

# 高硅型有色金属尾矿资源清洁高效综合利用研究<sup>①</sup>

徐晓衣<sup>1,2,3</sup>, 孟庆波<sup>1,2,3</sup>, 李双棵<sup>1,2,3</sup>, 王洪岭<sup>1,2,3</sup>, 高玉德<sup>1,2,3</sup>

(1.稀有金属分离与综合利用国家重点实验室,广东 广州 510651; 2.广东省矿产资源开发及综合利用重点实验室,广东 广州 510651; 3.广东省科学院资源利用与稀土开发研究所,广东 广州 510651)

**摘要:**某高硅型有色金属尾矿主要矿物为石英、明矾石、地开石、绢云母和黄铁矿,石英粒度相对较粗,明矾石和地开石在较细粒级富集,明矾石与石英、地开石、绢云母呈浸染状复杂连生。针对该尾矿样品开展了明矾石和石英回收试验研究,采用“脱泥-脱硫-明矾石浮选”流程得到的明矾石精矿  $SO_3$  品位 20.14%,明矾石浮选尾矿反浮选回收石英,得到  $SiO_2$  品位 96.38%的石英精矿。该流程实现了有色金属尾矿的高效综合利用。

**关键词:** 固体废弃物; 尾矿; 综合利用; 明矾石; 石英

中图分类号: X751

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.04.015

文章编号: 0253-6099(2023)04-0069-04

## Efficient and Comprehensive Green-Utilization of High Siliceous Tailings Resources

XU Xiaoyi<sup>1,2,3</sup>, MENG Qingbo<sup>1,2,3</sup>, LI Shuangke<sup>1,2,3</sup>, WANG Hongling<sup>1,2,3</sup>, GAO Yude<sup>1,2,3</sup>

(1.State Key Laboratory of Separation and Comprehensive Utilization of Rare Metal, Guangzhou 510651, Guangdong, China; 2.Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Resources Development and Comprehensive Utilization, Guangzhou 510651, Guangdong, China; 3.Institute of Resources Utilization and Rare Earth Development, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510651, Guangdong, China)

**Abstract:** The predominant minerals in a kind of high siliceous non ferrous metal tailings include quartz, alunite, dickite, sericite and pyrite. The quartz has relatively coarser grain size, while alunite and dickite are enriched in a relatively finer fraction. Furthermore, alunite, quartz, dickite and sericite minerals are complicatedly disseminated. Herein, tests were conducted to reclaim alunite and quartz therefrom. An alunite concentrate with  $SO_3$  grade of 20.14% can be obtained by using a process consisting of desliming, desulfurization and alunite flotation. And then, the obtained alunite flotation tailings are subjected to a reverse flotation, yielding a quartz concentrate grading 96.38%  $SiO_2$ . It is shown that this flowsheet can actualize an efficient and comprehensive utilization of nonferrous metal tailings.

**Key words:** solid waste; tailings; comprehensive utilization; alunite; quartz

目前,我国正在大力推进生态文明建设,加快构建国内国际双循环新发展格局,“无废城市”建设试点工作已初具成效。在诸多相关政策的保障下,我国工业固体废物处理利用产业整体发展迅速,正在形成多途径、高附加值的综合利用发展新格局,矿产资源尾矿在工业固体废弃物排放量中约占 45%,尾矿堆存引起的安全及环保问题已成为困扰企业和社会的紧迫难题<sup>[1-5]</sup>。近年来,我国针对工业固体废物连续出台多项政策,严格规定工业固体废弃物的处置和管理。学者们

在尾矿资源化、高值化综合利用方面进行了许多研究,提出了加强源头治理、建设“无尾矿山”理念,该理念已成为社会各界共识<sup>[6]</sup>。

某大型有色金属矿山尾矿产生率约 95%,经过多年的采选,现堆存的尾矿渣上亿吨。随着国家对环保的重视程度越来越高,尾矿处理成为制约矿山企业发展的痛点<sup>[7-9]</sup>。如何利用好矿山尾矿、提高尾矿的综合利用水平,对缓解资源压力、实现环境治理、为矿山企业培育新的经济增长点具有深远意义。为了解决某高

① 收稿日期: 2023-02-16

作者简介: 徐晓衣(1990—),女,河北邯郸人,硕士,工程师,主要从事矿产资源综合利用研究。

通信作者: 孟庆波(1988—),男,河北秦皇岛人,博士,工程师,主要从事矿产资源综合利用研究。

硅型有色金属矿山尾矿带来的环境污染和资源浪费问题,本文对该尾矿进行了综合利用试验研究,通过综合利用尾矿中有价组分,联产多种高附加值产品来减少尾矿排放量,不仅减轻了矿山环保压力,同时获得一定的经济效益,对同类型矿山尾矿的综合利用具有参考价值。

### 1 尾矿性质

某尾矿化学成分分析结果如表1所示。尾矿样品中含SO<sub>3</sub> 5.34%、含SiO<sub>2</sub> 72.10%,属于高硅型尾矿。在此基础上,进行了硫物相分析,结果如表2所示。硫主要以硫酸盐和硫化物形式存在,硫酸盐矿物主要为明矾石。

表1 某尾矿化学成分分析结果(质量分数) %

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
11.85	72.10	0.92	0.22	0.079	1.49	0.21
TiO <sub>2</sub>	CoO	Pb	Cu	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	
0.14	0.058	0.013	0.046	0.04	5.34	

表2 硫物相分析结果

硫物相	硫含量/%	占有率/%
自然硫	<0.01	0.00
硫酸盐中的硫	2.14	59.94
硫化物中的硫	1.43	40.06
合计	3.57	100.00

采用筛分分析的方式对尾矿样品进行粒度组成分析,结果如表3所示。由表3可知,尾矿样品中-0.074 mm 粒级占比 48.69%、SO<sub>3</sub> 分布率 61.89%,细粒级中SO<sub>3</sub> 含量较高,明矾石在细粒级富集;粗粒级SiO<sub>2</sub> 含量较低,石英主要在粗粒级富集;-0.01 mm 粒级产率 16.21%,含泥量较高。

表3 粒度组成分析结果

粒级/mm	产率/%		品位/%		分布率/%	
	个别	负累计	SO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
+0.2	17.70	100.00	3.91	86.65	12.97	21.22
-0.2+0.1	24.31	82.30	3.86	83.95	17.57	28.24
-0.1+0.074	9.30	57.99	4.35	81.43	7.57	10.48
-0.074+0.043	9.92	48.69	6.29	63.34	11.69	8.69
-0.043+0.02	14.46	38.77	7.24	61.65	19.61	12.33
-0.02+0.01	8.10	24.31	7.48	60.95	11.33	6.83
-0.01	16.21	16.21	6.34	54.43	19.26	12.21
合计	100.00		5.34	72.28	100.00	100.00

采用 MLA 矿物自动分析检测仪器分析了该尾矿样品主要矿物组成,结果如表4所示。该尾矿样品中

主要矿物为石英(约占总矿物量 65%)、明矾石、地开石和绢云母;硫化物以黄铁矿为主,少量黄铜矿、辉铜矿、斑铜矿和硫砷铜矿等。电子显微镜下观察,明矾石与石英、地开石、绢云母呈浸染状复杂连生。

表4 主要矿物组成分析结果(质量分数) %

明矾石	地开石	石英	黄铁矿	黄铜矿	辉铜矿	斑铜矿	硫砷铜矿	绢云母
13.044	14.050	64.895	1.778	0.009	0.010	0.005	0.005	5.003
褐铁矿	钠长石	钾长石	绿泥石	氯黄晶	金红石	水铝石	磷铝钙石	其他
0.319	0.030	0.048	0.049	0.090	0.148	0.095	0.107	0.325

### 2 原则流程

由尾矿性质可知,样品中可供回收的主要矿物为明矾石和石英。确定原则流程为先选明矾石、再选石英。原则流程见图1。

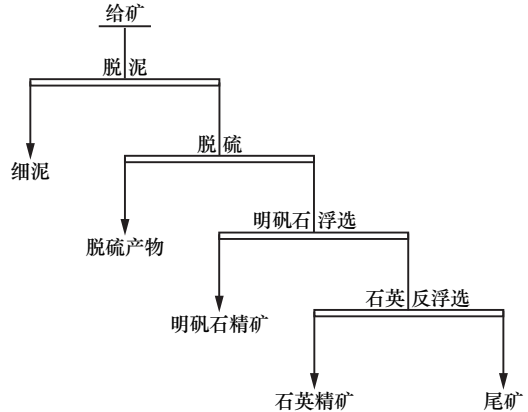


图1 尾矿综合利用原则流程

### 3 试验结果与讨论

#### 3.1 明矾石浮选

回收明矾石的浮选试验流程见图2。

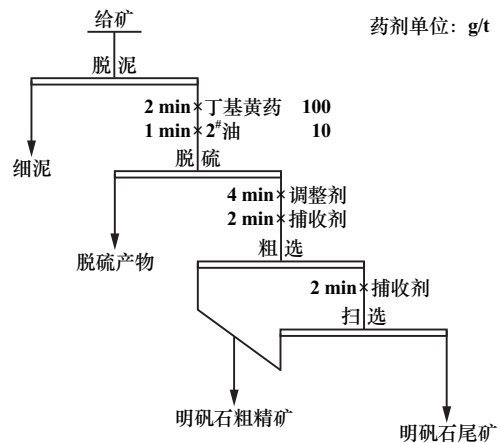


图2 明矾石浮选试验流程

3.1.1 脱泥试验

采用沉降脱泥,在调整剂碳酸钠用量 3 000 g/t,捕收剂 GL 粗选用量 200 g/t、扫选用量 100 g/t 条件下,按图 2 所示流程进行了脱泥试验,结果见表 5。由表 5 可知,经脱泥、脱硫,可获得 SO<sub>3</sub> 品位较高的明矾石粗精矿,且脱泥浮选稳定性好。

表 5 脱泥试验结果

产品名称	产率/%	SO <sub>3</sub> 品位/%	SO <sub>3</sub> 回收率/%
细泥	9.57	6.13	10.97
脱硫产物	4.13	4.82	3.72
明矾石粗精矿	27.07	11.64	58.93
明矾石尾矿	59.23	2.38	26.37
给矿	100.00	5.35	100.00

3.1.2 调整剂用量试验

氧化矿浮选时矿浆 pH 值对浮选效果影响较大。按照图 2 所示流程,固定捕收剂 GL 粗选用量 200 g/t、扫选用量 100 g/t,采用碳酸钠作为 pH 值调整剂,考察了碳酸钠用量对明矾石浮选的影响,结果见图 3。矿浆本身偏酸性,随着碳酸钠用量增加,矿浆碱性增强,有利于提高捕收剂捕收性能。由图 3 可知,随着碳酸钠用量增加,尾矿中 SO<sub>3</sub> 含量有降低趋势。综合考虑产品指标与药剂成本,碳酸钠用量选用 2 000 g/t,此时尾矿 SO<sub>3</sub> 含量为 2.21%。

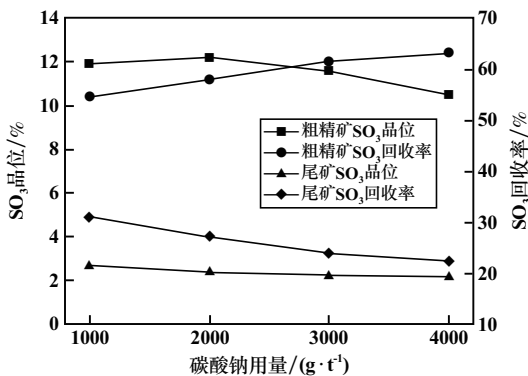


图 3 碳酸钠用量试验结果

3.1.3 捕收剂种类及用量试验

碳酸钠调浆后,多采用脂肪酸皂类作为捕收剂进行明矾石浮选。固定碳酸钠用量 2 000 g/t,捕收剂粗、扫选用量分别为 200、100 g/t,选用油酸钠、GL 和 ZL 作为捕收剂,考察了捕收剂种类的影响,结果见图 4。其中捕收剂 GL 为自主研发的皂化脂肪酸类捕收剂。由图 4 可知,3 种捕收剂均有良好的选别效果,尾矿中 SO<sub>3</sub> 含量小于 3.0%,其中捕收剂 GL 所得尾矿 SO<sub>3</sub> 含量最低。试验中发现,使用 GL 作捕收剂时浮选泡沫

量明显少于其他 2 种捕收剂,且泡沫黏性相对较低、易碎,利于中矿循环操作,故选用 GL 作为捕收剂。

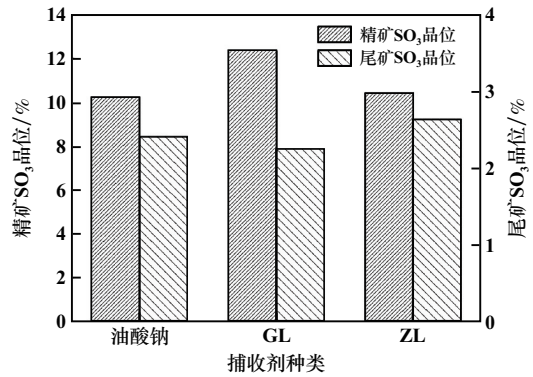


图 4 捕收剂种类试验结果

相同条件下,对捕收剂 GL 用量进行了试验,结果如图 5 所示。随着捕收剂 GL 用量增加,明矾石精矿产率和 SO<sub>3</sub> 回收率增加,尾矿产率和 SO<sub>3</sub> 含量呈降低趋势;捕收剂 GL 用量 300 g/t 时,尾矿中 SO<sub>3</sub> 含量为 2.01%,产品指标较好;之后继续增加捕收剂用量,产品指标变化较小,且泡沫明显增多。捕收剂 GL 用量选用 300 g/t。

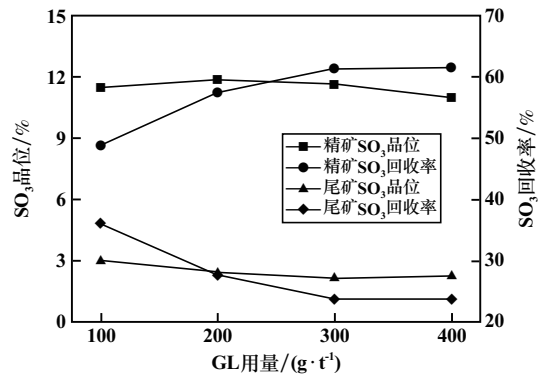


图 5 GL 用量试验结果

3.1.4 明矾石浮选闭路试验

在条件试验和开路试验基础上,进行了闭路试验研究,以确定适宜的药剂制度,同时验证流程结构的稳定性。随着中矿循环次数增加,捕收剂用量逐步减少,GL 用量减少至 150+50 g/t 后,矿浆循环趋于平衡。试验流程见图 6,结果见表 6。由表 6 可知,闭路试验可获得产率 15.36%、SO<sub>3</sub> 品位 20.14% 的明矾石精矿,尾矿中 SO<sub>3</sub> 含量为 2.15%、SiO<sub>2</sub> 含量为 84.89%。

3.2 石英反浮选

明矾石尾矿中 SiO<sub>2</sub> 含量为 84.89%,粒度 0.1~0.2 mm,是优质的石英砂原料。在酸性环境下,使用自主研发的 GX-1(脂肪酸类捕收剂)和 GX-8(胺类捕收剂)反浮选石英<sup>[10]</sup>,试验流程见图 7,结果见表 7。由表 7 可知,

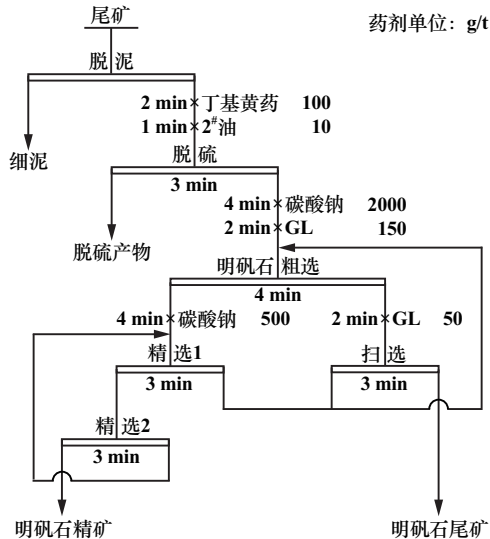


图6 明矾石浮选闭路试验流程

表6 明矾石浮选闭路试验结果

产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
		SO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
细泥	9.33	5.51	47.53	9.62	6.12
脱硫产物	4.69	4.63	37.28	4.06	2.41
明矾石精矿	15.36	20.14	41.18	57.90	8.73
明矾石尾矿	70.62	2.15	84.89	28.42	82.74
给矿	100.00	5.34	72.46	100.00	100.00

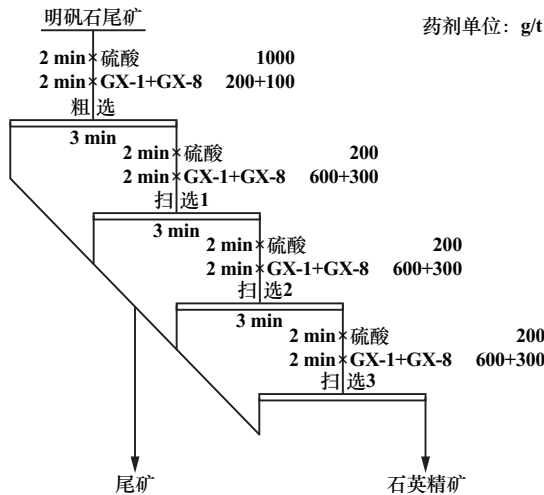


图7 石英反浮选试验流程

表7 石英反浮选试验结果

产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
		SO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
石英精矿	80.86	0.81	96.38	30.33	92.29
尾矿	19.14	7.86	34.03	69.67	7.71
给矿(明矾石尾矿)	100.00	2.16	84.45	100.00	100.00

明矾石尾矿反浮选回收石英,可获得作业产率80.86%、SiO<sub>2</sub>品位96.38%的石英砂精矿。

### 3.3 产品质量检测

对产品明矾石和石英进行了质量检测,结果见表8。由表8可知,明矾石精矿SO<sub>3</sub>品位20.14%,达到HG/T 3577—1989《明矾石矿石》一级品标准;石英精矿SiO<sub>2</sub>品位96.38%、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量0.15%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量2.13%,达到JC/T 529—2000《平板玻璃硅质原料》要求。

表8 明矾石、石英产品检测结果

产品名称	品位/%								
	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
明矾石	20.14	27.62	41.18	1.93	0.45	0.22	5.30	0.51	0.19
石英精矿	0.75	2.13	96.38	0.15	0.04	0.01	0.16	0.01	0.06

## 4 结论

1) 某有色金属尾矿中SO<sub>3</sub>品位5.34%、SiO<sub>2</sub>品位72.10%,主要矿物为石英、明矾石、地开石、绢云母和黄铁矿,石英粒度相对较粗,明矾石和地开石有在较细粒级富集趋势,明矾石与石英、地开石、绢云母呈浸染状复杂连生,属于高硅型有色金属尾矿。

2) 该高硅型有色金属尾矿经“脱泥-脱硫-明矾石浮选”一粗一扫二精闭路流程,可获得SO<sub>3</sub>品位20.14%的明矾石精矿;明矾石浮选尾矿反浮选得到SiO<sub>2</sub>品位96.38%、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量0.15%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量2.13%的石英精矿。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国固体废物污染环境防治法[EB/OL]. [https://www.gov.cn/xinwen/2020-04-30/content\\_5507561.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2020-04-30/content_5507561.htm).
- [2] 宁力兴. 基于新《固废法》的生态环境损害鉴定评估之思考[J]. 环境保护, 2021, 49(24): 56-59.
- [3] 敖顺福. 有色金属矿山尾矿综合利用进展[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(3): 94-103.
- [4] 蔚美娇, 孔祥云, 黄劲松, 等. 我国尾矿固废处置现状及建议[J]. 化工矿物与加工, 2022, 51(1): 34-38.
- [5] 易龙生, 米宏成, 吴倩, 等. 中国尾矿资源综合利用现状[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(3): 79-84.
- [6] 杜艳强, 段文峰, 赵艳. 金属尾矿处置及资源化利用技术研究[J]. 中国矿业, 2021, 30(8): 57-61.
- [7] 刘呈祥. 有色金属矿山尾矿综合利用进展[J]. 世界有色金属, 2022(1): 152-154.
- [8] 胡松. 紫金铜尾矿中明矾石综合利用技术研究[D]. 福州: 福州大学石油化工学院, 2016.
- [9] 罗增鑫. 紫金山铜硫浮选尾矿中明矾石和石英的回收技术研究[D]. 赣州: 江西理工大学资源与环境工程学院, 2013.
- [10] 魏鹏刚, 任浏祎, 邱航, 等. 阳离子捕收剂对石英分粒级浮选行为的影响[J]. 矿冶工程, 2018, 38(6): 64-67.

引用本文: 徐晓衣, 孟庆波, 李双棵, 等. 高硅型有色金属尾矿资源清洁高效综合利用研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(4): 69-72.