

# 浮选净化对磷石膏制备 $\beta$ -半水石膏性能的影响

王进明<sup>1,2,3,4,5</sup>, 杜明霞<sup>1,4</sup>, 李国欢<sup>1,4</sup>, 董发勤<sup>1,4</sup>, 谭宏斌<sup>1,4</sup>

- 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010;
- 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 100192;
- 固废资源化利用与节能建材国家重点实验室, 北京 100041;
- 固体废物处理与资源化教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010;
- 四川省非金属矿粉体改性与高值化利用技术工程实验室, 四川 绵阳 621010

中图分类号: TD923; TQ177.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)04-0107-07  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.04.012

**摘要** 磷石膏是磷化工行业产生的大宗工业固废, 其中的杂质会降低磷石膏制备 $\beta$ -半水石膏的性能。采用浮选法对磷石膏进行净化提纯, 并对比净化前后磷石膏所制备 $\beta$ -半水石膏的性能。研究表明: 采用甲基异丁基甲醇为起泡剂反浮选可脱除微细矿泥及有机杂质, 采用十二胺可浮出二水石膏。闭路浮选精矿与磷石膏原矿相比, 白度从19.4%提升到41.1%, 纯度从73.12%提升到96.41%。利用磷石膏精矿制备 $\beta$ -半水石膏的2 h抗折强度、2 h抗压强度、3 d干抗压强度和原样制备的相比分别提升22.8%、14.1%、24.1%, 白度从27.8%提升到46.3%。采用浮选净化能显著提高磷石膏制备 $\beta$ -半水石膏的性能。

**关键词** 磷石膏; 浮选; 净化提纯;  $\beta$ 石膏; 强度

## 引言

磷石膏是磷化工行业产生的一种大宗工业固废, 其主要成分是二水硫酸钙, 其含量达到85%以上<sup>[1]</sup>。目前磷石膏的年产出货量超过7500万t<sup>[2]</sup>。磷石膏的堆放不仅占用了大量土地资源, 还严重影响了生态环境。因此, 对磷石膏进行大规模资源化利用已成为当务之急<sup>[2-4]</sup>。磷石膏可用于生产建筑材料、土壤改良剂、农业肥料等<sup>[5]</sup>, 其中一个重要的用途是生产建筑石膏粉, 也称作 $\beta$ 石膏。它具有快速水硬化的特点, 可用于石膏板材、砌块等建材的生产<sup>[6-8]</sup>。但由于磷石膏中含有大量有害杂质, 如可溶磷、可溶氟、有机杂质、不溶磷等。如果直接采用磷石膏制备 $\beta$ 石膏, 所得产品品质不高。为了保证 $\beta$ 石膏制品的性能, 须对磷石膏进行除杂<sup>[9-10]</sup>。目前对磷石膏净化除杂方法有: 酸洗法、水洗法、常规浮选法、煅烧法等。这些方法能除去磷石膏中的某些杂质, 但都存在一些缺点, 如酸洗法成本较高, 经济效益低, 不能完全除杂<sup>[11-13]</sup>; 水洗法耗水量大, 投资大, 且易产生二次污染<sup>[14-16]</sup>; 常规浮选法利用磷石膏中有机物天然疏水性强的特点, 通过搅拌使磷石膏中有机物疏水上浮从而去除, 这种方法效率低,

对磷石膏中可溶性杂质的去除效果不佳, 耗时较长<sup>[15-18]</sup>; 煅烧法投资成本大、能耗高。

本研究综合水洗法和常规浮选法的优缺点, 又进一步开发出新型磷石膏净化除杂法, 该工艺方法不但可除去磷石膏中有机杂质, 而且可降低磷石膏中石英、不溶磷和氟、可溶磷和氟的含量。研究结果对磷石膏的除杂、资源化利用具有重要的指导意义。

## 1 试验样品及方法

### 1.1 试验样品

本研究所用的磷石膏来自国内某大型磷化工企业。磷石膏原矿经自然干燥后, 混匀、缩分, 每袋称取200 g以备后续浮选试验及分析使用。采用X衍射荧光光谱仪(XRF)分析磷石膏化学成分, 结果见表1。由数据可知, 磷石膏 $\text{SO}_3$ 含量49.33%、 $\text{CaO}$ 含量41.31%、 $\text{SiO}_2$ 含量为5%左右,  $\text{SO}_3$ 和 $\text{CaO}$ 含量均高于天然石膏。经结晶水含量分析得到 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 纯度为73.12%。结合XRD分析结果可知该样品中主要杂质矿物有石英、未反应完的磷灰石、黄铁矿等。

收稿日期: 2023-03-07

基金项目: 矿物加工科学与技术国家重点实验室平台基金项目(BGRIMM-KJSKL-2022-21); 固废国家重点实验室平台基金项目(SWR-2019-003)

作者简介: 王进明(1985—), 男, 陕西汉中, 博士后, 主要从事难选复杂矿分选。E-mail: wjmyutian@126.com。

表 1 磷石膏原料化学成分 XRF 分析结果 /%  
Table 1 XRF analysis results of phosphogypsum raw ores

元素	SO <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SrO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	BaO	Na <sub>2</sub> O	ZnO
含量	49.33	41.31	5.03	1.49	1.42	0.58	0.35	0.19	0.10	0.07	0.07	0.01

## 1.2 试验方法

针对磷石膏杂质成分复杂的特性,先利用打散机对磷石膏进行轻微磨矿,样品得到分散。接着对浮选试验条件进行优化,获得高品质磷石膏精矿,最后利用净化前后的磷石膏制备出β-半水石膏,并对比它们的性能差异,考察浮选净化对磷石膏制备β-半水石膏性能的提升程度。

### 1.2.1 浮选实验

浮选试验在 1 L 的 XFD 型单槽式浮选机中进行,浮选机主轴转速为 1 992 r/min。试验中单次用量为 200 g,泡沫产品和浮选槽底部产品分别过滤,经 40 ℃ 烘干、称量后计算精矿产率,并对各阶段产品进行检测分析。

### 1.2.2 磷石膏性能测试

采用上海悦丰仪表有限公司生产的 SBDY-1P 型白度仪测试磷石膏样品的白度。白度测量范围为 0~99%。按照国标《石膏化学分析方法》(GB/T 5484—2012)测定磷石膏中附着水含量、结晶水含量、二水硫酸钙纯度。

### 1.2.3 β 石膏制备及性能测试

分别称取适量磷石膏原矿、浮选精矿,在 160 ℃ 下直接煅烧 2 h 制备β-半水石膏粉,反应结束后样品置于密封袋保存,用于制备石膏砌块及 XRD、SEM 等分析检测。制备完成后称取适量β-半水石膏粉浇筑到 40 mm×40 mm×160 mm 的试模中振荡压实成型,放置 30 min 后脱模,固化 2 h,常温养护后分别测试试块的抗折强度、抗压强度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 磷石膏净化提纯实验研究

#### 2.1.1 磷石膏脱泥浮选药剂筛选及用量实验

##### (1) 起泡剂筛选试验

磷石膏中有大量易浮微细矿泥及有机杂质,可通过添加起泡剂将其反浮选脱除,并去除部分富集在微细矿泥中的不溶磷<sup>[9]</sup>。首先对反浮选起泡剂进行筛选,所用起泡剂种类分别选用脂类、醚类、醇类中常用起泡剂 2#油、磷酸三丁酯、甲基异丁基甲醇(MIBC),比较了三种起泡剂对磷石膏中易浮杂质脱除行为的影

响。试验只添加起泡剂,药剂用量暂定为 300 g/t。试验结果见图 1。

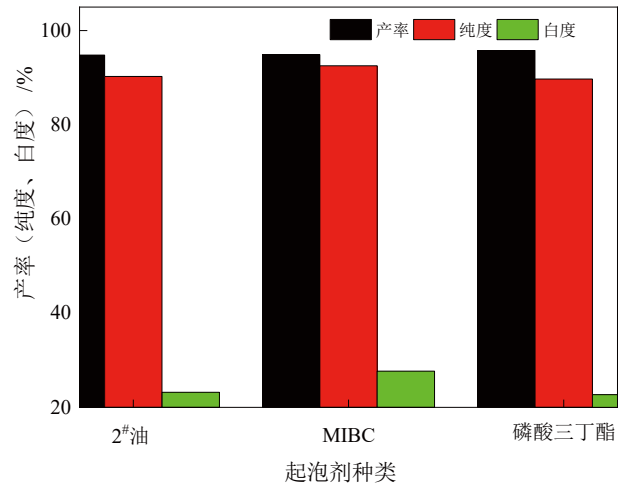


图 1 起泡剂筛选试验结果  
Fig. 1 Screening test results of foaming agent

从筛选试验结果可看出,几种药剂均能浮选脱除部分易浮有机杂质,但经比较,MIBC 反浮选得到的磷石膏精矿白度达到 27.7%,纯度达到 92.54%,综合比较产率、白度、纯度等指标,MIBC 除杂效果最好,另外在试验过程中发现,MIBC 较其他起泡剂的起泡速率、泡沫结构较好,因此在后续试验中以 MIBC 作为脱除磷石膏中易浮有机杂质及微细矿泥的起泡剂。

##### (2) 起泡剂用量试验

经起泡剂筛选试验确定 MIBC 为最优起泡剂,后续进行了 MIBC 用量试验,结果如图 2 所示。可以看出随 MIBC 用量的增加,易浮有机杂质及矿泥的脱除率、磷石膏精矿的白度、纯度增大。当 MIBC 用量为 300 g/t 时,磷石膏精矿指标达到最好,继续增加 MIBC 用量,磷石膏分选指标变化幅度不大,主要是由于过量的起泡剂会形成大量黏而细小的气泡,容易将部分石膏黏附于气泡带出,降低了石膏精矿的浮选指标。

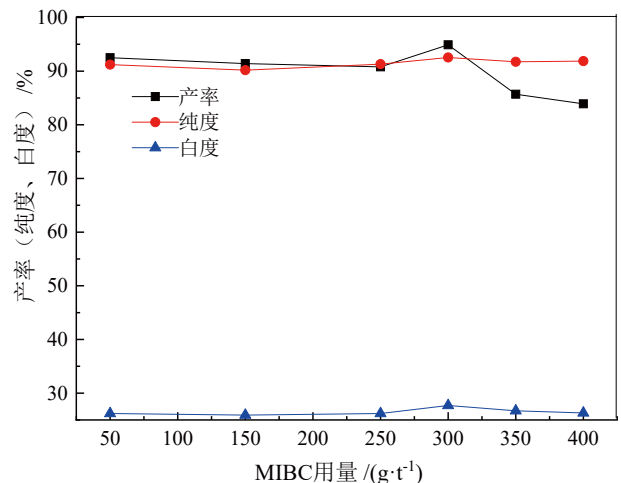


图 2 起泡剂用量试验结果  
Fig. 2 Dosage test results of foaming reagent

因此在后续试验中 MIBC 用量为 300 g/t。

### 2.1.2 磷石膏脱泥前磨矿试验

反浮选脱泥后, 浮选精矿经扫描电镜观察结果如图 3 所示, 从图中看出磷石膏反浮选精矿中还存在大量聚集状团块, 夹杂微细杂质。聚集状团块会影响杂质的去除, 因此后续对磷石膏进行轻微磨矿, 使更多杂质与石膏得到分离解离。

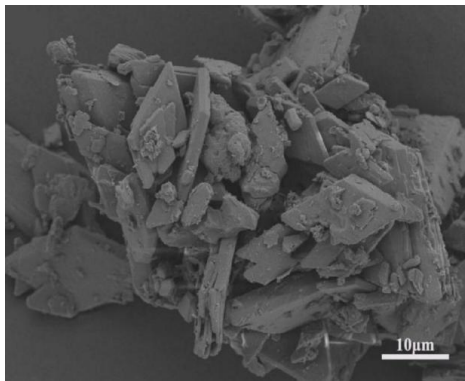


图 3 反浮选脱泥精矿扫描电镜图  
Fig. 3 SEM image of reverse flotation desliming concentrate

接着考察磨矿时间对磷石膏中易浮杂质脱除的影响, 试验结果如图 4 所示。从图 4 可以看出, 随着磨矿时间的增加, 磷石膏精矿的产率、白度、纯度均呈增长趋势, 当磨矿时间达到 15 min 时, -74 μm 占比达 59.3%, 反浮选得到的磷石膏精矿白度达到 29.8%, 纯度达到 93.96%, 增长趋势达到顶点, 为反浮选脱泥的最优条件, 因此在后续试验中磨矿时间定为 15 min。

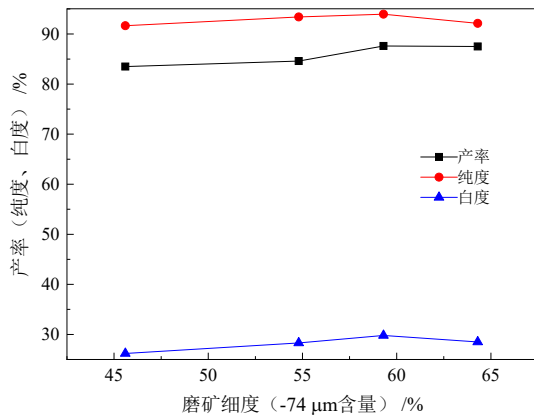


图 4 脱泥前磨矿试验结果  
Fig. 4 Grinding test results before desliming

### 2.1.3 磷石膏正浮选药剂用量试验

磷石膏经磨矿、添加十二烷基三甲基氯化铵(1231)、MIBC 反浮选脱除易浮有机杂质及微细矿泥后, 仍含有一些粒度较粗的磷钙石、石英等, 这些杂质影响磷石膏白度, 需将其去除。石膏的 PZC 在 2.2 附近, 石膏表面在较宽的 pH 值范围内荷负电, 阳离子捕收剂

对其具有良好的捕收能力<sup>[20]</sup>。利用十二胺对磷石膏进一步分离提纯, 探究十二胺用量对石膏白度、纯度的影响。试验流程及结果分别如图 5 和图 6 所示。

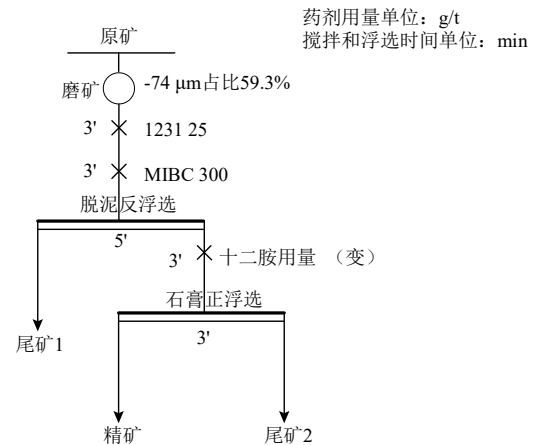


图 5 十二胺用量试验流程  
Fig. 5 Flowsheet of dodecylamine dosage test

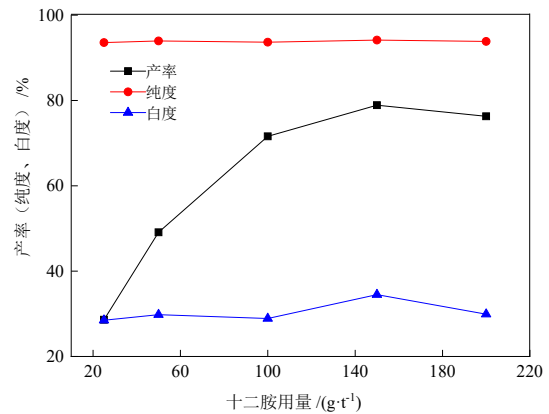


图 6 十二胺用量试验结果  
Fig. 6 Test results of dodecylamine dosage

从图 6 可以看出, 随着十二胺用量的增大, 磷石膏精矿的产率随之增大, 当十二胺用量达到 150 g/t 后, 继续增大用量磷石膏精矿产率、白度、纯度不再变化并有下降趋势。因为捕收剂用量增加, 导致磷石膏中 CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O 上浮量增大, 容易在上浮过程中夹杂更多的杂质。综合考虑十二胺的药剂成本等因素, 在浮选试验中十二胺用量定为 150 g/t。

### 2.1.4 磷石膏净化提纯开路试验

在以上浮选试验条件的基础上, 进行全流程开路试验, 试验流程及结果分别如图 7 和表 2 所示。与原矿相比, 磷石膏精矿白度从 19.4% 提升到 40.5%, 纯度从 73.12% 提升到 92.37%。开路试验结果表明, 一次脱泥反浮选一次粗选三次精选能够获得较高质量的石膏产品。

### 2.1.5 磷石膏净化提纯闭路试验

通过开路试验研究, 闭路试验中正浮选采用“一

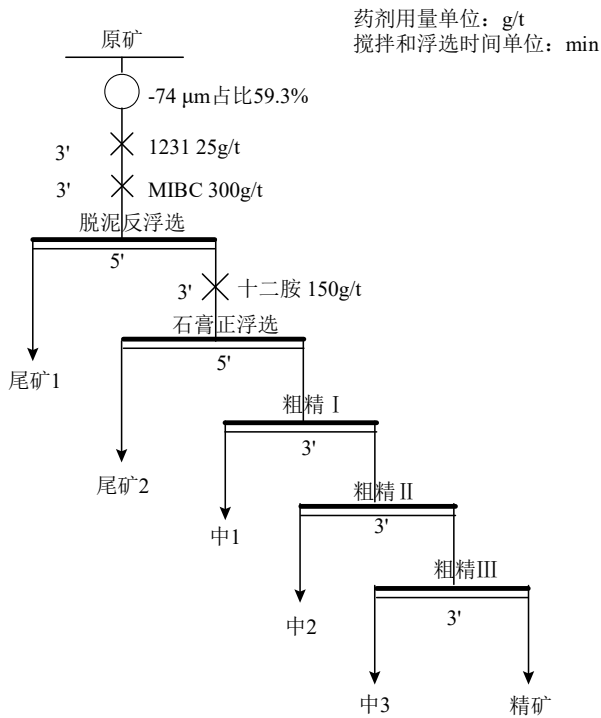


图 7 磷石膏净化开路试验流程  
Fig. 7 Flowsheet of open circuit test for phosphogypsum purification

表 2 开路试验结果  
Table 2 Results of open circuit test

产品名称	产率/%	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O 纯度/%	白度/%
磷石膏精矿	41.25	94.37	40.5
中矿 1	6.20	90.14	35.4
中矿 2	11.75	91.36	36.1
中矿 3	16.45	93.29	39.8
尾矿 1	21.27	69.31	17.4
尾矿 2	3.08	72.67	20.5
磷石膏原矿	100	73.12	19.4

粗三精一扫”的浮选流程,可以得到较好的浮选工艺指标。磷石膏闭路浮选流程及结果分别如图 8 和表 3 所示,经闭路浮选得到的磷石膏精矿 SiO<sub>2</sub> 含量降低至 2.76%,总磷含量降低至 1.17%,与原矿相比可溶磷含量从 0.48% 降低至 0.07%,可溶氟含量从 0.54% 降低至 0.18%。磷石膏白度从 19.4% 提升到 41.1%,纯度从 73.12% 提升到 96.41%。提纯后的精矿品质满足磷石膏用于石膏建材原料国标(GB/T 23456—2018)一级

表 3 闭路试验结果  
Table 3 Results of close circuit test

产品	SO <sub>2</sub> /%	CaO/%	SiO <sub>2</sub> /%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%	产率/%	白度/%	纯度/%	可溶磷含量/%	可溶氟含量/%
精矿	51.64	42.88	2.76	1.17	0.72	0.30	67.98	41.1	96.41	0.07	0.18
尾矿 1	45.27	34.13	11.93	2.07	3.39	1.77	22.84	18.3	71.46	-	-
尾矿 2	48.70	38.12	4.51	2.81	2.51	0.89	9.18	18.7	74.83	-	-
原矿	49.33	41.31	5.03	1.49	1.42	0.58	100	19.4	73.12	0.48	0.54

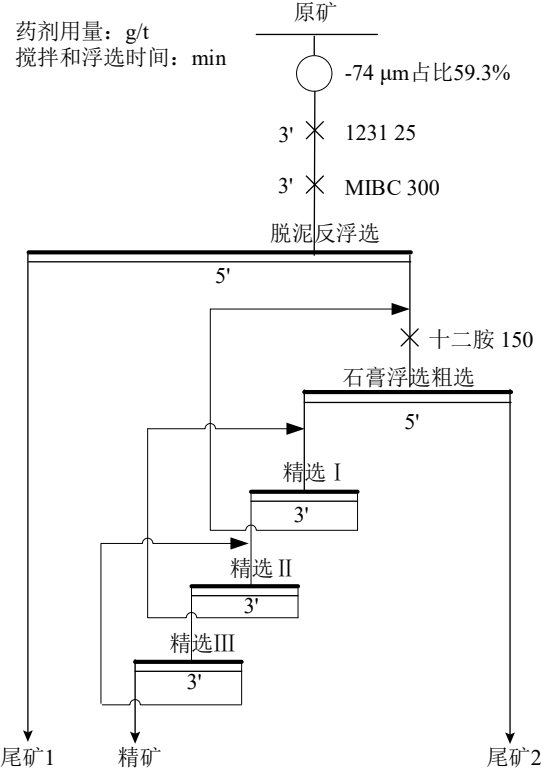


图 8 磷石膏净化闭路试验流程  
Fig. 8 Flowsheet of close circuit test for phosphogypsum purification

品标准。

### 2.1.6 磷石膏精矿和原矿性质对比

为进一步比较提纯净化前后磷石膏性质的差异,对磷石膏原矿和精矿进行 XRD 和 SEM 分析,结果分别如图 9 和图 10 所示。

从磷石膏的 XRD 谱图 9 中看出,特征峰位于 11.64°、20.72°、23.38°、29.1°,分别对应二水石膏的(200)、(020)、(400)、(204)晶面,表明磷石膏中主要物相为二水石膏,且精矿中未检测到明显杂质相。磷石膏原矿中的主要物相也为 CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O,但同时检测到位于 25.54°、26.74°的 SiO<sub>2</sub> 特征峰,证明了提纯后的磷石膏中杂质含量减少。

精矿和原矿的 SEM 分析如图 10 所示,从图 10(a) 看出磷石膏原矿表面不平整且有缺损现象,并存在大量杂质颗粒。从图 10(b) 中看出磷石膏精矿晶体为菱形、板状结构,晶面较磷石膏原矿更为平整,表面几乎

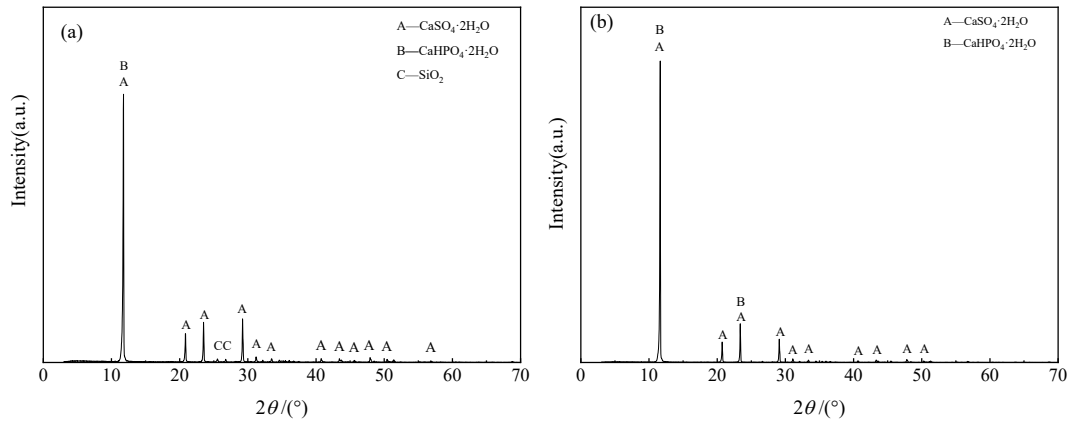


图 9 磷石膏原矿(a)和精矿(b)XRD图  
Fig. 9 XRD pattern of phosphogypsum raw ore (a) and concentrate (b)

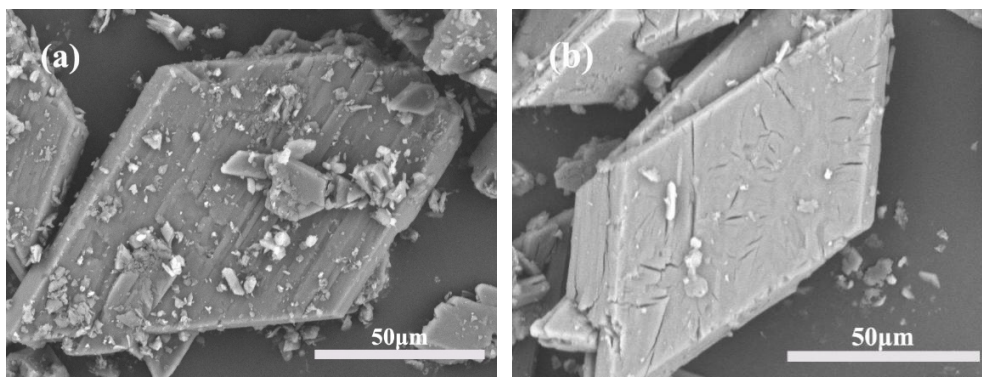


图 10 磷石膏原矿(a)和精矿(b)SEM图  
Fig. 10 SEM image of phosphogypsum raw ore (a) and concentrate (b)

没有杂质颗粒,且无明显缺陷。

## 2.2 磷石膏制备 $\beta$ -半水石膏

### 2.2.1 提纯前后磷石膏制备 $\beta$ -半水石膏粉对比

采用直接煅烧法在 160 °C 下分别将磷石膏原矿、精矿制备  $\beta$ -半水石膏粉,将制备完成的样品保存在干燥器中,在扫描电子显微镜下以不同倍数放大率观察,研究提纯前后石膏晶体的变化。由图 11(a)、(b)可以看出,磷石膏精矿表面较为光滑,只黏附有少量的杂质,板状结构较为完整,而原矿表面黏附有大量颗粒

状有机物等杂质,且原矿存在较多破碎的板状结构。由图 12 可知,磷石膏原矿、精矿烧制的  $\beta$ -半水石膏粉主要物相均为 CaSO<sub>4</sub>·0.5H<sub>2</sub>O,其中经浮选净化后的磷石膏精矿烧制的  $\beta$ -半水石膏粉中 SiO<sub>2</sub> 的峰强度明显低于原矿,说明浮选提纯后的磷石膏中 SiO<sub>2</sub> 的含量较磷石膏原矿显著降低。

### 2.2.2 提纯前后磷石膏制备的建筑石膏砌块性能比较

将提纯前后磷石膏分别制备成的  $\beta$ -半水石膏,再分别制备成建筑石膏砌块,对比两种原料制备出的砌

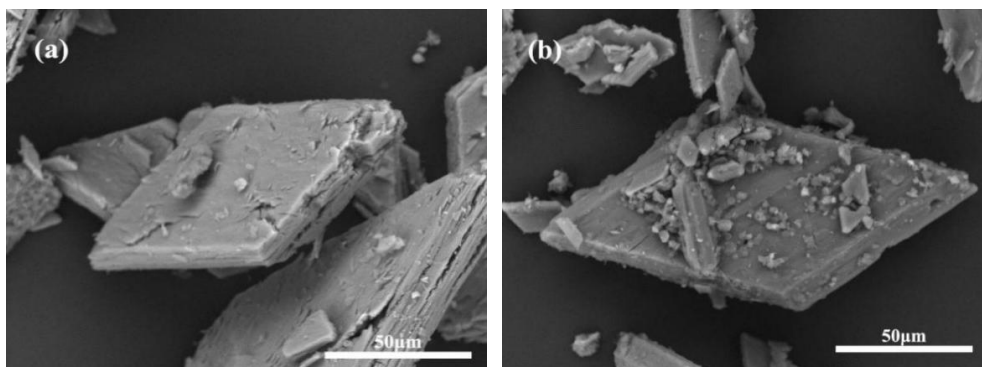


图 11 净化前后磷石膏制备  $\beta$ -半水石膏 SEM: (a)精矿; (b)原矿  
Fig. 11  $\beta$ -hemihydrated gypsum SEM prepared by phosphogypsum before and after purification: concentrate (a), raw ores (b)

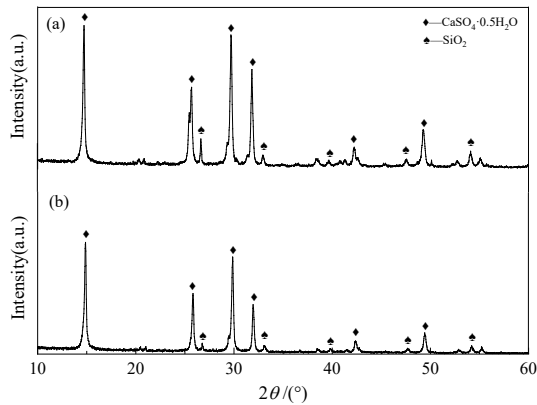


图 12 原矿(a)、精矿(b)烧制β-半水石膏 XRD  
Fig. 12 XRD pattern of β-hemihydrate gypsum fired from phosphogypsum raw ore (a) and concentrate (b)

块机械性能的差异。结果如表 4 所示,根据《轻质抹灰用β型半水石膏》(T/CBCA 004—2020)标准,利用磷石膏精矿制备的β-半水石膏粉性能远超 3.0 级,与原矿制备的β半水石膏相比,白度从 27.8% 提升到 46.3%。提纯后磷石膏制备的建筑石膏砌块 2 h 抗折、抗压强度较原矿提升 22.8%、14.1%,3 d 干抗压强度较原矿提升 24.1%。

表 4 净化前后磷石膏制备建筑石膏块性能对比  
Table 4 Properties comparison of β-hemihydrate gypsum blocks prepared by phosphogypsum before and after purification

性能	β-半水石膏 (原矿)	β-半水石膏 (精矿)	提升幅度/%
白度/%	27.8	46.3	66.5
2h抗折强度/MPa	2.67	3.28	22.8
2h抗压强度/MPa	8.11	9.25	14.1
3d干抗压强度/MPa	13.26	16.45	24.1

### 3 结论

(1)磷石膏原矿杂质成分种类复杂,石膏与部分磷灰石呈包裹体出现,在浮选净化前先对磷石膏进行轻微磨矿打散聚团,使更多表面的杂质与石膏得到解离,为降低磷石膏精矿中有机质含量打下了基础。

(2)利用 MIBC 为起泡剂进行磷石膏反浮选,再利用十二胺对其精矿进行正浮选,经过“一粗三精一扫”的闭路浮选流程,得到的磷石膏精矿白度从 19.4% 提升到 41.1%,纯度从 73.12% 提升到 96.41%。

(3)采用浮选对磷石膏进行提纯净化后所制备的β-半水石膏粉的性能都有了很大的提高。磷石膏精矿制备出的β-半水石膏粉与原矿制备的相比,白度提高了 18.5 百分点,2 h 抗折、抗压强度、3 d 干抗压强度分别提高了 22.8%、14.1% 和 24.1%。

### 参考文献:

[1] 彭家惠,彭志辉,张建新,等.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,2000,28(4):309-313.

PENG J H, PENG Z H, ZHANG J X, et al. Study on the form and distribution of water-soluble P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in phosphogypsum and effective mechanism of properties[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2000, 28(4): 309-313.

[2] 董泽,翟延波,任志威,等.磷石膏建材资源化利用研究进展[J].无机盐工业,2022,54(4):5-9.

DONG Z, ZHAI Y B, REN Z W, et al. Research progress on phosphogypsum utilization in building materials[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2022, 54(4): 5-9.

[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: 0301-4797.

[4] 李铭,梁歆,随婕斐,等.我国磷石膏资源化利用进展及前景展望[J].磷肥与复肥,2020,35(7):30-36.

LI M, LIANG H, SUI J F. Progress and prospect of comprehensive utilization of phosphogypsum in China[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2020, 35(7): 30-36.

[5] 吴道丽.磷石膏作为水泥缓凝剂的应用研究[J].环境科学导刊,2008,27(6):76-77.

WU D L. Study on application of phosphogypsum as cement retarder[J]. Environmental science survey, 2008, 27(6): 76-77.

[6] CHERNYSHY. Recycling of radioactive phosphogypsum wastes[J]. Advances in the Toxicity of Construction and Building Materials, 2022, 10: 225-240.

[7] 李青霄,张心会,徐开东,等.α石膏、β石膏、铁尾矿砂制备自流平砂浆及其性能研究[J].新型建筑材料,2022,49(9):149-153.

LI Q X, ZHANG X H, XU K D, et al. Study on self-leveling mortar prepared by α, β gypsums and iron tailings sand and its properties[J]. New Building materials, 2022, 49(9): 149-153.

[8] 吴照洋,张永兴,张利珍,等.β石膏相组成和杂质含量对其性能的影响[J].无机盐工业,2021,53(9):67-71.

WU Z Y, ZHANG Y X, ZHANG L Z, et al. Effect of phase composition and impurity content of β-gypsum on its properties[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2021, 53(9): 67-71.

[9] 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.

YANG M, QIAN J S, WANG Z, et al. Effect of impurities on the working performance of phosphogypsum[J]. Materials Reports, 2007(6): 104-106.

[10] 杨敏.杂质对不同相磷石膏性能的影响[D].重庆:重庆大学,2009.

YANG M. Effect of Impurities on the properties of phosphogypsum with different forms[D], Chongqing: Chongqing University, 2009.

[11] 张婧,孟醒,唐永波,等.磷石膏杂质处理及综合利用研究进展[J].磷肥与复肥,2021,36(9):25-28.

ZHANG J, MENG X, TANG Y B, et al. Research progress of phosphogypsum impurity treatment and comprehensive utilization[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2021, 36(9): 25-28.

[12] 黄照昊,罗康碧,李沪萍.磷石膏中杂质种类及除杂方法研究综述[J].硅酸盐通报,2016(5):1504-1508.

HANG Z H, LUO K B, LI H P. Types of impurity in phosphogypsum and the method of removing impurity research review[J]. Bulletin of The Chinese Ceramic Society, 2016(5): 1504-1508.

[13] 董铭,肖立华.磷石膏制备建筑石膏的试验研究[J].云南化工,2015,42(3):24-27.

DONG M, XIAO L H. Experimental study of producing gypsum

- powder with phosphogypsum[J]. Yunnan Chemical Technology, 2015, 42(3): 24-27.
- [14] 耿庆钰. 磷石膏制备硫酸钙晶须[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.  
GENG Q Y. Phosphorite preparation of calcium sulfate whiskers[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [15] 方竹堃. 磷石膏高效水洗净化处理技术[J]. 云南化工, 2023, 50(2): 114-116.  
FANG Z K. High Efficiency water washing purification technology of phosphogypsum[J]. Yunnan Chemical Technology, 2023, 50(2): 114-116.
- [16] 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(4): 19-25.  
ZHU Z W, HE D S, CHEN F. Research progress on pretreatment and comprehensive utilization of phosphogypsum[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019(4): 19-25.
- [17] 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, 22(3): 62-63.
- MA L Z, NING P, YANG Y H. Review on the technology of phosphogypsum pretreatment[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2007, 22(3): 62-63.
- [18] 沈维云, 郑光明, 孙梓林, 等. 磷石膏提纯增白试验研究[J]. 磷肥与复肥, 2022, 37(2): 5-6.  
SHEN W Y, ZHENG G M, SUN H L, et al. Experimental study on purification and whitening of phosphogypsum[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2022, 37(2): 5-6.
- [19] 杜明霞, 王进明, 董发勤, 等. 磷石膏工艺矿物学特征与可选性关系研究[J]. 非金属矿, 2020, 43(6): 52-55.  
DU M X, WANG J M, DONG F Q, et al. Technological mineralogical characteristics of phosphogypsum[J]. Non-Metallic Mines, 2020, 43(6): 52-55.
- [20] 卢烁十, 孙传尧. 几种硫酸盐矿物可浮性的晶体化学研究[J]. 金属矿山, 2008, 383(5): 49-52.  
LU S S, SUN C Y. Study on crystal chemistry of flotation ability of several sulfate minerals[J]. Metal Mine, 2008, 383(5): 49-52.

## Effect of Flotation Purification on Preparation of $\beta$ -Hemihydrate Gypsum from Phosphogypsum

WANG Jinming<sup>1,2,3,4,5</sup>, DU Mingxia<sup>1,4</sup>, LI Guohuan<sup>1,4</sup>, DONG Faqin<sup>1,4</sup>, TAN Hongbin<sup>1,4</sup>

1. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China;

2. State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing 100192, China;

3. State Key Laboratory of Solid Waste Reuse for Building Materials, Beijing 100041, China;

4. Key Laboratory of Solid Waste Treatment and Resource Recycle Ministry of Education, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China;

5. Sichuan Engineering Lab of Non-metallic Mineral Powder Modification & High-value Utilization, Mianyang 621010, sichuan, China

**Abstract:** Phosphogypsum produced by phosphorus chemical industry is the bulk industrial solid waste. The impurities would reduce the performance of  $\beta$ -hemihydrate gypsum that was prepared from phosphogypsum. In this study, phosphogypsum was purified by flotation method, and the performance of  $\beta$ -hemihydrate gypsum prepared from phosphogypsum before and after purification was compared. The results showed that the fine slime and organic impurities were removed by reverse flotation with methyl isobutyl methanol as foaming agent, and the dihydrate gypsum was floated by dodecamine. Compared with phosphogypsum ore, the whiteness and purity of the concentrate increased from 19.4% to 41.1% and 73.12% to 96.41%, respectively. The 2-hour flexural strength, compressive strength and 3-day dry compressive strength of  $\beta$ -gypsum that was prepared from phosphogypsum concentrate were 22.8%, 14.1% and 24.1% higher than those was prepared from raw ore, respectively. Whiteness increased from 27.8% to 46.3%. Flotation purification can significantly improve the performance of phosphogypsum in  $\beta$ -gypsum preparation.

**Keywords:** phosphogypsum; flotation; purification;  $\beta$  gypsum; strength

引用格式: 王进明, 杜明霞, 李国欢, 董发勤, 谭宏斌. 浮选净化对磷石膏制备 $\beta$ -半水石膏性能的影响[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(4): 107-113.

WANG Jinming, DU Mingxia, LI Guohuan, DONG Faqin, TAN Hongbin. Effect of flotation purification on preparation of  $\beta$ -hemihydrate gypsum from phosphogypsum[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(4): 107-113.