

铜渣直接还原-磨选二次尾矿利用方式研究

丁银贵^{1,2}, 薛逊¹, 倪文², 曹志成^{1,2}, 刘占华¹, 阎爱云²

(1. 神雾科技集团股份有限公司, 北京 102200; 2. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要: 金川神雾公司的铜渣转底炉直接还原-磨选生产线顺利投产, 每处理1 t铜渣将会产生0.5 t左右的二次尾矿, 需要进行综合利用。本文对铜渣二次尾矿的物理化学性质进行了分析, 二次尾矿中主要是以透辉石和石英为主, 其余为无定形相, 且粒度较细-0.074 mm 91.70%。分析了铜渣二次尾矿的利用方式, 包括生产胶凝材料、墙体材料、陶粒和用于农业生产的可行性。对一条年产30万m³蒸压加气混凝土砌块生产线进行经济效果评价, 项目总投资约为6,445.43万元, 年消耗尾矿92,400 t, 年均净利润2,146.85万元, 投资收益率41.04%, 投资回收期3.07年, 项目是可行的。

关键词: 铜渣; 二次尾矿; 利用方式; 经济性分析

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2019.03.030

中图分类号: X757 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2019) 03-0133-08

铜渣是火法冶炼时造钨熔炼和冰铜吹炼过程中的产物, 按照冶炼设备不同可以分为反射炉渣、转炉渣、闪速熔炼渣等; 按照冷却方式不同可分为水淬渣、自然冷却渣、缓冷渣等; 根据生产工艺流

程可分为熔炼渣、吹炼渣等。现在主要铜冶炼企业对热态铜冶炼炉渣的处理方式是“缓冷-细磨-浮选”工艺回收铜, 对铁不进行回收, 浮选后的尾渣, 也可简称为铜渣, 金川公司铜渣化学成分见表1。

表1 铜渣的化学成分/%
Table 1 Chemical composition

TFe	FeO	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Zn	Pb	Cu
41.55	41.82	1.85	1.81	33.00	3.15	0.36	0.12	2.23	0.62	0.22

从表1可以看出, 铜渣中铁含量超过40%, SiO₂含量为33%, 同时还含有锌、铅和铜等有价值元素, 因此具有较高的综合利用价值。铜渣中主要成分是铁橄榄石(2FeO·SiO₂)、磁铁矿(Fe₃O₄)及脉石组成的无定形玻璃体。铁橄榄石在选矿领域属于不可回收铁, 属于极难还原的矿物, 回收难度较大^[1-4]。目前, 铜渣以堆存为主, 这样不仅占用了土地资源, 对周边环境产生不利影响, 而且渣中所含的铁、铜、铅、锌等金属元素没有得到较好的回收处理, 也造成了资源的浪费。

采用转底炉直接还原-破碎磁选工艺对铜渣进行处理以达到回收铁的目的, 具体工艺流程见图1。

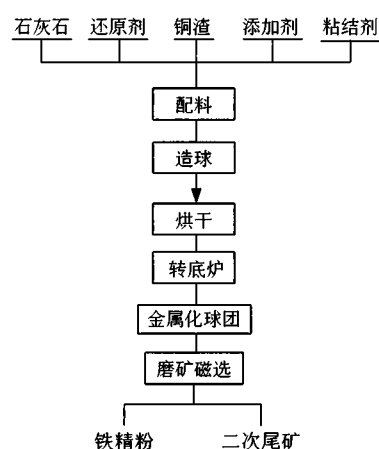


图1 铜渣转底炉直接还原-磨矿磁选处理工艺流程
Fig.1 Technological process of direct reduction- magnetic separation of ore grinding of the bottom furnace copper slag

收稿日期: 2018-03-13

作者简介: 丁银贵(1981-), 男, 工程师, 在站博士后, 主要从事冶金固体废弃物资源综合利用工作。

通讯作者: 倪文(1961-), 男, 博士生导师。E-mail: niwen@ces.ustb.edu.cn

2016 年 12 月 29 日, 甘肃金川神雾公司弃渣综合利用项目一期工程铜渣综合利用项目顺利投产, 项目采用“转底炉直接还原-磨矿磁选”工艺, 年处理铜尾渣 80 万 t, 年产还原铁粉 27.6 万 t、氧化锌粉 3.4 万 t、蒸汽 44.9 万 t^[5-7]。作为国内首条铜尾渣综合利用生产线, 其不仅有利于金昌地区的经济发展和环境改善, 也为我国有色行业实施冶炼渣减量化、资源化、无害化提供了宝贵经验, 对我国循环经济的发展具有重大的复制和推广价值。

在金川神雾公司一期项目生产过程中, 每处

理 1 吨铜渣会产生 0.5 t 以上的二次尾矿, 每年将产生二次尾矿超过 40 万 t, 需要进行综合利用。如果方式不合理, 会污染的环境, 造成资源的浪费, 甚至影响整个项目的预期效果。

1 铜渣二次尾矿的特性

1.1 化学成分分析

本文以转底炉直接还原-磨矿磁选处理铜渣后产生的二次尾矿为研究对象, 其主要化学成分见表 2。

表 2 铜渣二次尾矿的化学成分 /%

Table 2 Chemical composition of copper slag secondary tailings

TFe	FeO	Cu	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	S	P	Pb	Zn
10.51	8.65	0.01	10.22	3.95	64.12	5.57	0.25	0.012	痕	痕

从表 2 可看出, 铜渣二次尾矿中的 SiO₂ 含量高达 64.12%, 含有 10.22% 的 CaO 和 10.51% 的铁元素。因此, 可以得出铜渣二次尾矿主要是以 SiO₂ 和硅酸盐以及少量有用金属元素组成。

1.2 物理性质分析

铜渣二次尾矿是一种灰黑色细粉末, 其 XRD 分析图谱表明, 尾矿中的结晶相主要由透辉石 (CaMgSi₂O₆) 和鳞石英 (SiO₂) 组成, 其余部分为无定形的玻璃体。

铜渣二次尾矿的粒度分析见表 3。从表 3 可以看出, -0.074 mm 91.70%, -0.045 mm 79.84%, 铜渣二次尾矿粒度较细。

表 3 二次尾矿的粒度分析 /%

Table 3 Particle size analysis of secondary tailings

编号	+0.074 mm	-0.074 mm +0.045 mm	-0.045 mm
1	9.01	12.58	78.41
2	4.73	10.63	84.64
3	2.86	8.75	88.39
4	16.60	15.47	67.93
平均	8.30	11.86	79.84

2 铜渣二次尾矿利用方式

2.1 二次尾矿利用现状

金川神雾公司铜渣综合利用项目每年将产生约 40 万 t 二次尾矿, 目前没有进行深加工处理, 直接卖给金昌水泥集团有限责任公司, 价格仅为 15 元/t。因此, 铜渣二次尾矿高价值利用问题亟待解决。

铜渣二次尾矿主要是 SiO₂ 和硅酸盐, 其余部分是非晶态的玻璃体, 可以通过借鉴现有的成熟工艺生产一种或若干种建筑材料, 因此具备高价值应用的潜在特性。从金昌地区实际出发, 结合市场和前期可借鉴的基础, 对铜渣二次尾矿高价值应用开展研究。由于铜渣二次尾矿物理和化学性质与铁尾矿相似^[8-9], 所以可以借鉴铁尾矿的利用方式。目前, 国内外尾矿综合利用的主要途径包括^[10-14]: 制备胶凝材料、陶粒、新型墙体材料和用于农业领域等方式。

2.2 用于胶凝材料生产

胶凝材料是指通过自身的物理化学作用, 由可塑性浆体变为坚硬石状体的过程中, 能将散粒或块状材料粘结成为整体的物质^[15]。水泥是胶凝材料中产量最大、最重要的一种。

铜渣二次尾矿用于生产水泥时, 可以分两种情况: 一是利用尾矿中含有一定量铁的特点, 用尾矿部分或全部替代通常水泥配方使用的铁粉, 尾矿在水泥原料配方中的用量比较低, 一般不超过 5%^[15-18]; 二是利用尾矿代替水泥原料的主要成分, 一般情况下尾矿成分并不能完全符合水泥配方的要求, 需要另外配入一些其它原料才能符合水泥生产的要求, 这种情况尾矿消耗量大, 一般配入量在 10% 以上。

施正伦等^[19]将尾矿按质量 5% 的掺量配制水

泥生料,在试验室使用高温加热炉在不同温度条件下进行水泥熟料煅烧试验。结果表明,在煅烧温度为1300℃时熟料矿物组成与不加尾矿的传统配料水泥熟料基本相同,而烧成温度比传统配料降低了100~150℃。罗力等^[20]利用铁尾矿为原料在配比为17%的情况下,生产出物理性能满足42.5强度等级硅酸盐水泥。

铜渣二次尾矿中包含的元素对生料煅烧会起到矿化、助熔作用,能使生料易烧性变好。由于铜渣二次尾矿粒度较细,用作混合材可以降低水泥粉磨电耗,节约能源。以生产普通硅酸盐水泥为目标,铜渣二次尾矿可以作为硅和铁的校准材料加入比例为10%时,一条年产量为200万t的水泥生产线,可以消耗约20万t二次尾矿。

地聚合物(Geopolymer)是一种在组成上和沸石类似,在结构上呈现非晶态或半晶态,具有由硅氧四面体和铝氧四面体形成的独特三维网络结构的新型胶凝材料。它可通过硅铝质材料与激发剂在常温或一定养护条件下经“溶解-单体重构-缩聚”反应凝结硬化而成^[21-23]。由于其制备工艺简单,能耗是生产普通硅酸盐水泥(OPC)的1/6~1/4,因而具有完全取代OPC的潜力,近年来已成为国际无机材料领域的研究热点。

使用铜渣二次尾矿生产地聚合物,二次尾矿的添加量50%以上,可以实现其大量的利用。

2.3 生产陶粒

陶粒是以粘土、泥质岩石、工业废料等为主料,经造粒成球在高温下煅烧所制得的颗粒状陶质物。陶粒是一种高性能的人造轻骨料,因烧制陶粒的原料组成物质和加热方式不同,陶粒可分为煅烧型和非煅烧型,煅烧型又分为烧结型和烧胀型,因采用的原料和烧制工艺不同,陶粒的外观颜色不同。陶粒的表面粗糙而坚硬,外壳呈陶质或致密的釉质,内部具有封闭式细蜂窝状微孔结构的多孔陶质粒状物。因其具有质轻、高强、吸水率低、耐火耐腐蚀等多项优点,因此被广泛应用于建筑、滤料、花卉等领域中。随着自然资源的日渐枯竭和尾矿堆存量的不断增加,以工业固体废弃物作为原料代替自然

资源制备工业材料、建筑材料的研究越来越多

王德民等^[24]以低硅铁尾矿为主要原料,铁尾矿添加量为75%时生产出陶粒,并且在用量为920 kg/m³、水泥用量为220 kg/m³、水灰比为0.37情况下的铁尾矿陶粒混凝土密度等级为1200、抗压强度等级为LC5.0,满足《JGJ 51-2002 轻骨料混凝土技术规程》中结构保温轻骨料混凝土的要求,产品保温性能良好。

利用铜渣二次尾矿生产陶粒是其有效的处置方法之一,它不仅解决了尾矿堆放问题,避免排放不当对环境所造成的二次污染。陶粒作为轻骨料可以用于基础建筑,也缓解了砂、石等建材紧张的资源危机,符合当前国家固体废弃物资源化利用的政策^[25]。

2.4 用于农业方面

土壤是人类最基本的生产资料,是人类赖以生存的物质基础。我国土地资源不但非常有限,而且随着长期耕种和工业化所带来的环境污染,土壤有效成分减少、结构退化,甚至出现板结并受到一定的污染,影响了农作物的品质,严重制约了农业的发展。二次尾矿因所含的矿物质有着特殊的性能和独特的作用,在农业生产领域中也有着重要的应用价值。

(1) 用作土壤改良剂

铜渣二次尾矿是经过磨矿-磁选工艺产生的,其中不仅含有多种植物生长发育所必需的矿物质和微量矿物元素,而且具有良好的透气性能和透水性能,所以尾矿能够作为土壤改良剂。铜渣二次尾矿可以改善土壤构造,增加土壤孔隙度、透水性和透气性,改善农作物的生长环境,提高土壤肥力、优化原有土壤结构^[26]。

国外许多国家对土地的复垦工作十分重视,在尾矿复垦植被方面取得了成功的经验^[27-29]。马鞍山矿山研究院进行了深入的试验研究工作,对铁尾矿进行磁化处理,将磁化后的尾矿产品作为改良剂施入土壤,增加了农作物的产量^[30-31]。实践证明,该法在一定程度上改善了原有土壤的性能,疏松土壤结构,增大了保肥能力,效益良好。

(2) 用于造地

利用铜渣磨矿-磁选工艺产出的铜渣二次尾矿进行造地, 需要根据当地的自然条件进行不同程度的转化, 并都可以长期重复进行, 造地完成即可达到基本农耕要求^[32]。较优的转化方式是在地表 30 cm 深度范围内回填 10 cm 左右的草炭土、每亩施用 5 t 有机肥, 并辅以添加微生物菌进行土壤改造, 再覆盖 3~5 cm 厚的粉碎秸秆。

东招远地区某些矿山建立起阶梯式尾矿库, 库外种植树木防止雨水冲刷, 库满后上面种植花生、红薯等农作物, 效果良好^[33-35]。徐东强等^[36]通过对唐山马兰庄地区土地、水质及土壤进行分析, 成功地利用尾矿进行了复垦试验。

(3) 用来植树种草

金昌市地处河西走廊中东部, 祁连山北麓, 巴丹吉林沙漠南缘, 东北与民勤接壤, 东南与凉州相接, 西南与肃南毗邻, 西北与山丹、内蒙阿右旗交界。总体气候特征为干旱少雨, 日照丰富, 风大沙多, 呈大陆性沙漠干旱气候特征。全市多年平均降水量 200 mm 左右 (市区仅有 126 mm), 年均蒸发量 2827 mm, 是降水量的 25 倍左右。年均日照时数 2963.7 h, 无霜期 175 d, 年均 8 级以上大风日数 33 d^[37-39]。金昌市植被稀少, 水资源匮乏, 是全国 108 个缺水城市和 13 个资源性缺水城市之一, 也是全国荒漠化监控与防沙治沙的重点地区^[40]。由于森林面积的不断减少, 生态环境日益恶化, 沙尘暴连年发生, 水土流失加剧, 河流水量锐减, 特别是荒漠化土地面积的不断扩大, 已经威胁着全市的社会经济发展^[41-42]。

铜渣二次尾矿来源于湿式磨矿-磁选工艺, 一般含水量 10% 左右, 含水量较高, 适合在金昌干旱地区植树造林。在绿化植物种类选择和配置上要注意因地制宜、适地适树的基本原则, 并注意乔、灌、草、花结合, 落叶树与常绿树结合, 适当增加常绿树, 人工种植地被与利用野生地被结合, 以人工种植为主, 并应选择抗逆性强、抗旱的地被植物大面积推广。

2.5 生产新型墙体材料

新型墙体材料是指不以消耗耕地、破坏生态和污染环境为代价, 适应建筑用品工业化、施工机械化、减少施工现场湿作业、改善建筑功能等现代建筑业发展要求所生产的墙体材料^[43-44]。目前我国新型墙体材料的品种繁多, 概括起来可分为砖、砌块和板材三大类^[45-46]。

以铜渣二次尾矿为主要原材料, 研制生产新型墙体材料不仅可以大量消耗尾矿的办法, 既能消耗尾矿减轻对环境污染带来的压力, 还能为建材行业提供新的廉价原料, 具有较好的经济效益。

蒸压灰砂砖是以石灰和砂为主要原料, 允许掺入颜料和外加剂, 经坯料制备、压制成型、蒸压养护而成的实心灰砂砖。在工业生产中不需要消耗宝贵的粘土资源, 同时可以替代实心烧结粘土砖, 是一种环保建筑材料^[47]。蒸压灰砂砖具有强度高, 耐水性好的突出优点, 规格尺寸与普通实心粘土砖完全一致, 可以直接代替实心粘土砖, 是国家大力发展和推广的新型墙体材料。蒸压灰砂砖适用于各类民用建筑、公用建筑和工业厂房的内、外墙, 以及房屋的基础。蒸压灰砂砖的主要原料是砂和石灰, 由于二次尾矿的粒度较细 (-0.074 mm 超过 80%), SiO_2 含量低于 50%, 所以需要通过配加金昌当地的 SiO_2 含量高的戈壁沙来调整成分和粒度分布生产蒸压灰砂砖。二次尾矿加入量约为 60%。每生产 1 亿块标砖, 砖的重量取 2.5 kg, 则可以消耗 15 万 t 的二次尾矿。

蒸压加气混凝土是目前唯一能够达到建筑节能 50% 的单一墙体材料, 以其质轻、利废节土、保温隔热、吸声隔声等性能成为目前新型墙材发展中最具潜力的材料之一^[48]。加气混凝土广泛应用于工业和民用建筑的承重或围护填充结构, 受到世界各国建筑业的高度重视, 成为国内外大力推广和发展的一种新型墙体材料。利用铜渣二次尾矿生产蒸压加气混凝土砌块, 以加入量为 60% 生产干密度为 600 kg/m^3 的加气混凝土砌块计算, 则一条年产 30 万 m^3 的生产线能够消耗 10 万 t 左右的二次尾矿。

2.6 二次尾矿利用方式分析与建议

铜渣二次尾矿是铜渣经过转底炉直接还原-磨磁选后产生的废弃物，主要由石英和硅酸盐类的非金属矿物构成，以硅、铁、铝等氧化物的为主。尽可能地消化再利用铜渣二次尾矿，减少土地占用率和节约环保费用。同时结合金川神雾公司铜渣综合利用项目地处金昌市附近，对二次尾矿的利用方式进行分析如下。

对于胶凝材料，金昌地区水泥产能过剩，不可能新建水泥生产线，只能将铜渣二次尾矿卖给金昌水泥厂，价格不可控；地聚物属于前沿技术，尚处于基础研究阶段，未大规模应用。

金昌地区地处沙漠边缘，砂、石等建材资源充足，对陶粒的需要不大，铜渣二尾矿生产陶粒可行性不大。由于金昌地区沙多土少、干旱少雨，铜渣二次尾矿用于造地种草，社会效益和生态效益更大。

在新型墙体材料中，蒸压加气混凝土加气混凝土具有轻质、保温、隔热、不燃、易加工等特点，作为单一的墙体材料完全可以满足节能建筑的需要。在世界各国得到了广泛的应用，在我国建筑材料市场也有着广阔而美好的发展前景。因此，在金昌地区使用铜渣二次尾矿生产蒸压加气混凝土是比较合适的利用途径。

3 二次尾矿生产蒸压加气混凝土经济性分析

3.1 项目基本情况

本项目分析以充分利用金川神雾公司一期中产生的铜渣二次尾矿为基础，结合金昌市蒸压加气混凝土砌块市场规模，拟投资建设年产30万m³蒸压加气混凝土砌块生产线一条，项目预计总投资为6000万元。

产品技术性能，蒸压加气混凝土砌块技术性能和质量标准符合中国GB11968-2006。根据市场调研，金昌市周边蒸压加气混凝土砌块市场制定出以06级合格品即A3.5、B06型号产品为生产主产品，产品尺寸可根据客户需要切割各种规格。

项目建设期为1年，第2年投入生产并达到设计能力的90%，第3年达到设计能力的100%，生产期取14年，计算期为15年。项目财务基准收益率，按建材行业税后收益率取12%，折现率取12%。

本项目的经济评价以国家发改委和建设部颁发的《建设项目经济评价方法与参数》(第三版)为依据^[49]，符合国家有关法规及现行财税制度。

3.2 项目投资估算

经估算本项目总投资为6000.00万元，具体投资构成见表4。

表4 项目投资估算

Table 4 Project investment estimation and summary

序号	项目及费用名称	金额/万元	比例/%
1	建筑工程费	1912.00	31.87
2	设备购置费	2640.00	44.00
3	安装工程费	455.00	7.58
4	工程建设其它费用	322.00	5.37
5	基本预备费	400.00	6.67
6	建设期利息	71.00	1.18
7	铺底流动资金	200.00	3.33
8	合计	6000.00	100.00

3.3 项目生产成本估算

本项目主要原料有铜渣二次尾矿、生石灰、水泥、硅石、脱硫石膏、铝粉、脱模油和钢球等。外购原材料费用共计2188.80万元，其年消耗量及单价见表5。

表5 原料成本的估算

Table 5 Estimation of the raw material cost

序号	项目	名称	用量	单价/元	价格	万元/年
1	原材料消耗	二次尾矿/t	0.308	15	4.62	138.60
		生石灰/t	0.112	320	35.84	1075.20
		水泥/t	0.056	350	19.60	588.00
		硅石粉/t	0.056	300	16.80	504.00
		石膏/t	0.028	50	1.40	42.00
		铝粉/kg	0.42	15	6.30	189.00
		模具油/kg	0.6	2	1.20	36.00
2	燃料与动力消耗	煤/t	0.017	700	11.90	357.00
		水/m ³	0.47	1.5	0.71	21.15
		电/度	12.44	1	12.44	373.20
3		人员费用			17.25	517.50
4		固定资产折旧费			13.25	10.57
5		设备维护及维修费			2.00	2.50
6		其他管理造费用			9.17	9.00
7		其他制造费用			2.00	3.34
8		合计			150.62	4518.70

注：年消耗量数据依据是第3节中较优的试验结果，原料单价的依据是当地市场询价。

3.4 项目经济性分析

本项目利用铜渣二次尾矿、生石灰、水泥、硅石粉和脱硫石膏为主要原料,建设一条年产 30 万立方米蒸压加气混凝土砌块生产线,将上述数据输入铭星通用建设项目经济评价系统软件进行分析,具体计算数据见表 6。

表 6 项目财务评价指标汇总
Table 6 Project financial evaluation index summary

序号	名称	金额/万元	序号	名称	金额/万元
1	项目总投资	6445.43	12	投资利税率/%	46.73
	报批总投资	6133.51	13	项目资本金净利润率/%	67.75
1.1	建设投资	5929.42	14	贷款偿还期	
1.2	建设期利息	70.41	14.1	长期借款	1.00
1.3	流动资金	445.60	15	平均利息备付率/%	1081.15
	铺底流动资金	133.68	16	平均偿债备付率/%	1430.00
2	资金筹措	6445.43	17	项目投资税前指标	
2.1	项目资本金	3168.80	17.1	财务内部收益率/%	49.08
2.2	项目债务资金	3276.63	17.2	投资财务净现值 I=10%	14833.86
3	年均销售收入	6552.86	17.3	全部投资回收期/年	3.07
4	年均总成本费用	4176.53	18	项目投资税后指标	
5	年均销售税金及附加	88.95	18.1	财务内部收益率/%	46.72
6	年均增值税	302.31	18.2	投资财务净现值 I=12%	10388.79
7	年均息税前利润	2645.26	18.3	全部投资回收期/年	3.07
8	年均利润总额	2620.45	19	资本金内部收益率/%	95.25
9	年均所得税	473.60	20	盈亏平衡点生产能力利用率/%	27.29
10	年均净利润	2146.85	20.1	价格	
11	总投资收益率 (%)	41.04	20.2	平衡点/%	64.29

从表 6 可以看出,年产 30 万 m³B06 级蒸压加气混凝土砌块的生产线总投资预计 6445.43 万元,其中建设投资 5929.42 万元,年均净利润 2146.85 万元,全部投资回收期 3.07 年,总投资收益率 41.04%,项目产品市场前景好,经济效益显著,投资建设十分必要。

本项目建设投产后,每年能够综合利用铜渣二次尾矿 9.24 万 t,在资源综合利用的同时,有效解决了当地因粉煤灰造成的环境污染问题。同时,

该项目的实施还可以提供就业岗位,增加就业,有利于优化地方人力资源配置,使得当地社会稳定因素增加,为金昌地区经济社会和谐发展做出贡献。

4 结 论

(1) 铜渣二次尾矿是一种复合矿物原料,除了含少量金属组分外,结晶相主要由 CaMgSi₂O₆ (透辉石) 和 SiO₂ (磷石英) 组成,其余部分为无定形的玻璃体。

(2) 通过对比不同的利用方式,得出铜渣二次尾矿用于农业生产有利于金昌地区的社会效益和生态效益较大;而铜渣二次尾矿用于生产蒸压加气混凝土经济效益较好,市场前景较好。

(3) 一条年产 30 m³B06 级蒸压加气混凝土砌块的生产线,总投资预计 6445.43 万元,其中建设投资 5929.42 万元,年均净利润 2146.85 万元,全部投资回收期 3.07 年,总投资收益率 41.04%,年消耗铜渣二次尾矿 9.24 万 t。

参考文献:

- [1] 王鹏,高利坤,董方,等.铜冶炼渣浮选回收铜的研究现状[J].矿产综合利用,2017(1):16-20.
- [2] Sarfo P, Das A, Wyss G, et al. Recovery of metal values from copper slag and reuse of residual secondary slag[J]. Waste Management, 2017, 70: 272-281.
- [3] 廖宁宁,李献帅,鄢发明,等.浮选回收某缓冷铜冶炼渣中的铜[J].金属矿山,2017,46(5):189-192.
- [4] 杨慧芬,景丽丽,党春阁.铜渣中铁组分的直接还原与磁选回收[J].中国有色金属学报,2011,21(5):1165-1170.
- [5] 林晨.金川神雾铜渣综合利用项目投产[N].中国有色金属报,2017-01-05(001).
- [6] 神雾节能全球首创有色金属渣循环利用示范项目投产引领世界清洁冶炼技术变革[J].中国金属通报,2017,22(1):28-29.
- [7] 李铮.神雾节能全球首创有色金属渣循环利用示范项目投产[N].中国有色金属报,2017-01-03(006).
- [8] 陈永亮,张一敏,陈铁军.铁尾矿建材资源化研究进展[J].金属矿山,2009,39(1):162-165.
- [9] Zhang Y, Lin H, Dong Y B, et al. Coupling relationship between multi component recovery of rare earth tailings[J]. Rare Metals, 2017, 36(3): 220-228.

- [10] 陈晶, 朱立德. 尾矿大量消纳的较佳途径 [J]. 有色冶金节能, 2017, 33(4): 55-57.
- [11] 余晶, 李秋月. 尾矿资源综合利用现状及政策研究 [J]. 内蒙古科技与经济, 2017(14): 52-54.
- [12] 张宏泉, 李琦缘, 文进, 等. 铜尾矿资源的利用现状及展望 [J]. 现代矿业, 2017, 33(1): 127-131.
- [13] 史利芳, 潘利祥, 郭炜, 等. 尾矿综合利用及实例 [J]. 中国矿业, 2013, 22(4): 137-141.
- [14] 刘淑鹏, 张小伟, 魏芳. 金属矿山固体废弃物危害及资源再利用 [J]. 现代矿业, 2017, 33(2): 122-125.
- [15] 张树光, 王华庆, 李江山. 锰尾矿基胶凝材料配方优化及水化机理分析 [J]. 环境工程学报, 2017, 11(1): 535-540.
- [16] 李玲, 杨超. 利用尾矿作为建材原料的研究进展 [J]. 建材发展导向, 2014, 12(16): 63-67.
- [17] 何哲祥, 周喜艳, 肖祁春. 尾矿应用于水泥原料的研究进展 [J]. 资源环境与工程, 2013, 27(5): 724-727.
- [18] 张文慧. 铁尾矿砂在水泥生产中的应用 [J]. 中国水泥, 2017, 24(4): 85-86.
- [19] 施正伦, 骆仲泱, 林细光, 等. 尾矿作水泥矿化剂和铁质原料的试验研究 [J]. 浙江大学学报, 2008, 42(3): 506-510.
- [20] 罗力, 张一敏, 包申旭. 利用铁尾矿制备硅酸盐水泥熟料 [J]. 非金属矿, 2016, 39(3): 50-52.
- [21] Davidovits J. Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials [J]. Journal of Thermal Analysis, 1991, 37(8): 1633-1656.
- [22] 肖力光, 李睿博, 崔正旭, 等. 利用铁尾矿替代细石英砂配制聚合物水泥砂浆的研究 [J]. 混凝土, 2012, 34(3): 115-116, 123.
- [23] 胡倩倩, 赵凤清, 刘少杰. 新型绿色聚合物防水砂浆的研制 [J]. 新型建筑材料, 2014, 41(3): 64-67, 70.
- [24] 王德民, 雷国元, 宋均平, 等. 低硅铁尾矿陶粒的制备与应用 [J]. 金属矿山, 2013, 42(9): 163-166.
- [25] 曹曦娇, 邱俊, 吕宪俊. 铁尾矿陶粒的发展现状和存在问题 [J]. 现代矿业, 2012(12): 152-154.
- [26] Catherine R, Valérie B, Michel A, et al. Life cycle assessment of mine tailings management in Canada [J]. Journal Cleaner Production, 2009, 17(4): 471-479.
- [27] Noyd R K, Pflieger F L, Norland M R. Field responses to added organic matter, arbuscular mycorrhizal fungi, and fertilizer in reclamation of taconite iron ore tailings [J]. Plant & Soil, 1996, 179(1): 89-97.
- [28] Norland M R, Veith D L. Revegetation of coarse taconite iron ore tailings using municipal solid-waste compost [J]. Journal of Hazardous Materials 1995, 41(2-3): 123-134.
- [29] Li F P, Liu R Y, Zhang J R, et al. Land reclamation pattern of iron mine in Tangshan [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2005(S1): 159-163.
- [30] 黄勇刚. 我国铁尾矿资源的利用现状及展望 [J]. 资源与产业, 2013, 15(3): 40-44.
- [31] 王运敏, 常前发. 当前我国铁矿尾矿的资源状况利用现状及工作方向 [J]. 金属矿山, 1999, 28(1): 1-6.
- [32] 侯攀, 陈宇清, 樊宇蛟. 金属矿山尾矿综合利用现状 [J]. 现代矿业, 2017, 33(2): 129-131.
- [33] 贾清梅, 张锦瑞, 李风久. 铁尾矿的资源化利用研究及现状 [J]. 矿业工程, 2006(3): 7-9.
- [34] 钟任智. 充分利用尾矿资源实现无尾矿山目标 - 尾矿综合利用在矿山生产中的实践 [J]. 2002, 11(2): 52-55.
- [35] 刘翔, 胡建成, 王力群. 尾矿回收工艺研究与实践 [J]. 矿业快报, 2002(2): 12-141.
- [36] 徐东强, 杨福海, 张荣, 等. 马兰庄铁矿尾矿复垦实践 [J]. 唐山工程技术学院学报, 1995(4): 99-104.
- [37] 孙建忠. 金昌市地区生态环境退化特征及建设思路 [J]. 甘肃林业, 2006, 3(11): 19-21.
- [38] 张玉玲. 浅谈金昌城市园林绿化植物的优化配置 [J]. 甘肃林业科技, 2002(4): 33-35+39.
- [39] 孙育虎. 资源性缺水城市园林绿化发展之路 - 甘肃省金昌市创建国家园林城市总结 [J]. 中国园艺文摘, 2014, 30(4): 90-92.
- [40] 孙育虎, 李光娜. 甘肃金昌市居住区绿化发展探讨 [J]. 中国园艺文摘, 2015, 31(8): 110-111.
- [41] 许金秀. 浅谈金昌市城市园林绿化存在的问题及建议 [J]. 甘肃农业科技, 2014(12): 63-65.
- [42] 毛雪莲. 金昌市林业生态建设现状及保护性发展设想 [J]. 甘肃农业科技, 2013(8): 45-47.
- [43] 曹万智. 新型墙体材料的特性及发展趋势 [J]. 砖瓦, 2012, 19(11): 81-86.
- [44] 闫凌云. 新型节能墙体材料的应用现状及发展趋势分析 [J]. 绿色环保建材, 2017(2): 1-2.
- [45] 张金青, 孙小卫, 牛艳宁. 我国矿山尾矿生产新型建材系列产品 [J]. 矿产保护与利用, 2012(2): 56-58.
- [46] 徐曙光. 新型墙材技术经济分析浅析 [J]. 北方建筑, 2017, 2(6): 19-21.
- [47] 方永浩, 庞二波, 王锐, 等. 用低硅铜尾矿制备蒸压灰砂砖 [J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(4): 559-563.
- [48] 高连玉, 李庆繁. 蒸压加气混凝土建筑制品生产及应用 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2015-08.
- [49] 国家发展改革委、建设部发布《建设项目经济评价方法与参数》[M]. 3版. 北京: 中国计划出版社, 2006. 8.

Research on Utilization of Tailings from Copper Slag through RHF Direct Reduction -Grinding Separation Process

Ding Yingui^{1,2}, Xue Xun², Ni Wen¹, Cao Zhicheng^{1,2}, Liu Zhanhua¹, Yan Aiyun²

(1. Shenwu Technology Group Corp Co., Ltd, Beijing, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering University of Science and Technology Beijing, Beijing, China)

Abstract: The copper slag direct reduction-grinding production line in Jinchuan Shenwu Technology Co., Ltd. is put into operation smoothly, for every ton of copper slag will produce about 0.5 t tailings, and it needs to be comprehensive utilization. The physical and chemical properties of tailing were analyzed in this paper, the crystalline phases in tailings were mainly by diopside and quartz, the rest is amorphous phase, and the proportion of -0.074 mm was 91.70%.. The different utilization methods of tailings were analyzed, including the production of cementitious materials, wall materials, ceramics and agriculture field. The economic effect is evaluated for the project of autoclaved aerated concrete block of annual output of 300, 000 m³. The total investment is about 64, 454, 300 yuan. And the annual consumption of tailings will be 92, 400 tons. The annual profit will be 21, 458, 500 yuan, the investment return rate is 41.04%, and the investment recovery period is 3.07 years. The autoclaved aerated concrete block production project is feasible.

Keywords: Copper slag; Secondary tailings; Comprehensive utilization way; Economy evaluation

////////////////////////////////////
(上接 151 页)

Influencing Factors and Control of Chemical Leaching of Ion-type Rare Earth Ore

Zhou Hepeng^{1,2}, Hu Jie¹, Zhang Yongbing¹, Luo Xianping

(1. Faculty of Resource and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi, China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Mining Engineering, Ganzhou, Jiangxi, China)

Abstract: Because of the complex nature of ion-type rare earth ore, special existing state of rare earth element, the unique properties of clay minerals are not conducive to the chemical leaching of rare earth. It is difficult to recover comprehensively. In order to reveal the chemical leaching mechanism of ion-type rare ore, explore the leaching process optimization measures. This paper takes Jiangxi Longnan ion-type rare earth ore as the research object, using indoor leaching method to simulate the in-situ leaching process, carrying out chemical leaching mechanism and influence factors of the system and its optimization. The results show that the leaching agent concentration is higher, flow rate is faster, the rare earth leaching rate is high. Water content is too large, seam height is too high will affect the ore leaching efficiency, reducing rate of rare earth ions and leaching liquor concentration. Orthogonal test method was used to calculate and analyze the influence of each factor, and the interaction between the factors could be obtained. When the regulation of leaching agent concentration was 4%, leaching agent dosage is 180 mL, seams height is 211mm, and the leaching agent flow rate is 2 mL/min, top water dosage is 20 mL, the moisture content is about 5%, higher leaching rate and average concentrations can be obtained(leaching rate is 97.87%, average concentration of rare earth is 2.52 g/L). By controlling the main factors of chemical leaching and optimizing the conditions of the secondary factors in the leaching process, the extraction of the ion-type rare earth ores can be realized efficiently and effectively.

Keywords: Ion-type rare earth ore; Chemical leaching; Orthogonal test; Optimal control