

# 金尾矿综合利用技术研究与应用进展

李礼<sup>1,2</sup>, 谢超<sup>1</sup>, 陈冬梅<sup>1</sup>, 冯一鸣<sup>1</sup>

(1. 重庆大学资源及环境科学学院, 重庆 400030;

2. 重庆市环境监测中心, 重庆 401147)

**摘要:**黄金矿石的品位低,经选冶后产生比其他金属矿石更多的尾矿。黄金矿山每天尾矿的大量排放,造成了黄金及其他有价金属的流失,同时大量的尾矿堆积,对环境带来极大的危害。为了进一步回收有价金属,保护矿区的生态环境,本文介绍了尾矿的综合利用技术,其中重点介绍了尾矿中有价元素的综合回收技术,进一步变废为宝,开发宝贵的二次资源。

**关键词:**黄金矿石,尾矿,综合利用,有价元素

中图分类号: TD863 文献标识码: A 文章编号: 1006-8719(2012)-03-0001-04

## A OVERVIEW OF GOLD MINE TAILINGS COMPREHENSIVE UTILIZATION TECHNOLOGY

LI Li<sup>1,2</sup>, XIE Chao<sup>1</sup>, CHEN Dong-mei<sup>1</sup>, FENG Yi-ming<sup>1</sup>

(1. College of Resources & Environmental Science of Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Environmental Monitoring Center of Chongqing, Chongqing 401147, China)

**Abstract:** Gold ore generally has low grade, and it produces more tailings than other metal ores after mineral processing and smelting. Gold tailings are discharged in a large number of emissions per day, causing the loss of gold and other valuable metal, at the same time, the piling of a large number of the tailings brings great damage to the environment. In order to recover valuable metals and protect the ecological environment of mining area, this article describes the comprehensive utilization of tailings, which highlights the recovery techniques of valuable elements in tailings to turn waste into wealth and develop valuable secondary resources.

**Keywords:** Gold ore, Tailings, Comprehensive utilization, Valuable element

随着我国黄金提金技术的高速发展,黄金矿山的数量、规模及产量也日趋增长,然而矿石入选品位却不断降低,开采强度日益增大,随之而来的尾矿量也猛增。据不完全的资料统计,仅国营和地方金矿每年排放量就达2 000万t以上<sup>[1]</sup>。黄金矿山每天排出大量尾渣,不仅含有一定数量的金,有的还含有其它可综合回收的有价金属及矿物,如铜、银、铅、锌、铁、锑、钨、铋、硫以及碳酸盐、硅酸

盐等。尾矿具有粒度细、数量大、可利用性高、价格便宜、处理成本低等特点,是宝贵的二次资源,应很好地开发利用。

大量尾矿的堆积,不仅需要相当的资金投入,而且对生态环境造成一定影响,同时也带来一系列环境污染问题<sup>[2]</sup>。金尾矿对环境的污染大体通过三种途径:(1)尾矿在风化过程中逸出某些有害气体,经大气传播而进行污染;(2)极细的尾矿砂粒受风吹的作用(甚至可形成沙尘暴),使周围环境受到严重危害;(3)遇到汛期,尾矿连同雨水流入农田、

收稿日期:2011-11-22

作者简介:李礼(1983-),男,湖南湘潭人,博士研究生,工程师,主要研究方向为资源综合利用与清洁生产。

河流,使地下水造成危害。对黄金矿山来说,目前我国黄金矿山尾矿品位多数都在 0.3 g/t 以上,有的高达 3.0 g/t,同时尾矿中还含有 Cu、Pb、Zn、S、Fe、Ag、Sb、W 等<sup>[3]</sup>。可以看出,金矿尾矿虽是矿山排出的废弃物,但同时又是潜在的二次资源,对其进行有效地开发是矿产资源综合利用的重要组成部分,也是节约利用矿产资源的一个重要途径。

## 1 尾矿中有价元素的综合回收

由于矿石性质及所采用的金提取工艺流程不同,因此综合开发利用尾矿的方法和手段也不尽相同。依据目前国内外有色金属矿山和黄金矿山的现状,尾矿的综合利用主要有以下几个方面。

### 1.1 从尾矿中回收金

我国黄金矿山建国初期的选矿工艺一般为浮选,个别采用重选-浮选或混汞-浮选等传统流程,过去开采矿石品位高,入选矿石没有低于 6~7 g/t,而现在全国平均品位在 3.8~4.2 g/t 之间,由于生产技术水平低,技术指标差,回收率也低,尾矿中金品位多数在 1.0 g/t 以上。有的甚至高达 2~3 g/t;少数矿物组分比较复杂的矿石或特高品位矿石,尾矿品位达 3.0 g/t 以上。并且有相当大的积存量,相当于一座小型黄金矿山<sup>[4]</sup>。加之诸多因素影响,许多矿山只重视金产量,致使其他有价金属及矿物的综合回收工作没有跟上,造成大量有价金属、有用矿物随尾渣一起被丢弃。

这类尾矿利用价值极高,国内外专家学者对此做了深入的研究探索,取得一些成熟的经验<sup>[5]</sup>。自 1976 年以来,南非几个大型尾矿再处理厂一直在盈利性生产。加拿大的尾矿处理厂也在生产,如 ERG 公司的 Timmins 金尾矿再处理工程,一期处理 5 000 万 t 尾矿,平均品位为 0.52 g/t,该工艺是采用浮选-氰化炭浆工艺,平均回收率达 60%,日处理尾矿量可达 24 000 t,取得的效益非常可观。在国内,湘西金矿沃溪矿区系含金、锑、钨多金属的石英脉型矿床。1# 尾矿库堆存的尾矿共有 35 127 万 t,多为 1955~1964 年“先治后选”的尾矿及 1959~1965 年地表堆存的氰化矿经选别后的尾矿,金、锑、钨的平均品位分别为 4.18g/t、0.714%、0.16%。该厂从 2000 年 2 月 23 日起到 5 月 27 日止,历时 92 d,进行较系统的工业研究,分别采用全泥氰化流程和浮选锑+尾矿氰化的流程对

尾矿进行处理,两种流程都能达到较好的回收效果,针对老尾矿的工艺矿学性质,该厂最终采用浮选金锑+尾矿氰化的工艺流程<sup>[6]</sup>。

兴义市是黔西南州产金量较多的一个县级市<sup>[7]</sup>,其雄武片区就分布着大小型黄金矿山 52 个(7 个大矿,45 个小矿)。其中,P 矿山是一个每年可处理矿石 11 万 t,并采用池浸工艺的企业,浸池容积为 1 988 m<sup>3</sup>,一次性可处理矿石 3 480 t。该矿每年处理 11 万 t 矿石的同时,产生尾矿也约为 11 万 t,其中可利用的占 1/3,约为 37 000 t;十几年来,积存的可处理再利用的尾矿约 30 万 t。该矿研究人员在 P 金矿的尾矿堆上,人工选取 1 m<sup>3</sup> 较大块的尾矿(金品位为 0.5 g/t)经破碎处理后进行池浸处理试验。试验得出每吨尾矿可回收 0.3 g 金,通过成本估算及黄金当时行情价格,算出处理每吨尾矿利润为:18.68 元/t。尾矿量大,经济效益十分可观。

湖北省嘉鱼县的蛇屋山金矿<sup>[8]</sup>,自 1994 年正式开采以来,发展迅速,规模不断壮大,年产值已逾亿元。但是,在近十多年的开采历史中,矿山累积下来了 700 万 t 以上的金矿尾矿,并以每年 150 万 t 的速度增加。武汉工程大学对该尾矿进行了金回收的研究,该矿金矿石的金呈高度游离状态,主要赋存于碳质和粘土矿物中,少量包裹在细粒黄铁矿中,其品位在 0.2~0.5 g/t 之间。根据矿物组成、含量及特性,采用金矿尾矿提金的工艺路线包括以下六步:去屑、全泥氰化、活性炭吸附、解吸、电解和金泥熔炼,该工艺无需加水泥制粒,经十多年的生产实践,技术已十分成熟,在理论与实践上都可行,并为矿山带来了巨大的经济效益。

江西省上饶某金矿浮选高硫高砷金精矿经氰化后尾矿年产量达 2 万 t,尾渣中金品位在 4 g/t 以上,硫品位为 15%~22%,砷品位为 1.2%~3.5%。该矿通过技术研究攻关,采用焙烧脱硫制酸,焙砂氰化回收了 90% 以上的金,尾渣综合利用率水平上升了一个新台阶<sup>[9-10]</sup>。

### 1.2 从金尾矿中回收铁

陕西安康金矿根据选矿厂的尾矿特性,通过实践采用磁选-重选联合流程对尾矿进行再选,先用两段干式磁选工艺从尾矿中分选出磁铁矿、赤铁矿(合称铁精矿)及钛铁矿与石榴子石连生体,再用摇床分选尾矿中的金。利用该工艺,安康金矿每年可获得铁精矿 1 700 t,重选金 2.187 kg,创产

值 44.12 万元。而毗邻的汉阴金矿则采用湿式磁选机从尾矿中分选出铁精矿,然后尾矿再用焙烧-磁选工艺分选出钛铁矿与石榴子石,初步估算,每年可产铁精矿 1 700 t, 钛铁矿 360 t, 石榴子石 468 t, 选铁时未选净的磁铁矿 216 t, 并可回收黄金 1.218 kg, 共创产值 170 万元<sup>[11]</sup>。

### 1.3 从金尾矿中回收铜

长春黄金研究院对黑龙江省老柞山金矿从氰化尾矿中回收铜进行了实验研究<sup>[12]</sup>, 粒度为 0.074 mm, 95% 的氰化尾矿中铜品位为 0.305%、砷品位为 2.08%, 采用浮选工艺从尾矿中直接抑砷选铜。该工艺简单易行, 技术较为先进, 获得铜 18.32%、金 9.69g/t、银 99.20g/t、硫 33.60%、砷 0.07% 的合格铜精矿, 铜回收率为 89.07%。

### 1.4 从金尾矿中回收硫

山东省七宝山金矿 1985 年从选金尾矿中回收硫精矿, 最初使用硫酸活化法, 由于成本太高, 于 1996 年下半年采用旋流器预处理工艺, 即先用旋流器对选金尾矿浆进行浓缩脱泥, 弃掉细泥部分再用一次粗选、一次扫选的浮选流程选硫。该工艺不用硫酸, 降低作业成本, 获得硫精矿品位达到 37.6%、回收率 82.46% 的较好的技术经济指标, 且精矿含泥少, 易沉淀脱水, 年增加经济效益约 120 万元<sup>[13]</sup>。

## 2 金尾矿的其他利用途径

### 2.1 利用尾渣生产各种建筑材料

按照国内黄金矿山当前的生产技术水平, 即使处理后的尾渣也仍含有可利用的矿物原料, 主要有石英、长石、辉石、石榴石、角闪石以及蚀变粘土、云母等铝硅酸盐矿物和方解石、白云石等钙镁碳酸盐矿物。化学成分主要有铝、硅、钙、镁的氧化物和少量的钾、钠、铁、硫氧化物, 其成分与广泛应用的建材、轻工、无机化工原料极为相近<sup>[14]</sup>。因此, 这些被黄金行业视为废物的尾渣可开发作为生产小型空心砖、普通硅酸盐水泥、陶瓷建筑材料、日用工艺美术陶瓷、微晶玻璃花岗岩等得廉价原材料, 这方面工作有着广阔的前景。

我国利用黄金矿山尾矿生产建材的研究起步较晚, 但发展很快。目前许多有色金属矿山和研究院开展了这方面的研究工作, 取得了很好的成绩, 黄金矿山在这方面也作了一些尝试。

焦家金矿是一座年处理能力 38 万 t 的特大

型金矿<sup>[15]</sup>, 产生尾矿 35 万 t, 为了就地消化尾矿并提高尾矿制品的附加值, 使其成为矿山长远发展的第二资源, 矿山技术人员在有关单位的配合下, 利用尾矿制备陶瓷墙地砖原料并进行了一次低温快烧实验研究, 焦家金矿尾矿的主要矿物为石英、长石、绢云母、菱铁矿、褐铁矿、赤铁矿与黄铁矿等。其中石英和长石约占总重量的 70% 以上。由于铁矿物的含量相对来说比较低, 矿山技术人员采用螺旋溜槽分级(重选)→(弱+强)磁选→浮选工艺流程, 最后经压滤干燥生产了优质而丰富的制陶长石代用原料(简称长石粉)。

河南灵宝地区黄金储量大, 矿山多, 是河南省主要产金区, 随着金矿开采量的增多, 尾矿堆放量逐年增加。中国地质科学研究院以该地区有代表性的灵湖金尾矿为主要原料, 进行制取微晶玻璃的试验研究<sup>[16]</sup>。试验所用原料包括灵湖金尾矿、长石、碳酸钠、氢氧化铝、氧化钙和氧化锌。微晶玻璃制备试验得出, 用灵湖金尾矿制取微晶玻璃产品的最佳配方为: 尾矿 72.2%、氢氧化铝 2.2%、碳酸钠 4.9%、氧化钙 17.0%、氧化锌 3.7%。

### 2.2 利用尾矿作井下充填料

对目前综合回收技术尚无开发利用价值的尾矿还可以考虑用作井下充填料。

采用充填采矿法的生产矿山, 每采出 1t 矿石需要回填 0.3~0.4 m<sup>3</sup> 的充填材料, 而黄金尾矿又是一种良好的充填骨料, 可以就地取材, 变废为宝, 免除采集、破碎和运输等生产充填碎石的费用。一般情况下, 黄金尾矿作充填骨料, 均需水力器脱泥, 把大于 30~50 μm 的粗颗粒与水泥或其他胶结剂搅拌后充填到采空区中, 其充填费用较低, 仅为外采碎石充填成本的 1/4~1/10<sup>[17]</sup>。

对于价值较高的黄金矿体开采, 为了改善地下空区的压力条件, 保证空区的稳定性, 而使其边部的各种矿柱-包括边柱、间柱、顶柱和底柱得以回收, 充填法是值得提倡的一种采矿方法。一般其采矿技术指标较好, 一次损失率不大于 5%~8%, 一次贫化率不高于 8%~10%, 所以, 国家提倡采用充填法开采地下岩金, 且其比重也由 20 世纪 80 年代不足 30%, 到 21 世纪初已达 40% 或更高。山东招远金矿利用分级尾砂作充填材料就是很好的例证。近年来, 为改善回采条件, 降低贫化损失, 往往在水力充填料中加入适量的水泥或其他胶泥材料, 使疏松的尾矿凝结成具有一定强度的整体, 尾

胶胶结充填技术的发展,为矿山最终实现无尾矿开采提供了可能<sup>[4]</sup>。

### 2.3 利用尾矿库复垦造田

在我国有成百上千座大、中、小型岩(脉)金矿山,几乎每年都有相当数量的尾矿库闭库。干涸的尾矿库极易产生飞尘,当风速较大时(大于4 m/s)可能产生沙尘暴,甚至可将尾矿库内自生或种植的植物连根拔起,对环境造成严重污染。对土地相当紧张的矿山,在低洼、山谷地带或废弃的露天矿坑构成尾矿库,待填平后复垦造田,有效地减少占地及环境污染,是一种很好的办法。

复垦造田的方法有两种<sup>[18]</sup>:一种方法是在尾矿表面覆盖一层厚度适宜的土壤,然后再种各种植物如草和树。具体步骤如下:(1)疏水晒干;(2)基底平整;(3)铺中和层;(4)铺表土。这种方法虽然有效,但需要大量“好土”,取土、运输、覆盖等一系列工作,使费用大增而难以推广。

另一种方法是直接在尾矿砂上种植草木,形成植被,这在南方更为方便与多见。这是国内外比较成熟的经验。

招远市位于胶东半岛西北部<sup>[19]</sup>,全市可供开发的金矿矿体有2 000余个,保有金矿储量占全国金矿储量的1/6以上,年产黄金10 000 kg。全市的采金洞口最多年份达到1 300多个,年开采矿石量210万m<sup>3</sup>,堆放尾矿140万m<sup>3</sup>。全市已累计排放尾矿3 100万m<sup>3</sup>,占压植被面积740 hm<sup>2</sup>,相当于整个招远国土面积的0.52%。针对尾矿库复垦难的状况,招远市在尾矿库不覆土的条件下种植火炬树取得了成功,采用该项技术既能发挥很好的保水保土作用,而且比传统的复垦方法节省95%的费用。

对于黄金氰化尾矿,在阳光和水的作用下,新排入尾矿库中的氰化物,通过形成氰化氢而挥发与分解使其含量降低,进一步可转化为天然肥料(如尿素)。这一转化过程为及时治理尾矿防治环境污染创造有利条件。例如菲律宾马斯巴特金矿在尾矿坝形成后便开始复垦研究,结果坝上农作物长势旺盛。这一事实说明上述转化过程是迅速而有效的。实验成功从而保证了该矿在1990年第一期尾矿坝植满后马上开始在尾砂表面全部种植农作物。这样不仅实现了在建设和生产的同时维持生态平衡,而且也使周围的农民获益<sup>[17]</sup>。

## 3 结语

黄金矿山的尾渣除含有金银和大量有价金属外,还含有有用矿物,是人类宝贵的二次资源,必须进一步开发利用。但尾矿又是污染自然环境、破坏生态的污染源,是当前技术水平条件下黄金生产中的必然产物。

利用不断发展的新科技,使尾矿进一步处理成为可能,如磁选、堆浸、强化浸出等,最大限度地降低了尾矿的金品位,提高了金的回收率,利用尾矿制建筑材料和作井下充填料以及复垦造田等技术,使黄金生产向无废渣方向发展,为尾矿永久性处理提供了条件。

## 参考文献

- [1] 恭明玺. 金选尾矿综合利用技术及应用研究[J]. 湖南有色金属, 2008, 24(2): 5~8.
- [2] 黄宗祥, 徐伟. 秀山县生态环境问题及对策措施[J]. 三峡环境与生态, 2009, 2(6): 1~3.
- [3] 王学娟, 刘全军, 王奉刚. 金矿尾矿资源化的现状和进展[J]. 矿冶, 2007, 16(2): 64~67.
- [4] 金英豪, 邢万芳, 姚香. 黄金尾矿综合利用技术[J]. 有色矿冶, 2006, 22(5): 16~19.
- [5] 索明武, 任华杰. 从库存金尾矿中回收金的试验研究[J]. 金属矿山, 2009(8): 167~169.
- [6] 刘迪初, 杨志洪. 湘西金矿尾矿资源的综合回收[J]. 矿业研究与开发, 2003, 23(2): 19~23.
- [7] 熊守福. 黔西南州黄金矿山尾矿资源的再利用[J]. 黄金, 2005, 26(8): 46~47.
- [8] 胡立嵩, 廖闯, 罗国强, 等. 蛇屋山金矿尾矿综合利用途径探讨[J]. 云南冶金, 2006, 35(3): 21~24.
- [9] 谢敏雄, 王宝胜, 杨荣华. 金属矿山尾矿资源利用状况与建议[J]. 黄金, 2009, 30(6): 49~52.
- [10] 洪德贵. 氰化尾矿制酸、提金工艺焙烧条件的研究与实践[J]. 黄金, 2005, 26(4): 33~34.
- [11] 艾满乾. 陕南月河砂金选厂尾矿的综合利用[J]. 冶金矿山设计与建设, 1997, 29(5): 46~49.
- [12] 余程民, 梁中扬, 胡中柱. 从浮选尾矿中综合回收有价元素的试验研究与实践[J]. 黄金, 2004, 25(10): 40~43.
- [13] 张锦瑞, 王伟之. 金属矿山尾矿综合利用与资源化[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [14] 陈刚, 刘奎仁, 赵翠微. 黄金矿山尾渣尾液综合利用及无害化处理[J]. 黄金学报, 1999, 1(3): 176~182.
- [15] 张金龙, 王庆德, 张顺堂. 利用金尾矿烧制陶瓷墙地砖试验研究[J]. 中国矿业, 2001, 10(6): 67~71.
- [16] 曹耀华, 刘红召, 高照国. 用灵湖金尾矿制取微晶玻璃的试验研究[J]. 金属矿山, 2008, (8): 137~141.
- [17] 章庆和, 苏蓉晖. 有色金属尾矿的资源化[J]. 矿产综合利用, 1996, 16(4): 27~30.
- [18] 焦绪国, 刘学杰. 黄金矿山尾矿库复土造田[J]. 黄金, 2004, 25(1): 46~47.
- [19] 李信椿, 王龙山, 王振林, 等. 尾矿库不覆土直接种植火炬树技术[J]. 中国水土保持, 2002(4): 30~31.