

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.07.011

基于冀东金厂峪金矿尾矿综合利用的矿物特征

王锦^{1,2}, 李德先^{1*}, 李胜荣², 张长青¹, 刘冠男¹, 李小赛¹

WANG Jin^{1,2}, LI Dexian^{1*}, LI Shengrong², ZHANG Changqing¹, LIU Guannan¹, LI Xiaosai¹

1. 中国地质科学院矿产资源研究所/自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

1. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment/Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

摘要:金属尾矿具有污染环境和资源再利用的双重特点。从综合利用的角度,对冀东金厂峪金矿尾矿化学成分、矿物组成,以及矿物粒度、解离度等进行了测试分析,以寻求适合该尾矿综合利用的途径。分析结果表明:金厂峪金矿尾矿属低铁高铝高硅尾矿;矿物组成以石英和长石为主,含少量的白云石、云母、方铅矿等矿物;尾矿粒度以细砂为主;尾矿中石英含量大于 30%,与其他矿物连生关系简单。综合利用建议:①制备高纯度二氧化硅;②制备生产烧结砖等建筑材料;③制备微晶玻璃、釉面材料等高附加值产品;④制备环保材料、土壤改良剂、矿物肥料等产品;⑤作为井下充填材料。

关键词:金尾矿;烧结砖;微晶玻璃;综合利用;河北金厂峪;矿产勘查工程

中图分类号:P618.51 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)07-1249-09

Wang J, Li D X, Li S R, Zhang C Q, Liu G N, Li X S. Study on mineral characteristics based on comprehensive utilization of tailings in the Jinchangyu gold ore deposit in Eastern Hebei Province. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(7): 1249-1257

Abstract: Metal tailings have the dual characteristics of environmental pollution and resource reuse. From the view of comprehensive utilization, we analyzed chemical compositions, mineral compositions, and mineral particle sizes, and dissociation degrees of the tailings in the Jinchangyu gold ore deposit, Eastern Hebei in order to find a suitable way for the comprehensive utilization of the tailings. The results show: The tailings of the Jinchangyu gold ore deposit are low iron, high aluminum, and high silicon tailings; The main mineral compositions are quartz and feldspar, with a small amount of dolomite, mica, and galena, etc; Fine sands predominate in the particle sizes of tailings; The content of quartz in the tailings is more than 30%, which has a simple symbiotic relationship with other minerals. Suggestions for the comprehensive utilization: ①Preparation of high purity silica; ②Preparation and production of building materials such as sintered bricks; ③Preparation of high value-added products, such as glass-ceramics and glaze materials; ④Preparations of environmental protection materials, soil improvers, and mineral fertilizers, etc; ⑤Underground filling materials.

Key words: gold tailings; sintered bricks; glass-ceramics; comprehensive utilization; Jinchangyu, Hebei Province; mineral exploration engineering

随着中国经济的快速发展,对黄金的需求量持续上涨,金矿的生产量和规模也在不断扩大,同时产生的金矿尾矿量也在急剧增加。据统计,全国黄

金矿山每年产生尾矿 1.3×10^8 t,堆存量年增加 1×10^8 t 以上,全国范围内堆存的黄金尾矿已达 13×10^8 t^[1]。2018 年,全国黄金尾矿排放量约为 2.16×10^8

收稿日期:2021-08-10;修订日期:2021-11-27

资助项目:中国地质调查局项目《津冀重要矿产资源集中区资源综合利用与评价》(编号:DD20190182)和《大兴安岭中南段有色金属基地综合地质调查》(编号:DD20190815)

作者简介:王锦(1997-),男,在读博士生,从事环境与生命矿物学研究。E-mail:295806693@qq.com

* 通信作者:李德先(1969-),女,博士,正高级工程师,从事矿山环境与稀散元素研究。E-mail:dexianli2005@126.com

t,综合利用率仅为 36.9%,其中采用充填采矿法对黄金尾矿的利用率约为 26%(全年折合利用黄金尾矿总量约 5616×10^4 t)^[2],剩余的 1.36×10^8 t 黄金尾矿主要采取尾矿库堆存的方式处置。这不仅占用大量的土地,还容易产生扬尘和尾矿液的渗漏,对周边环境造成污染,而且尾矿库的修筑和维护成本昂贵,还可能导致溃坝等地质灾害的发生。国家应急管理部门发布《防范化解尾矿库安全风险工作方案》,要求自 2020 年起,在保证紧缺和战略性矿产矿山正常建设开发的前提下,全国尾矿库数量原则上只减不增^[3]。因此,现有尾矿库的尾矿需及时腾退以延长尾矿库使用年限。开展尾矿综合利用是实现尾矿的无害化、减量化和资源化的重要途径。

金厂峪金矿开采历史悠久,唐、清两代就已有开采^[4],尾矿堆存量巨大,仅正在使用的申家峪尾矿库尾矿堆存量就达 755×10^4 m³。本次研究从综合利用的角度,对金厂峪金矿尾矿的矿物组成、化学成分、矿物粒度、解离度等进行了测试分析,为该矿山的尾矿综合开发利用提供了理论依据。

1 研究区概况

金厂峪金矿位于河北省迁西县东北 35 km 处,隶属中国黄金总公司,是冀东地区规模较大的金矿

床之一。金厂峪金矿属于石英复脉型金矿,矿石矿物以黄铁矿为主,其次为自然金、银金矿、金银矿、磁铁矿、磁黄铁矿、辉钼矿、闪锌矿、黄铜矿、斑铜矿、方铅矿、碲金矿、辉银矿,整个金属矿物约占矿石的 10%^[5]。脉石矿物以石英、钠长石为主,其次为绢云母、绿泥石、绿帘石、铬云母及碳酸盐类矿物(白云石为主,方解石次之),次生矿物以褐铁矿、孔雀石为主。采用浮选工艺,氰化法提金。根据实地调研,金厂峪矿山对周边地表水和土壤未造成环境污染。

金厂峪金矿有 2 个尾矿库(图 1),一个是已闭库复垦的老尾矿库,另一个是正在使用的申家峪尾矿库。2 个尾矿库均三面环山,属山谷型尾矿库。

老尾矿库于 1966 年投入使用^[4],到 1980 年排满闭坑时已排放尾矿 85×10^4 m³。闭坑后的尾矿库由于未及时复垦,一度给周边环境造成了扬尘等自然灾害。20 世纪 80 年代末,矿山对老尾矿坝进行了植被恢复,播种牧草沙打旺,一定程度上减少了风沙的环境污染,但由于尾砂的有机物含量少,植被生长缓慢,污染问题没有从根本上得到解决。1990 年,金厂峪矿山和村民联合开展尾矿库复垦,经筑路、平整库面、客土造田、植被治理后,0.08 km² 的库面全部变为耕地,同时也解决了水土流失、风



图 1 金厂峪金矿申家峪尾矿库(a)和已复垦的老尾矿库(b)全景图(2019 年 4 月拍摄)

Fig. 1 The Panorama of Shenjiayu tailings ponds(a) and reclaimed old tailings ponds(b) in the Jinchangyu gold ore deposit (taken in April, 2019)

沙污染等问题。鉴于老尾矿库已复垦多年,本次不对该尾矿库尾矿进行综合利用评价,因尾矿库经过 30~50 cm 的客土造田,因此仅采集 50 cm 以下的尾矿样品进行对比研究。

申家峪尾矿库于 1980 年投入运行^①,设计总库容为 $650 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。2012 年尾矿库扩容,总库容约 $1369 \times 10^4 \text{ m}^3$,有效库容为 $1027 \times 10^4 \text{ m}^3$,为二等尾矿库。尾矿产率 96.09%,尾矿比重 1.40 t/m^3 ,年排放尾矿量 $18.53 \times 10^4 \text{ m}^3$,目前堆存尾矿约 $755 \times 10^4 \text{ m}^3$,剩余库容 $272 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。尾矿处置措施以尾矿库堆存为主,目前未开展相关的综合利用工作。

近年,国内在金矿尾矿资源化利用方面取得了一些重要进展^[6-8]。一方面表现为尾矿中有用组分的回收,包括回收尾矿中残余的金和伴生的 Ag、Cu、Pb、Zn、W 等金属元素^[9-12],以及提取尾矿中的石英、长石、绢云母等非金属矿物^[13-15]。另一方面在固废资源综合利用方面也取得了重要进展,特别是在金尾矿建材的高值化应用研究方面,除开展金尾矿制备砖^[16-18]、水泥制品^[19]等传统建材的研究外,还加强了微晶玻璃^[20]、泡沫陶瓷^[21]、轻质陶粒^[22-23]等高附加值、性能优异、节能环保的绿色建材的研发。从而做到节约资源,减少废弃物数量,降低产品成本,达到高值化利用的目标,实现了金尾矿资源的综合利用。

2 样品采集及测试

本次采集了正在使用的申家峪尾矿库尾矿样品,和已闭坑复垦的老尾矿库尾矿剖面样品,以全面了解金厂峪金矿尾矿矿物的具体特征。申家峪尾矿样品采自尾矿排放口附近,该处样品分布较均匀且具有代表性,共采集 3 个不同时间段排放的尾矿样品(依据尾矿的干湿程度判断),每个样品由方圆 50 m 的 5 个样品均匀混合而成。老尾矿库因已复垦,覆土 30~50 cm,故采集 50 cm 以下的样品作为老尾矿样品,50 cm 以下按照 10 cm 间隔采集,最深采至 100 cm,共采集样品 5 件。采集的样品自然风干后,用木质小锤轻轻敲碎,并挑出混入的大砾石及植物碎片。将处理后的尾矿样品装入布袋中,送实验室进行测试分析。

尾矿样品除进行主量、微量元素化学分析外,还利用捷克生产的泰思肯集成矿物分析仪(TIMA)对申家峪尾矿库尾矿的矿物特征进行了详细的测

定分析。TIMA 矿物分析仪采用扫描电镜的岩矿自动定量分析系统,可对岩矿样品进行矿物组成、化学成分、矿物嵌布特征、粒级分布、解离度、矿物连生关系等重要参数的自动定量分析,是尾矿综合利用分析的理想仪器。

3 分析结果

3.1 化学成分特征

3.1.1 主量元素

尾矿主量元素含量是综合利用需要考虑的重要指标。从金厂峪金矿尾矿的主量元素化学分析结果可以看出(表 1),2 个尾矿库的尾矿样品化学成分差异不大,各主量元素含量的标准偏差和变异系数均较小,说明尾矿的物质含量分布较均匀。尾矿中 SiO_2 含量较高,在 60.28%~64.21% 之间,平均 62.47%; Al_2O_3 含量亦较高,在 8.14%~12.20% 之间,平均 9.96%; $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量在 3.49%~5.03%,平均 4.14%; TFe 含量较低,平均 5.05%,且以 FeO 为主(平均 4.68%),其他氧化物含量较低。金厂峪尾矿总体表现为高硅高铝低铁、钾钠适中的特点。

老尾矿库尾矿剖面的数据表明,尾矿中主量元素含量随采样深度没有明显的变化,说明尾矿的来源稳定,围岩类型和矿物组成相似,对主要元素含量影响不大。

3.1.2 微量元素

金厂峪金矿尾矿的成分复杂,含有多种元素。从综合利用的角度,包括主矿种 Au 及主要伴生元素 Ag,对环境可能造成影响的 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As 等元素,以及土壤养分元素 N、P、K、Zn、Cu、S 等。

(1) 主矿种元素及伴生元素

由于采选技术不断提高,不同时期尾矿中的主矿种含量有所差异。从 2 个尾矿库尾矿中的主矿种 Au 及伴生的 Ag 元素含量分析数据看(表 2),2 种元素含量的变异系数较高,分布不均匀。尾矿中 Ag 元素含量均较低。Au 含量在老尾矿中(平均含量 0.31 g/t,最高达 0.41 g/t)普遍高于申家峪尾矿(平均含量仅 0.12 g/t),这主要是由于早年的选矿技术和装备水平较低的缘故,但均未达到 Au 的边界品位。其他伴生元素 Cu、Pb、Ni 等含量极低,均不具备再回收利用价值。

表 1 金厂峪金尾矿主量元素化学分析结果

Table 1 The chemical analysis data of major elements in the Jinchangyu gold tailings

		采样深度 /cm	%									
尾矿库名称	样品编号		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O	TFe	Fe ₂ O ₃	FeO
申家峪 尾矿库	JCY-WK1	0~20	60.28	11.21	6.28	3.05	3.36	0.362	1.32	4.31	1.69	4.01
	JCY-WKK-1	0~20	63.47	12.20	4.90	2.38	3.71	0.247	1.32	3.69	1.67	3.24
	JCY-WKK-2	0~20	61.57	10.78	6.02	2.94	3.33	0.340	1.23	4.45	1.61	4.27
老尾 矿库	JCY-LWK-2	50~60	62.97	10.47	5.43	2.99	2.60	0.310	1.59	5.58	2.50	4.91
	JCY-LWK-3	60~70	61.79	9.06	6.65	3.47	2.12	0.259	1.53	5.74	2.37	5.25
	JCY-LWK-4	70~80	62.96	8.38	6.62	3.19	2.06	0.262	1.43	5.49	2.24	5.04
	JCY-LWK-5	80~90	62.50	9.44	6.14	3.01	2.27	0.314	1.68	5.39	2.13	5.02
	JCY-LWK-6	90~100	64.21	8.14	5.89	3.09	2.19	0.261	1.37	5.72	1.86	5.69
	平均值		62.47	9.96	5.99	3.02	2.71	0.29	1.43	5.05	2.01	4.68
	最大值		64.21	12.20	6.65	3.47	3.71	0.36	1.68	5.74	2.50	5.69
	最小值		60.28	8.14	4.90	2.38	2.06	0.25	1.23	3.69	1.61	3.24
	标准偏差		1.23	1.43	0.59	0.31	0.66	0.04	0.15	0.78	0.35	0.79
	变异系数		0.02	0.14	0.10	0.10	0.24	0.15	0.10	0.15	0.17	0.17

表 2 金厂峪金尾矿微量元素化学分析结果

Table 2 The chemical analysis data of trace elements in the Jinchangyu gold tailings

		取样深度/cm	10 ⁻⁶									
尾矿库名称	送样编号		pH	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Ni	Au	Ag
申家峪尾矿库	JCY-WK1	0~20	9.36	0.368	0.008	2.20	17.04	149.8	14.89	35.50	0.14	0.08
	JCY-WKK-1	0~20	9.36	0.301	0.006	6.45	15.74	114.2	16.11	31.18	0.09	0.15
	JCY-WKK-2	0~20	9.39	0.345	0.010	2.37	18.48	134.8	19.26	36.84	0.12	0.07
老尾 矿库	JCY-LWK-2	50~60	9.13	0.318	0.014	3.99	20.07	113.5	28.04	43.47	0.30	0.08
	JCY-LWK-3	60~70	9.24	0.402	0.011	5.69	24.17	120.8	29.66	48.09	0.41	0.11
	JCY-LWK-4	70~80	9.27	0.366	0.009	4.68	23.11	106.9	28.63	42.71	0.32	0.09
	JCY-LWK-5	80~90	9.04	0.471	0.009	5.78	22.77	110.3	24.00	40.13	0.30	0.10
	JCY-LWK-6	90~100	9.11	1.984	0.009	16.97	57.89	106.1	30.06	38.60	0.30	0.12
平均值			9.24	0.569	0.010	6.02	24.91	119.55	23.83	39.57	0.25	0.10
最大值			9.39	1.984	0.014	16.97	57.89	149.80	30.06	48.09	0.41	0.15
最小值			9.04	0.301	0.006	2.20	15.74	106.10	14.89	31.18	0.09	0.07
标准偏差			0.13	0.574	0.002	4.69	13.66	15.31	6.26	5.26	0.11	0.03
变异系数			0.01	1.008	0.245	0.78	0.55	0.13	0.26	0.13	0.46	0.26
建设Ⅰ类用地风险筛选值 ^①				20	8	20	400	—	2000	150		
建设Ⅱ类用地风险筛选值 ^①				65	38	60	800	—	18000	900		
农用地其他土壤风险筛选值 ^②				0.6	3.4	25	170	250	100	190		

注:①《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600—2018);②《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)

(2) 环境元素

尾矿中重金属等元素对环境的影响是综合利用必须考虑的重要因素。如果存在重金属污染,则需先开展环境污染治理,或在综合利用过程中将污染元素进行稳定化处理,以防造成二次污染。依据中华人民共和国国家标准《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准》(GB36600—2018)和《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)的相关标准,对金厂峪尾矿进行了环境风险评价和环境质量评价,以确定尾矿是否适合直接开展综合利用工作。

金厂峪尾矿 pH 值均大于 9,呈碱性。尾矿中的 Cu、Pb、As、Hg、Cr、Ni 等环境元素含量均低于土壤环境质量建设用土壤污染风险筛选值,亦低于土壤环境质量标准中农用地风险筛选值(表 2);但 Cd 元素在老尾矿剖面底部的含量虽未超过土壤环境质量建设用土壤污染风险筛选值,但超过了农用地土壤风险筛选值。说明金厂峪尾矿库用于建设用时无环境风险,但老尾矿用于农用地时,特别是种植直接入口的农作物时还需进行质量监测。

从老尾矿库尾矿剖面含量变化看(图 2),Cd、As、Pb、Cu 元素随着采样深度的增加其含量均呈增加的趋势,特别是在剖面底部含量剧增,表现出重金属有向深部迁移的趋势。但整体看,对周边环境不会造成影响。

(3) 土壤养分元素

尾矿的粒度较细,所含元素和矿物组成与土壤具有相似性,因尾矿中含有一定量的土壤养分元素,可作为尾矿制备土壤改良剂、矿物肥料等的一

个重要参考指标。

金厂峪尾矿中 P、K、CaO、MgO、Zn 元素含量变异系数较小(表 3),含量较均匀,而 N、Fe₂O₃、Cu、S 元素含量变异系数较大,含量差别较大,在老尾矿中含量较高,但随采样深度的变化并不明显。

依据中华人民共和国地质矿产行业标准《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016),尾矿中的 P 元素含量均大于 0.1%,达到土壤一等(丰富);N 元素含量均小于 0.075%,属于五等(缺乏);K 元素含量集中在 1.0%~1.5%,属于四等(较缺乏)。

CaO 和 MgO 含量基本处于一等(丰富)和二等(较丰富)之间,而 Fe₂O₃ 含量均低于 3.4%,为五等(缺乏)。Cu 和 Zn 元素在 2 个尾矿库尾矿中差别较大,老尾矿库中的含量普遍高于申家峪尾矿库,在老尾矿中处于二等(较丰富),而在申家峪尾矿中处于四等(较缺乏)至五等(缺乏)。S 元素则与 CaO 和 MgO 相反,在申家峪尾矿中的含量高于老尾矿,大部分处于三等(中等),而老尾矿中则为五等(缺乏)。

总体上,金厂峪金矿尾矿中 P、CaO、MgO 元素含量普遍较丰富,而 N、K、Fe₂O₃、S 等含量普遍缺乏或较缺乏,老尾矿中 Zn、Cu 含量较丰富,而在申家峪尾矿库尾矿中含量较缺乏。根据尾矿土壤养分含量,通过一定的调配或适当的技术可制备土壤改良剂或矿物肥料等。

3.2 矿物成分特征

将申家峪尾矿库的 3 个尾矿样品进行充分混合,得到申家峪尾矿的混合样,利用 TIMA 矿物分析仪对尾矿的矿物特征进行测定。

3.2.1 矿物组成

申家峪尾矿库尾矿的矿物组成分析表明,尾矿的矿物种类繁多,由 40 余种矿物组成,主要矿物为石英(31.65%)和长石(31.99%),二者占矿物总量的 63.64%(图 3),长石绝大多数为斜长石(31.24%);其次为白云石(14.47%)、云母(8.8%,主要为铁锂云母 7.08%)、方铅矿(4.16%)、赤铁矿(1.61%)和绿泥石(1.53%);其他矿物指含量低于 1%的矿物,主要为钙铝榴石、方解石、阳起石、高岭石、磷灰石等。

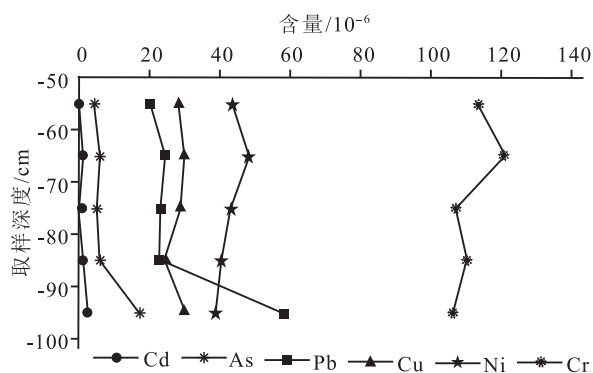


图 2 金厂峪老尾矿库尾矿中重金属元素含量剖面分布图

Fig. 2 The profile distribution map of heavy metal element contents in the tailings of the Jinchangyu old tailings pond

表 3 金厂峪金尾矿土壤养分元素化学分析结果

Table 3 The chemical analysis data of soil nutrient elements in the Jinchangyu gold tailings

尾矿库 名称	送样编号	取样深度 /cm	含量/%						含量/(mg·kg ⁻¹)		
			N	P	K	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Zn	Cu	S
申家峪 尾矿库	JCY-WK1	0~20	0.022	0.158	1.095	6.28	3.05	1.69	62.88	14.89	227.8
	JCY-WKK-1	0~20	0.017	0.108	1.095	4.90	2.38	1.67	56.71	16.11	171.3
	JCY-WKK-2	0~20	0.004	0.149	1.021	6.02	2.94	1.61	62.59	19.26	229.4
	JCY-LWK-2	50~60	0.019	0.135	1.319	5.43	2.99	2.50	77.72	28.04	125.0
老尾矿库	JCY-LWK-3	60~70	0.019	0.113	1.27	6.65	3.47	2.37	81.73	29.66	170.7
	JCY-LWK-4	70~80	0.022	0.114	1.187	6.62	3.19	2.24	76.27	28.63	146.1
	JCY-LWK-5	80~90	0.022	0.137	1.394	6.14	3.01	2.13	76.95	24.00	128.7
	JCY-LWK-6	90~100	0.023	0.114	1.137	5.89	3.09	1.86	81.08	30.06	163.5
平均值			0.019	0.129	1.190	5.99	3.02	2.01	71.99	23.83	170.31
最大值			0.023	0.158	1.394	6.65	3.47	2.50	81.73	30.06	229.40
最小值			0.004	0.108	1.021	4.90	2.38	1.61	56.71	14.89	125.00
标准偏差			0.006	0.019	0.128	0.59	0.31	0.35	9.70	6.26	40.03
变异系数			0.336	0.147	0.107	0.10	0.10	0.17	0.13	0.26	0.24
土壤养分 指标 ^①	一等(丰富)		0.2	0.1	2.5	5.54	2.15	5.3	84	29	343
	二等(较丰富)		0.15~0.2	0.08~0.1	2.0~2.5	2.68~5.54	1.7~2.15	4.6~5.3	71~84	24~29	270~343
	三等(中等)		0.1~0.15	0.06~0.06	1.5~2.0	1.16~2.68	1.2~1.7	4.15~4.6	62~71	21~24	219~270
	四等(较缺乏)		0.075~0.1	0.04~0.06	1.0~1.5	0.42~1.16	0.7~1.2	3.4~4.15	50~62	16~21	172~218
	五等(缺乏)		0.075	0.04	1.0	0.42	0.7	3.4	50	16	172
	上限值								200	50	2000

3.2.2 粒度分析

粒度分析表明(图4),申家峪尾矿库尾矿粒度集中在100~250 μm,粒度分布符合正态分布。依

据自然粒级标准粒度划分规则对不同粒级的含量进行统计(表4),可以看出,尾矿中石英的粒度分布与尾矿总体粒度分布相似,均以50~250 μm的细砂粒级为主,占比约75%,其次为250~500 μm的中砂

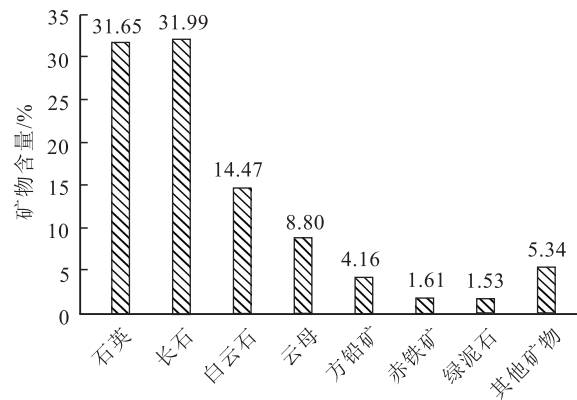


图 3 申家峪尾矿库尾矿主要矿物相分布图

Fig. 3 The distribution of major mineral phases of the tailings in the Shenjiayu tailings pond

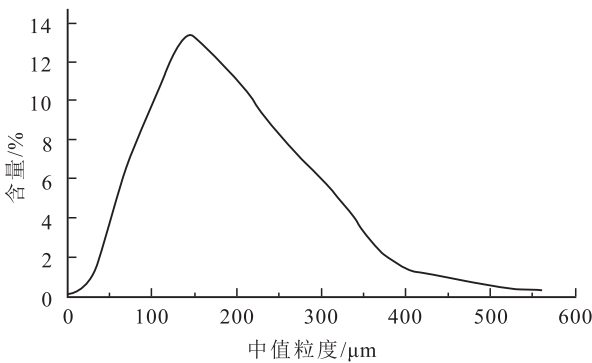


图 4 申家峪尾矿库尾矿粒度分布图

Fig. 4 The tailings particle size distribution in the Shenjiayu tailings pond

表 4 申家峪尾矿库尾矿和石英粒度分布

Table 4 The distribution of tailings and quartz particle sizes in the Shenjiayu gold tailing pond

类型	体积百分比/%						质地名称
	>2000 μm	2000~500 μm	500~250 μm	250~50 μm	50~5 μm	<5 μm	
	砾	粗砂	中砂	细砂	粉砂	泥	
尾矿	0	0.24	16.04	75.49	8.03	0.42	砂土
石英	0	0.43	17.34	75.12	7.04	0.13	

(16%~17%), 以及 5~50 μm 的粉砂(7%~8%)。尾矿质地为以细砂为主的砂土,对周边环境易造成沙尘、扬尘等危害。

3.2.3 矿物(石英)解离度

从金厂峪金尾矿中的主要矿物石英与其他矿物的连生关系可以看出(图 5),石英单体颗粒占 10.27%,大部分与方铅矿共生(57.09%),二者占石英总体积的 67.86%,其次为斜长石(12.23%)、正长石(3.38%)、白云石(7.08%)、阳起石(4.23%)、黑云母(1.04%),还有极少量的赤铁矿、高岭石、绿泥石等含量小于 1%的矿物共(伴)生。整体看,石英与其他矿物的连生关系较简单。

石英的再分选或再提取与石英的解离度有很大关系。从 TIMA 矿物分析仪对石英解离度的数据分析图(图 6)看,按照体积比,解离度大于 90%的石英占 18.46%,解离度大于 50%的石英占 27.42%;按石英颗粒数,解离度大于 90%的颗粒占 10.77%,解离度大于 50%的颗粒占 13.33%。这说明,解离度高的石英颗粒集中在粒度较大的颗粒中,并且石英与其他矿物的共生关系较简单,为石英的再分选提

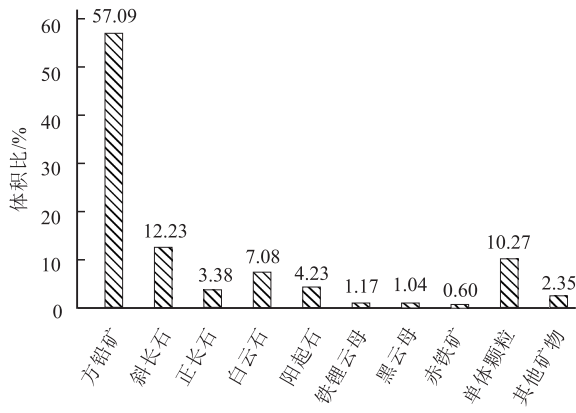


图 5 申家峪尾矿库尾矿中石英与其他矿物的连生关系
Fig. 5 The associated relationship between quartz and other minerals of the tailings in the Shenjiayu tailing pond

供了一定的可操作性。

4 综合利用途径分析

金厂峪尾矿中 Cu、Pb、As、Hg、Cr、Cd 等元素含量均在环境风险可控范围。金厂峪金矿采用氰化法提金,由于尾矿排放一层层摊铺至整个尾矿库表面,在阳光和氧气的作用下,尾矿中氰化物的自然降解能够完成^[24],在实地调研中也未发现氰化物污染周边环境的问题。因此,笔者认为,金厂峪金矿尾矿无环境安全隐患,可直接开展综合利用。根据金厂峪尾矿的化学成分和矿物组成特征,对尾矿综合利用具体途径分析如下。

(1) 有价值组分的提取

金厂峪尾矿中的石英含量大于 30%,单体颗粒大于 10%,石英与其他矿物的连生关系较简单,易再次进行分选提纯。苗星等^[25]对河北宽城某金尾矿中的 SiO_2 进行了提纯,针对该尾矿 SiO_2 含量(68.64%)较高、石英含量较低的特点,采用预先沉降脱泥-强磁选除铁-反浮选除铁- SiO_2 浮选的提纯工艺,使得 SiO_2 含量升高至 98.46%, Al_2O_3 含量降低至 0.65%, Fe_2O_3 含量降低至 0.09%,符合国家级玻璃原料二级质量标准的高纯度二氧化硅。目前该纯度的二氧化硅市场价格为 20~25 元/kg。该提纯工艺简单,金厂峪金尾矿与该尾矿组成相似,借鉴此方法开展金厂峪金尾矿二氧化硅的提纯,不但可以消纳一定量的尾矿,还可以取得一定的经济效益。

(2) 制备建筑材料等传统大宗建材

金厂峪尾矿中金属矿物含量稀少,脉石矿物较纯净,可作为重要的非金属原料或建筑材料直接利用^[26]。金厂峪金矿属于含石英复脉型金矿,硅、铝含量较高,铁、硫含量较低,可作为铸造型砂、玻璃原料或冶金溶剂。金厂峪尾矿的化学组成完全符合制砖工业对原料的组成要求(SiO_2 含量 50%~80%, Al_2O_3 含量 3%~25%,CaO 含量小于 15%,

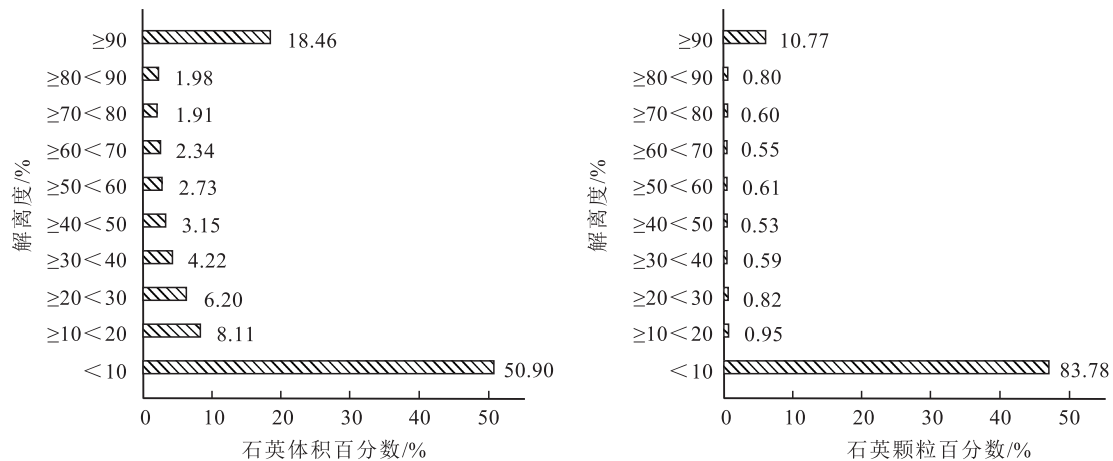


图6 申家峪尾矿库尾矿中石英的解离度

Fig. 6 The dissociation degree of quartz in the tailings in the Shenjiayu tailing ponds

MgO 小于 5%, SO₃ 小于 3%), 可以不添加其他硅酸盐配料直接生产烧结砖、蒸养砖、双免砖等各种建筑用砖^[17]。这些大宗产品用途广泛, 消耗量巨大, 是消纳尾矿量的一个重要途径。另外, 还要综合考虑运输成本、销售半径等因素, 以达到经济可行。金厂峪金矿位于河北省迁西县, 紧邻北京、天津、唐山、秦皇岛、承德等大城市, 交通便利, 利用金尾矿生产建筑材料, 支持周边城市建设, 既可以消纳尾矿量, 也可以创造一定的经济价值。

(3) 制备高附加值产品

制备高附加值产品是实现黄金尾矿资源化的重要举措^[8]。根据金厂峪尾矿的化学组成, 通过合理的配料, 可以制备微晶玻璃^[20]、泡沫陶瓷^[27]、釉面材料^[21]等附加值较高的产品, 达到尾矿高值化利用的目标。

(4) 制备土壤改良剂或矿物肥料

金厂峪尾矿中 P、Ca、Mg 等土壤营养组分充足, 并含有一定的 Cu、Fe、Zn、Mo、S 等营养元素, 经过一系列的处理, 可将尾矿制成矿物肥料, 进而改善土壤结构, 提高土壤肥力^[28]。利用尾矿所含成分与土壤有害物质发生反应, 阻止土壤中的有害物质迁移, 从而有效修复被污染的土壤, 实现以废治废。

天然矿物肥效释放缓慢而持久^[29], 在补充作物与土壤养分的同时, 自身矿物晶格能起到天然地下物质仓库的作用。在养分多余时将养分纳入晶格储存, 在养分不足时主动释放养分, 因此不会导致

尾矿中 Cu、Fe、Zn 等重金属超标, 是目前提倡使用的一种绿色肥料。

(5) 用作井下充填材料

金矿多采用井下开采, 采用充填法的矿山每开采 1 t 矿石需回填 0.25~0.4 m³ 或更多的充填料^[26]。金厂峪金矿尾矿中 SiO₂、Al₂O₃ 含量较高, 是一种惰性材料, 同时含有一定的 CaO、MgO、Na₂O、K₂O 等成分, 有利于胶结充填, 可作为井下充填材料^[30-31]。虽然井下充填不会产生经济效益, 但在消纳尾矿量方面是一个重要手段, 按照全国金尾矿充填利用率 26% 计算, 井下充填消纳的尾矿量也是相当可观的。

5 综合利用建议

综合以上分析, 关于金厂峪金尾矿的综合利用, 建议: 提取高纯度二氧化硅; 制备大宗建筑材料, 特别是烧结砖; 生产微晶玻璃、泡沫陶瓷等高附加值产品; 制备土壤改良剂、环保材料等; 用作井下充填材料。

总之, 合理的尾矿综合利用能带来客观的经济效益和良好的社会效益。建议企业采取多种手段相结合的方法, 运用市场机制和政策条件, 最大限度地实现尾矿的无害化、减量化和资源化, 从而获得最大限度的经济效益和社会效益。

致谢: 审稿专家提出了宝贵意见, 在此表示感谢。

参考文献

[1] 冯安生, 许大纯, 吕振福. 中国矿山开发利用水平调查报告——黄

- 金矿山[M].北京:冶金工业出版社,2019:21-27.
- [2] 王海军,王伊杰,李文超,等.全国矿产资源节约与综合利用报告[M].北京:地质出版社,2019:15-50.
- [3] 佚名.应急管理部发布《防范化解尾矿库安全风险工作方案》[J].江西建材,2020,(4):1-3.
- [4] 崔光华.金厂峪金矿尾矿库复垦实践[J].河北冶金,1993,(4):8-9.
- [5] 赵福平,张明旭,温小亚,等.河北金厂峪金矿床地质特征及成因分析[J].现代矿业,2011,(5):34-37.
- [6] 陈兰兰,卢东方,王毓华.黄金矿山尾矿的组成,危害及资源化利用技术[J].矿产保护与利用,2020,40(5):165-173.
- [7] 李杨,孟凡涛,王鹏.黄金尾矿综合利用的研究进展[J].山东理工大学学报(自然科学版),2019,33(1):44-48.
- [8] 孙旭东,刘晓敏,龚裕,等.黄金尾矿建材化利用的研究现状及展望[J].金属矿山,2020,(3):12-22.
- [9] 李日升,翟旭东,冯玉怀,等.从某金尾矿中浮选回收金[J].金属矿山,2017,(7):190-192.
- [10] 杜芳芳.某金矿尾矿综合回收金钨试验研究[J].矿山机械,2018,(5):51-55.
- [11] 李礼,谢超,冯一鸣.金尾矿综合利用技术研究与应用进展[J].资源与环境,2012,28(9):816-819.
- [12] 赵楠,吕宪俊,梁志强.黄金矿山尾矿综合回收技术进展[J].黄金,2015,36(3):71-74.
- [13] 李彩霞,王国良,闫善文,等.某金尾矿中石英砂浮选精制试验研究[J].非金属矿,2019,42(6):65-67.
- [14] 魏转花,赖伟强,黄思捷.某金尾矿综合回收长石试验研究[J].非金属矿,2014,37(2):69-71.
- [15] 罗利群,张晓雪,林永锋,等.江西金尾矿资源的性质与绢云母提取研究[J].矿产综合利用,2021,(3):1-8.
- [16] 权宗刚,张云宁,傅光明,等.焙烧工艺参数对淤泥烧砖性能的影响研究[J].砖瓦,2021,(5):16-18.
- [17] 崔瑞,冯海强,张舰,等.河南灵宝金尾矿制砖的试验研究[J].矿业研究与开发,2019,39(2):116-121.
- [18] 张剑民,张金辉,高飞.金矿尾矿渣的综合利用研究[J].四川建材,2018,44(11):30-37.
- [19] 郭家林,王之宇.金尾矿发泡水泥制备及性能研究[J].矿产综合利用,2017,(2):5-8.
- [20] 陈维铅,高淑雅,董亚琼,等.烧结法制备金矿尾砂 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 微晶玻璃及其性能研究[J].硅酸盐学报,2014,42(1):95-100.
- [21] 黄菲,刘睿,俞浩然,等.矽卡岩型金尾矿制作工艺陶瓷坯体材料的研究[J].东北大学学报(自然科学版),2014,35(11):1626-2630.
- [22] 赵威,王竹,黄惠宁,等.金尾矿基轻质高强陶粒的制备及性能研究[J].人工晶体学报,2018,47(6):1266-1271.
- [23] 段美学,闫传霖,赵蔚琳.金尾矿焙烧陶粒的制备[J].砖瓦,2014,(7):52-55.
- [24] 王莹,降向正,刘晓红,等.某金矿尾矿渣中氰化物的分布及自然降解试验[J].黄金,2017,38(12):58-60.
- [25] 苗星,李素芹,孔加维,等.强磁-浮选从金尾矿中提取 SiO_2 试验研究[J].金属矿山,2018,(10):184-188.
- [26] 王伟之,张锦瑞,邹汾生.黄金矿山尾矿的综合利用[J].黄金,2004,25(7):43-45.
- [27] 赵英良,赵英良,邢军,等.黄金尾矿资源化利用研究现状与进展[J].有色金属(矿山部分),2016,68(3):1-4.
- [28] 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,(3):7984.
- [29] 兰成云,舒锐,姚甜甜,等.矿物肥料在中国农业生产上的应用现状[J].2016,44(35):143-146.
- [30] 赵英良,邢军,刘辉,等.蚕庄金矿尾矿碱熔活化制备充填胶凝材料[J].有色金属工程,2017,7(6):80-85.
- [31] 刘春琦,温军锁,宋士生,等.金厂峪金矿充填尾砂基本性能试验研究[J].黄金,2014,(7):41-44.
- ①河北金厂峪矿业有限责任公司.河北金厂峪矿业有限责任公司金厂峪金矿矿山地质环境保护与土地复垦方案.2018.