

某金矿浮选尾矿综合利用试验研究

赵福财,王 苹

(山东国环固废创新科技中心有限公司)

摘要:为实现矿山经济绿色、可持续发展,以环境效益为前提,本着资源化效益优先、经济效益最大化原则,对某金矿浮选尾矿进行资源综合利用研究。通过分粒级资源利用—充填工艺路线, +0.15 mm 粒级制备建筑砂原料, -0.15 ~ +0.038 mm 粒级通过磁选除杂制备陶瓷原料(辅料), -0.038 mm 细泥及磁性尾矿作为骨料进行井下充填,尾矿综合利用率达 100 %,创造了良好经济效益,实现了无尾矿山和矿山绿色可持续发展。

关键词:金矿尾矿;无尾矿山;梯度利用;尾矿综合利用;细尾充填

中图分类号:TD926.4

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2024)04-0048-04

doi:10.11792/hj20240411

引 言

随着矿产资源的不断开发利用,巨量尾矿随之产生。尾矿堆存不仅污染环境、浪费大量土地资源,且存在着严重的安全隐患,直接制约了矿山的经济效益和可持续发展^[1-3]。尾矿主要由各种脉石矿物,如石英、长石、辉石和角闪石等组成,主要化学成分为铁、硅和铝等元素的氧化物和硅酸盐^[4-6]。近年来,国内外学者对尾矿综合利用的技术方案进行了诸多研究,主要研究方向有尾矿有价元素回收、制备建筑材料、作充填骨料、复垦造田等^[7-9],但均未得到广泛应用。随着国家对环境保护的日益重视,砂石骨料等资源的开采利用受到了制约,尾矿大宗利用成为现实,利用尾矿制备建筑材料、陶瓷原料等方案成为切实可行的尾矿综合利用方案^[10-11]。

以山东某金矿浮选尾矿为原料,结合市场需求,进行尾矿梯度利用,研究粗粒级尾矿作建筑砂、中粒级尾矿作陶瓷原料、余尾作充填骨料的技术路线,并进行产业化应用,尾矿利用率达 100 %,实现无尾矿山。

1 试验原料

试验原料为山东某金矿浮选尾矿,选矿厂尾矿产量约 950 t/d,原工艺尾矿经旋流器组分级,沉砂作为井下充填骨料,旋流器溢流输送至尾矿库储存,尾矿未充分进行资源化利用,综合利用率仅 40 %。对尾矿性质进行分析,化学成分分析结果见表 1,矿物相对含量分析结果见表 2。

表 1 尾矿化学成分分析结果

Table 1 Analysis results of tailings chemical composition

成分	K ₂ O	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	CaO
w/%	7.21	1.68	13.11	65.19	1.81	2.49
成分	P ₂ O ₅	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	ZnO	
w/%	0.02	0.34	3.52	0.14	0.02	

表 2 矿物相对含量分析结果

Table 2 Analysis results of relative content of minerals

矿物名称	相对含量/%	矿物名称	相对含量/%
石英	32.26	石榴石	1.35
钾长石	28.86	黑云母	0.93
斜长石	16.55	方解石	0.62
绢云母	7.28	绿帘石	0.58
铁白云石	4.86	符山石	0.22
辉石	1.72	灰硅钙石	0.16
白云石	1.34	金红石	0.45
绿泥石	1.14	磷灰石	0.18
闪石	1.43	楣石	0.07

由表 1 可知,尾矿主要成分为硅、铝,含 Na₂O 1.68 %、含 K₂O 7.21 %。经前期对陶瓷原料市场的调研及分析,尾矿获得的长石产品含 Fe₂O₃ 小于 0.5 %,含 K₂O + Na₂O 5 % 左右,且其他物化指标满足市场需求,即可作为陶瓷原料(辅料)。因此,可通过分选建筑砂原料和陶瓷原料的方式资源化利用。

2 试验结果与讨论

经过前期探索试验及市场调研,确定脱泥—粗

粒级制备建筑砂原料—中粒级制备陶瓷原料(辅料)—余尾井下充填的工艺路线。利用旋流器脱除-0.038 mm 粒级细泥,旋流器沉砂经高频振动筛筛分,筛上+0.15 mm 粒级作为建筑砂原料,筛下物料经磁选或浮选工艺分选陶瓷原料(辅料),细泥及选别陶瓷原料尾矿进行井下充填。

2.1 +0.15 mm 粒级分析

将尾矿进行筛分,+0.15 mm 粒级烘干混匀后作为试验样品,开展化学成分分析,分析结果见表 3、表 4。

表 3 +0.15 mm 粒级化学成分分析结果
Table 3 Analysis results of chemical composition
of +0.15 mm particle size

成分	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
w/%	2.09	1.81	11.63	68.50	0.35	7.47	3.02	3.00

由表 3、表 4 可知:+0.15 mm 粒级中硫化物、硫酸盐、氯化物含量,以及含泥量均低于建筑用砂Ⅲ类标准,完全符合周边地区建筑砂原料市场对尾矿制备建筑用砂的质量等级要求。

表 5 磁选试验结果
Table 5 Test results of magnetic separation

方案	作业产率(非磁性)/%	w/%							白度/%
		Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	
0.6 T	71.30	1.21	0.13	7.21	1.66	11.27	72.68	2.24	28.6
0.6 T→1.0 T	60.48	0.33	0.06	7.84	2.23	11.21	76.76	1.25	45.7
0.6 T→1.0 T→1.4 T	31.75	0.15	0.04	7.88	2.31	12.62	70.82	1.86	55.6

由表 5 可知:随着磁场强度的变化,非磁性产品中 Fe₂O₃ 含量明显降低,白度明显提高。经 0.6 T→1.0 T 磁选工艺和 0.6 T→1.0 T→1.4 T 磁选工艺,均可获得含 Fe₂O₃ 0.33 % 以下、白度 45.7 % 以上的非磁性产品,满足目前市场对陶瓷原料(辅料)的产品质量等级要求(含 Fe₂O₃ 0.5 % 以下、白度 40 % 以上)。

2.2.2 浮选除铁

尾矿中影响选矿产品白度的矿物主要为铁白云石、辉石、黑云母,以及磁铁矿、黄铁矿、钛铁矿等铁氧化物。以碳酸钠为分散剂,进行浮选除铁试验,试验流程为一次粗选一次扫选,尾矿作为陶瓷原料(辅料)产品。通过碳酸钠用量、捕收剂种类、捕收剂用量等条件探索试验,确定碳酸钠用量为 200 g/t,捕收剂 ZJ02 用量为 800 g/t,起泡剂 2 号油用量为 50 g/t,试验结果见表 6。

由表 6 可知,浮选方案可获得作业产率 40.51 %,含 Fe₂O₃ 0.26 %、K₂O + Na₂O 10.10 % 的陶瓷原料(辅料)产品,满足市场对陶瓷原料(辅料)产品质量

表 4 +0.15 mm 粒级有害物质及物理性能分析结果
Table 4 Analysis results of +0.15 mm particle size hazardous
matter and its physical properties

指标	数值
表观密度/(kg·m ⁻³)	2 460
松散堆积密度/(kg·m ⁻³)	1 356
孔隙率/%	44.88
含泥(石粉)量/%	0.05
含云母量(按质量计)/%	1.85
含硫化物及硫酸盐量(按 SO ₃ 质量计)/%	0.04
含氯化物量(按氯离子质量计)/%	0.02
放射性物质	—

2.2 -0.15 ~ +0.038 mm 粒级分析

经过前期市场调研,含 Fe₂O₃ 0.5 % 以下,含 K₂O + Na₂O 5 % 左右的长石产品即可作为陶瓷原料(辅料)。根据尾矿化学成分分析结果可知,Fe₂O₃ 含量超标。为降低产品中铁含量,提高白度,分别开展磁选、浮选除铁试验研究,以确定最佳的选别工艺。

2.2.1 磁选除铁

对 -0.15 ~ +0.038 mm 粒级尾矿进行磁选试验,试验结果见表 5。

表 6 浮选试验结果
Table 6 Test results of flotation

产物	作业产率/%	w(Fe ₂ O ₃)/%	w(K ₂ O)/%	w(Na ₂ O)/%
含铁脉石	59.49	4.65	7.34	2.00
除铁精矿	40.51	0.26	7.78	2.32
浮选原矿	100.00	2.87	7.52	2.13

等级要求(含 Fe₂O₃ 0.5 % 以下,含 K₂O + Na₂O 5 % 左右)。

2.2.3 方案对比

对可获得合格陶瓷原料产品的 3 种不同方案进行对比,对比结果见表 7。

针对 -0.15 ~ +0.038 mm 粒级尾矿,浮选产品 K₂O + Na₂O 含量略优于两段磁选产品指标;磁选工艺相对浮选工艺更具优势,工艺流程简单,操作管理方便,生产运行成本低,且基建工程量小,建设周期短,工程投资少,能够获得更高的尾矿利用率。综合市场需求及尾矿利用率,最终确定该粒级尾矿采用二

表 7 方案对比结果
Table 7 Comparison of each scheme

	方案	产品作业产率/%	总产率/%	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$	$w(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\%$	白度/%
磁选	0.6 T→1.0 T	60.48	30.80	0.33	10.07	45.7
	0.6 T→1.0 T→1.4 T	31.75	16.17	0.15	10.19	55.6
	浮选	40.51	20.63	0.26	10.10	54.8

级磁选工艺方案进行陶瓷原料(辅料)选别,陶瓷原料(辅料)产品作业产率 60.48 %,尾矿总产率为 30.80 %。

2.3 余 尾

余尾指在经过分选粗粒级建筑砂和陶瓷原料(辅料)后的剩余尾矿,包含磁性尾矿和 -0.038 mm 粒级细泥,该部分尾矿目前无法再回收有价产品,一般作为井下充填骨料。

2.3.1 灰砂比

灰砂比是影响充填体抗压强度和充填成本的主要因素之一,砂浆在砂浆浓度 70 % 以下可以较好地自流输送,大于此浓度时自流输送较难实现。分别在砂浆浓度 55 %、60 %、65 % 条件下,开展不同灰砂比试验,试验结果见图 1。

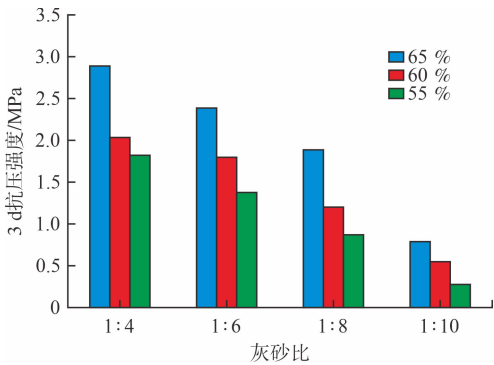


图 1 灰砂比试验结果

Fig. 1 Test results of cement-sand ratio

由图 1 可知:在砂浆浓度相同条件下,提高灰砂比能够有效提高充填体 3 d 抗压强度;在灰砂比相同条件下,充填体 3 d 抗压强度随砂浆浓度的提高而增加。在灰砂比 1:8 时,砂浆浓度为 60 % 及 65 % 条件下均可满足充填体 3 d 抗压强度 ≥ 1.0 MPa,且砂浆流动性满足充填要求。综合考虑强度、流动性及充填成本,选择灰砂比 1:8。

2.3.2 砂浆浓度

在灰砂比 1:8 条件下,开展不同砂浆浓度试验,考察不同龄期充填体抗压强度,试验结果见图 2。

由图 2 可知:充填体抗压强度随砂浆浓度的提高而增加,流动性随之减弱。在砂浆浓度为 60 % 时,充填体 3 d 抗压强度达到 1.2 MPa,可满足充填要求。

2.4 推荐流程

结合企业实际情况和市场需求,研究确定尾矿综

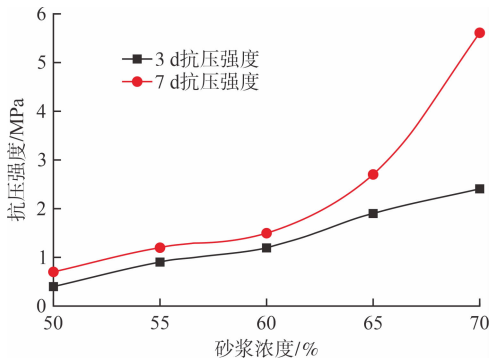


图 2 砂浆浓度试验结果

Fig. 2 Test results of pulp concentration

合利用推荐流程,见图 3。推荐流程产品产率见表 6。

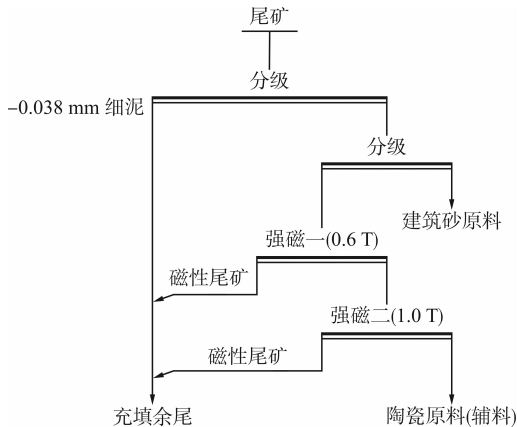


图 3 尾矿综合利用推荐流程

Fig. 3 Recommended tailings comprehensive utilization flow chart

表 8 尾矿综合利用推荐流程产品产率

Table 8 Product yield of recommended tailings comprehensive utilization flow chart

产物	产率/%
建筑砂原料	25.89
陶瓷原料(辅料)	30.80
-0.038 mm 细泥	23.18
充填余尾 磁性尾矿	20.13

该工艺可产出建筑砂原料 25.89 %,陶瓷原料(辅料)30.80 %,充填余尾 43.31 %。根据现场选矿生产规模、矿石密度、充填体容重等计算,现场井下采空区可容纳 50 % 左右的尾矿,该工艺可实现尾矿综合利用率 100 %。

3 结 论

1)该浮选尾矿主要成分为硅、铝,含 Na₂O 1.68 %、K₂O 7.21 % ,可通过分选建筑砂原料和陶瓷原料(辅料)方式进行资源化利用。

2)经试验研究及市场调研,确定分粒级资源利用—充填工艺路线,+0.15 mm 粒级制备建筑砂原料,-0.15 ~ +0.038 mm 粒级通过磁选除杂制备陶瓷原料(辅料),-0.038 mm 细泥及磁性尾矿作为骨料进行井下充填。

3)该工艺合理利用尾矿资源,可获得建筑砂原料 25.89 % ,陶瓷原料(辅料)30.80 % ,充填余尾 43.31 % ,尾矿综合利用率达 100 % ,经济和社会效益显著。

[参 考 文 献]

[1] 王雪峰,朱欣然,李为,等. 全国矿产资源节约与综合利用报告(2018)[M]. 北京:地质出版社,2018:21-23.

[2] 迟崇哲,翟菊彬,兰馨辉,等. 黄金尾矿综合利用分析[J]. 黄金,

2022,43(2):100-103.

[3] 杨希亭. 招远黄金尾矿资源综合利用项目风险管理研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2016.

[4] 常亮. 用铁尾矿和镁尾矿制备 M₂S 隔热砖的工艺研究[D]. 鞍山:辽宁科技大学,2008.

[5] 高腾跃,李光胜,朱幸福,等. 黄金浮选尾矿中长石综合利用研究[J]. 中国资源综合利用,2022,40(4):1-4.

[6] 孟跃辉,倪文. 张玉燕. 我国尾矿综合利用发展现状及前景[J]. 中国矿山工程,2010,39(5):4-9.

[7] 张宝丽. 某黄金矿山尾矿综合利用研究[J]. 有色金属(选矿部分),2000(1):41-42,22.

[8] 陈益民. 尾矿综合利用现状和存在的问题[J]. 有色冶金设计与研究,2018,39(6):123-125

[9] 孟文文,李鹏. 黄金行业尾矿处置政策与综合利用实践[J]. 黄金科学技术,2023,31(6):1 023-1 034.

[10] 苏俊基. 利用黄金尾矿研制陶瓷艺术釉料的研究[D]. 福州:福州大学,2014.

[11] 李杨. 黄金尾矿分选制备陶瓷原料的工艺及综合利用研究[D]. 淄博:山东理工大学,2018.

Experimental study on comprehensive utilization technology of flotation tailings in a gold mine

Zhao Fucai, Wang Ping

(Shandong Guohuan Solid Waste Innovation Science and Technology Center Co., Ltd.)

Abstract: In order to achieve sustainable and green development of the mining economy, based on the principle of environmental benefits, prioritizing resource utilization benefits, and maximizing economic benefits, a comprehensive utilization study of tailings resources was conducted on the flotation tailings in a gold mine in Shandong. By using a particle size resource utilization - filling process route, +0.15 mm particle size was used to prepare building sand raw materials, -0.15 - +0.038 mm particle size was used to prepare ceramic raw materials (auxiliary materials) through magnetic separation for impurity removal, and -0.038 mm fine particle size and magnetic tailings were used as aggregates for underground filling. The comprehensive utilization rate of tailings reached 100 %, creating economic benefits and achieving green and sustainable development of mines and tailings-free mines.

Keywords: gold tailings; tailings-free mine; gradient utilization; comprehensive utilization of tailings; tailings filling; sustainable development