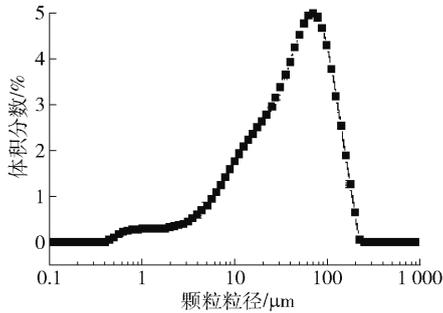


图5 磷石膏粒度分布情况

2.2 煤油药剂反浮选试验

2.2.1 浮选矿浆 pH 值的影响

控制矿浆浓度为 20%, 捕收剂煤油用量为 40 g/t, 起泡剂 MIBC 用量为 300 g/t, 考察矿浆 pH 值对磷石膏浮选效果的影响, 结果如图6所示。

从图6可以看出,随着矿浆 pH 值的增加,精矿白度和品位呈先下降后上升的趋势;而精矿产率呈现下降趋势。矿浆 pH 值会影响石膏表面的电位值,有研究表明,石膏的 IEP 值(等电位值)通常位于 2.0 左右^[25],这可能是 pH 值为 2 时精矿白度和品位达到峰值的原因。因此,矿浆 pH 值为 2 时取

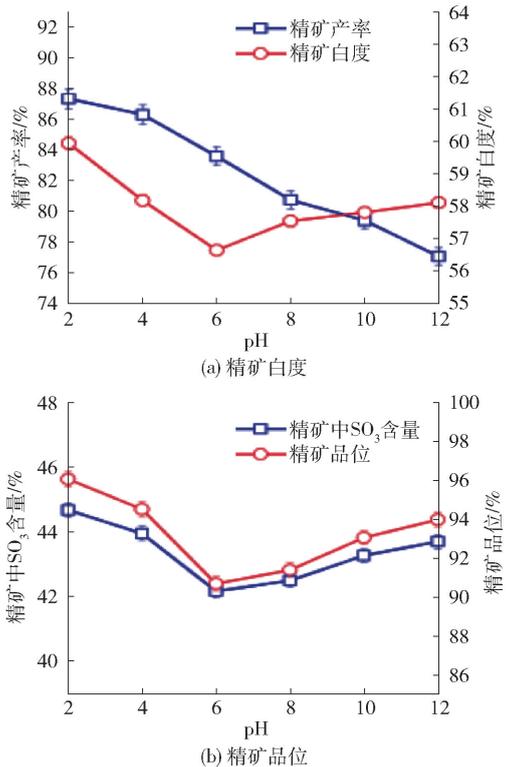
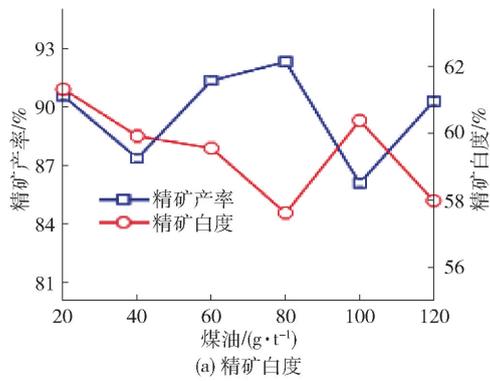


图6 捕收剂为煤油时 pH 值对精矿指标的影响

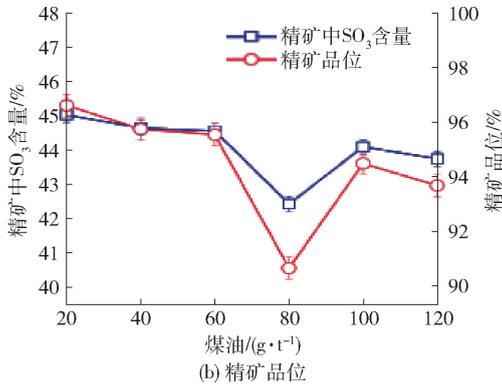
得最佳的浮选效果,此时精矿产率和白度分别为 87.31% 和 59.93%, 精矿品位为 96.04%。

2.2.2 煤油用量的影响

控制矿浆 pH 值为 2、矿浆浓度为 20%、起泡剂 MIBC 用量为 300 g/t, 考察捕收剂煤油用量对磷石膏浮选效果的影响, 结果如图7所示。



(a) 精矿白度



(b) 精矿品位

图7 煤油用量对精矿指标的影响

从图7可以看出,随着煤油用量的增加,精矿白度呈先下降后上升趋势,整体为下降趋势(由61.33%降至58%),精矿品位逐渐降低(由96.85%降至94.11%),这是由于矿浆中的煤油浓度增加,会导致精矿中的杂质含量上升。在煤油用量为20 g/t时,精矿白度和产率较高,且精矿品位也较高。因此,煤油用量为20 g/t时取得最好的浮选效果,此时精矿产率为90.51%,白度为61.33%,品位为96.85%。

2.3 油酸钠药剂反浮选试验

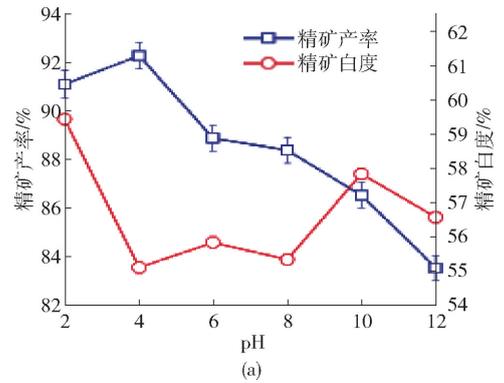
2.3.1 浮选矿浆 pH 值的影响

控制矿浆浓度为20%、捕收剂油酸钠用量为200 g/t、起泡剂MIBC用量为300 g/t,考察矿浆pH值对磷石膏浮选效果的影响,结果如图8所示。

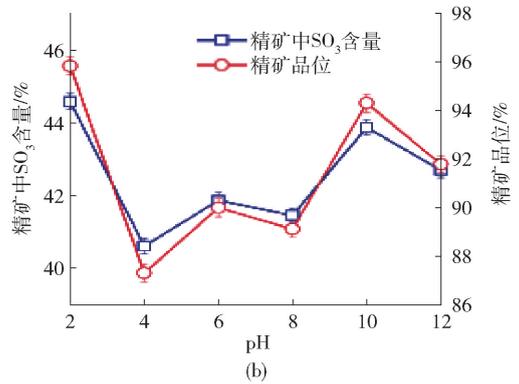
从图8可以看出,在酸性环境下,随着矿浆pH值的增加,精矿白度和品位呈先下降后上升的趋势,精矿白度由59.43%降至55.1%,而精矿产率则总体呈现下降趋势。碱性环境下的精矿产率、白度、品位整体低于酸性环境下,因此,矿浆pH值为2时取得最佳浮选效果,此时精矿产率为91.11%,白度为59.43%,品位为95.80%。

2.3.2 油酸钠用量的影响

控制矿浆pH值为2、矿浆浓度为20%、起泡剂



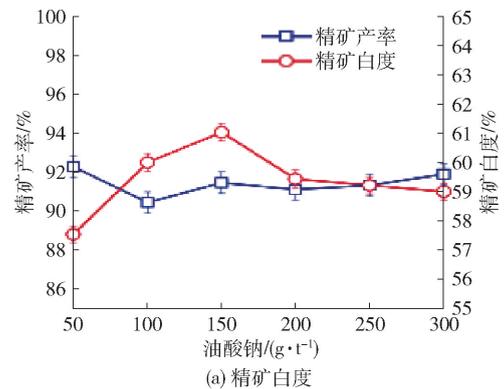
(a)



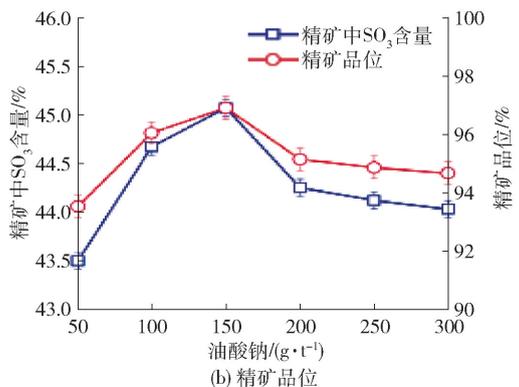
(b)

图8 捕收剂为油酸钠时 pH 值对精矿指标的影响

MIBC用量为300 g/t,考察捕收剂油酸钠用量对磷石膏浮选效果的影响,结果如图9所示。



(a) 精矿白度



(b) 精矿品位

图9 油酸钠用量对精矿指标的影响

从图9可以看出,随着油酸钠用量的增加,精矿产率先下降后上升;当油酸钠用量为50~150 g/t,精矿白度呈上升趋势,精矿品位也逐渐上升(由43.5%上升至45.7%);当油酸钠用量超过150 g/t时,精矿白度和品位则不断下降。这是由于油酸钠作为反浮选捕收剂对磷石膏的提纯效果有限,油酸钠用量过多会导致部分CaSO₄被吸附,进而对精矿的白度和品位产生影响,且油酸钠在浮选过程中起泡性能较低,与有机质等其他杂质被吸附后将不能随气泡上浮^[26]。因此,在油酸钠用量为150 g/t时,浮选效果最佳,此时精矿产率为91.46%,白度为61.03%,品位为96.90%。

2.4 废机油药剂反浮选试验

2.4.1 浮选矿浆pH值试验

控制矿浆浓度为20%、捕收剂废机油用量为40 g/t、起泡剂MIBC用量为300 g/t,考察矿浆pH值对磷石膏浮选效果的影响,结果如图10所示。

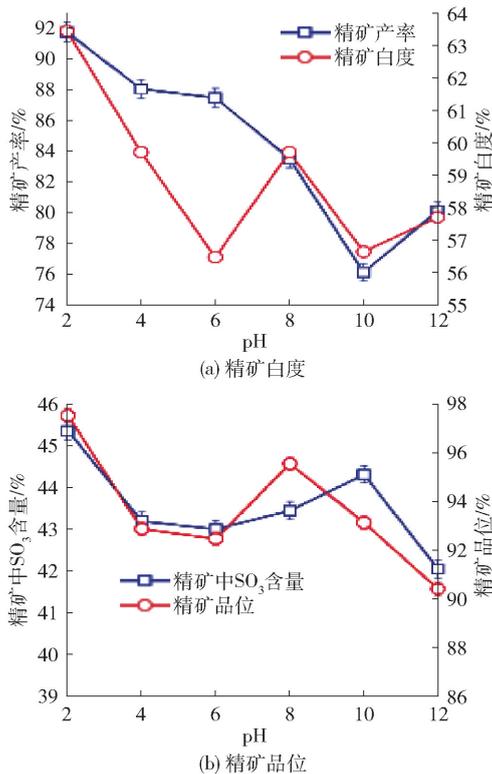


图10 捕收剂为废机油时pH值对精矿指标的影响

从图10可以看出,随着矿浆pH值的增加,精矿产率逐渐下降(由91.72%降至76.11%),精矿品位呈先下降后上升的趋势,但波动不大;而pH值对白度的影响则较大,精矿白度呈整体下降趋势(由63.43%降至56.46%);精矿白度和品位在pH值为

2时达到最高值。因此,在酸性环境下浮选效果最佳,这是因为酸性条件可以影响石膏的表面性质,从而提高石膏与气泡之间的附着力,进而使石膏被泡沫捕获浮出,实现与精矿的有效分离。因此,确定矿浆pH值为2时浮选效果最好,精矿产率为91.72%、白度为63.43%、品位为97.54%。

2.4.2 废机油用量的影响

控制矿浆pH值为2、矿浆浓度为20%、起泡剂MIBC用量为300 g/t,考察捕收剂废机油用量对磷石膏浮选效果的影响,结果如图11所示。

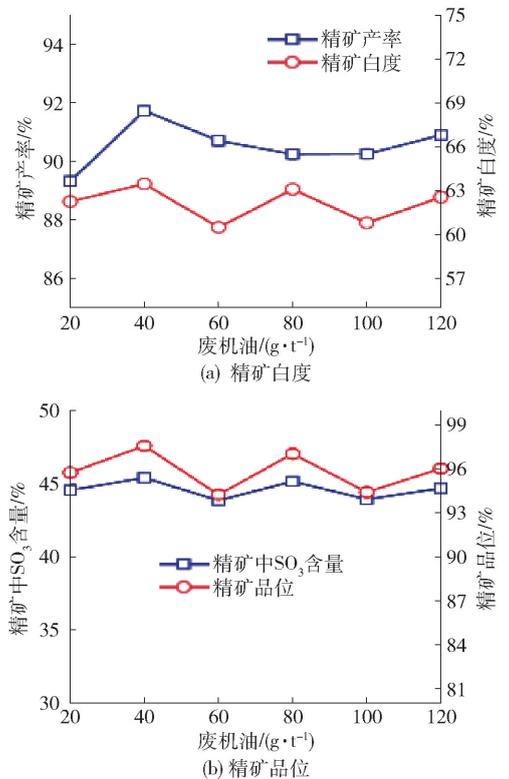


图11 废机油用量对精矿指标的影响

从图11可以看出,随着废机油用量的增加,精矿白度、产率和品位都总体呈先上升后下降的趋势。当废机油用量由20 g/t提升至40 g/t时,精矿白度由62.23%提升至63.43%,精矿品位由95.71%提升至97.54%。这是由于添加废机油可以有效提高石膏颗粒表面的疏水性,进而提升浮选效率和速度。当废机油用量超过40 g/t时,精矿产率下降主要是由于药剂量的增加,使得尾矿泡沫增多,导致携带的颗粒增多,因此废机油用量为40 g/t时,精矿产率、白度、品位最高。因此,当废机油用量为40 g/t时,该磷石膏浮选取得最佳效果,精矿产率为91.72%,白度和品位分别为

63.43% 和 97.54%。

2.5 磷石膏浮选尾矿 SEM 与 XRD 分析

经废机油浮选后的磷石膏浮选尾矿(呈黑色)的 SEM 和 XRD 分析分别如图 12 和图 13 所示。从图 12 可以明显看出,浮选尾矿的粒度要比原矿小很多,碎片状物质明显增多;从图 13 可看出,这些黑色的浮选尾矿还是以二水石膏为主要组成,石英为主要杂质。从 EDS 面扫描分析(图 14)可知,尾矿中 Si 杂质的分布和含量明显上升,S 含量明显下降,说明这些黑色杂质主要由有机质、吸附有机质的石英以及石膏碎片组成。

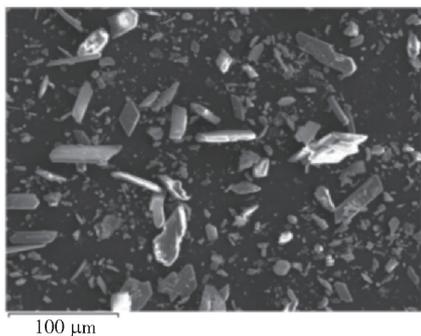


图 12 磷石膏浮选尾矿扫描电镜(SEM)图

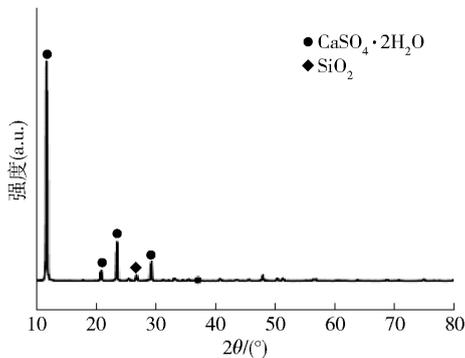


图 13 磷石膏浮选尾矿 XRD 图

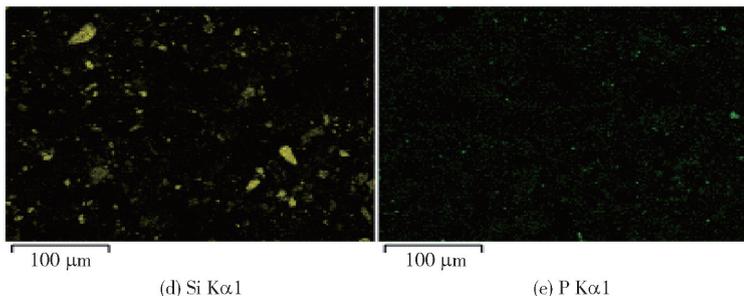
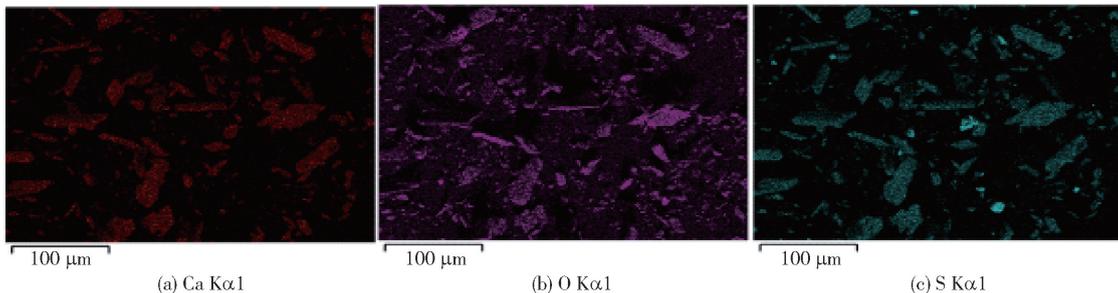
90.3%。磷石膏的白度为 40.6%,影响其白度的主要杂质是有机质、吸附有机质的石英以及石膏碎片。

2)煤油、油酸钠以及废机油在酸性条件下均能有效降低磷石膏中的有机质含量,从而提高磷石膏白度,煤油和废机油经反浮选后均能有效脱除磷石膏中的有机质,油酸钠具有反浮选脱硅效果,但经废机油反浮选后的磷石膏精矿白度和品位均高于煤油和油酸钠,废机油的浮选应用效果最佳。

3)采用废机油作为捕收剂对磷石膏进行除杂,在废机油用量为 40 g/t、起泡剂 MIBC 为 300 g/t、pH 为 2 的条件下,最终获得磷石膏精矿产率为 91.72%、白度为 63.43%、品位为 97.54%。废机油有效脱除了磷石膏中的黑色杂质,磷石膏的白度和品位得到了显著的提高。

3 结论

1)磷石膏主要化学组成为 SO_3 和 CaO ,含量分别为 42.00% 和 34.72%,以 SO_3 含量计算可得,二水硫酸钙 ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) 在磷石膏中的含量为



元素	wt/%
O	64.16
S	12.91
Ca	14.32
P	0.85
Si	6.75

(f) 尾矿的元素组成

图 14 磷石膏浮选尾矿能谱(EDS)分析

4) SEM 形貌分析及 EDS 结果表明, 浮选后磷石膏尾矿表面 Si 元素含量上升, S 含量明显下降, 证实利用废机油反浮选可以有效去除磷石膏表面的 SiO₂ 及有机质。

[参考文献]

- [1] 崔荣政, 白海丹, 高永峰, 等. 磷石膏综合利用现状及“十四五”发展趋势 [J]. 无机盐工业, 2022, 54(4): 1-4.
- [2] 彭家惠 彭, 张建新, 万体智. 磷石膏中可溶磷形态、分布及其对性能影响机制的研究 [J]. 硅酸盐学报, 2000(4): 309-313.
- [3] WU F, REN Y, QU G, et al. Utilization path of bulk industrial solid waste: A review on the multi-directional resource utilization path of phosphogypsum [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 313: 114957.
- [4] 王进明, 董发勤, 王肇嘉, 等. 磷石膏浮选增白净化新工艺研究 [J]. 非金属矿, 2019, 42(5): 1-5.
- [5] 杜明霞. 磷石膏浮选净化资源化理论与工艺研究 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2022.
- [6] 罗陈莉, 涂俊宏, 廖炫哲, 等. 过氧单磺酸钾/O₃ 协同浮选增白磷石膏的研究 [J]. 非金属矿, 2023, 46(6): 53-56.
- [7] 史皓东, 曾彦琦, 任浏祎, 等. 磷石膏共反浮选脱色提质工艺及机理研究 [J]. 非金属矿, 2024, 47(2): 97-102.
- [8] 张峻, 解维闵, 董雄波, 等. 磷石膏材料化综合利用研究进展 [J]. 材料导报, 2023, 37(16): 167-178.
- [9] 李展, 陈江, 张覃, 等. 磷石膏中磷、氟杂质的脱除研究 [J]. 矿物学报, 2020, 40(5): 639-646.
- [10] 周晓阳, 王发洲. 钢渣复合磷石膏泡沫混凝土的制备及性能研究 [J]. 混凝土, 2023 (10): 212-215, 220.
- [11] BOSSOLANI J W, CRUSCIOL C A C, MARIANO E, et al. Long term co-application of lime and phosphogypsum increases 15 N recovery and reduces 15 N losses by modulating soil nutrient availability, crop growth and N cycle genes [J]. European Journal of Agronomy, 2023, 149: 126907.
- [12] 邹学勇, 祝贺, 郑光明, 等. 磷石膏氨化制备硫酸铵溶液工艺研究 [J]. 磷肥与复肥, 2023, 38(3): 9-11.
- [13] RASHAD A M. Phosphogypsum as a construction material [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 166: 732-743.
- [14] 马林转, 宁平, 杨月红, 等. 磷石膏预处理工艺综述 [J]. 磷肥与复肥, 2007 (3): 62-63.
- [15] 朱志伟, 何东升, 陈飞, 等. 磷石膏预处理与综合利用研究进展 [J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(4): 19-25.
- [16] 朱桂华, 何宾宾, 杨文娟, 等. 磷石膏净化技术研究进展 [J]. 磷肥与复肥, 2023, 38(4): 25-30.
- [17] 王进明, 杜明霞, 李国欢, 等. 浮选净化对磷石膏制备 β-半水石膏性能的影响 [J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(4): 107-113.
- [18] 时春昱, 杨思原, 周俊伟, 等. 湖北某低品质磷石膏浮选增白试验研究 [J]. 金属矿山, 2024, (3): 117-124.
- [19] 李俊旺, 张云海, 呼振峰. 四川磷石膏浮选脱硅实验研究 [J]. 矿产综合利用, 2023, (3): 139-142.
- [20] 韦家斌, 吉永海, 陈晓庆, 等. 磷石膏浮选提纯除杂工艺研究 [J]. 非金属矿, 2022, 45(5): 57-60.
- [21] 张革利, 葛英勇, 陆泽通, 等. 湖北某磷石膏浮选提纯试验研究 [J]. 矿冶工程, 2024, 44(2): 63-65, 70.
- [22] 陈小红, 余意, 朱森, 等. 磷石膏共反浮选除杂增白工艺研究 [J]. 无机盐工业: 1-18.
- [23] 顾云翔, 李育彪, 韩厚胜, 等. 磷石膏浮选提纯增白工艺研究 [J]. 矿产综合利用: 1-8.
- [24] 汪国辉, 刘文刚, 李维超, 等. 改性废机油常温浮选磷灰石矿的试验研究 [J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(2): 40-45.
- [25] FANG J, GE Y, CHEN Z, et al. Flotation purification of waste high-silica phosphogypsum [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 320: 115824.
- [26] 郭万鑫, 董万强, 邓祥意, 等. 磷石膏浮选—酸浸耦合除杂增白工艺研究 [J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(6): 129-138.

(下转第 80 页)

Study on Desulfurization, Desilication and Decarburization Process of Low Grade High Sulfur and High Carbon Bauxite

WANG Songlin

(China Aluminum Zhongzhou Aluminum Industry Co., Ltd., Jiaozuo 454000, China)

Abstract: This paper introduced the harm and influence of high sulfur minerals and high carbon minerals in domestic bauxite on the Bayer process production process, systematically combed the current application status of desulfurization and decarbonization technology, and emphatically introduced the practice of desulfurization, desiliconization and decarbonization process in an alumina enterprise. Combined with the characteristics of bauxite in Sanmenxia area of Henan Province, the alumina enterprise proposed a positive flotation synchronous desulfurization and desilication process for low-grade high-sulfur bauxite after process modification and collector formula optimization. Under the premise of desilication rate of 60% – 65%, the desulfurization rate of 60% – 70% can be obtained. A reverse flotation desulfurization process was proposed for high-sulfur bauxite with sulfur content greater than 2.0%, and the desulfurization rate reached about 85%. At the same time, combined with the advantages of sintering process and Bayer process, a low-cost process decarburization process was proposed, and the decarburization rate reached about 30%. Focusing on the combination of source impurity removal and process impurity removal is the direction of efficient and economical utilization of high-sulfur and high-carbon bauxite in the future.

Key words: desulfurization; decarbonization; desilication; flotation; reverse flotation

(上接第 37 页)

Research on the Application of Waste oil in the Flotation of Phosphogypsum

ZHANG Jiani, ZHOU Fujia, ZHANG Yu, YU Weijian, GUAN Qingjun

(Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Phosphogypsum is a bulk solid waste produced in the process of phosphoric acid hydrometallurgy, and its stacking has caused serious harm to the environment. Aiming at the problem that phosphogypsum is difficult to be recycled due to low whiteness and high SiO_2 content, the influence of kerosene, sodium oleate and waste engine oil on flotation purification of phosphogypsum was studied by taking phosphogypsum produced by a phosphorus chemical enterprise in Guizhou as the research object. The results show that waste engine oil can effectively remove impurities such as SiO_2 and organic matter in phosphogypsum, and the flotation effect is the best. The optimum conditions for the removal of phosphogypsum by waste engine oil are as follows: the pH value of pulp is 2.0, the concentration of flotation pulp is 20%, the amount of waste engine oil is 40 g/t, and the amount of MIBC is 300 g/t. Under the optimum experimental conditions, the concentrate yield is 91.72%, the whiteness is 63.43%, the grade is 97.54%, and the effective separation of dihydrate gypsum and organic matter is realized. This study has important guiding significance for the subsequent realization of resource and high-value utilization of phosphogypsum.

Key words: phosphogypsum; flotation; depletion of organic matter; silicon dioxide; whiteness