

# 四方金矿尼尔森重选精矿综合回收工艺优化改造

符元飞 曹 锋

(陕西凤县四方金矿有限责任公司, 陕西 凤县 721700)

**[摘 要]** 随着八卦庙矿区开采深度增加,原矿性质发生变化,特别是原矿各粒级颗粒金含量变化,原有精矿处理流程已经不能满足现场生产。本文在分析对比上部矿石和深部矿石的矿物成分、自然金产出形态、形状和粒度的基础上,提出了尼尔森矿机工艺重选改造方案,并针对尼尔森精矿综合回收和利用问题,通过浸出、浮选和再磨再选等多方案对比,确定最优处理方式。尼尔森金精矿经过传统摇床分选后,中尾矿品位较高,通过自动化控制系统,多批次、少批量返回生产系统再磨再选,既能保持较高的回收率,也能消除高品位中尾矿对生产系统产生的冲击,相比于浸出和浮选回收方式,更好地利用了现有流程和设备,降低了选矿成本,取得较好的经济效益,一举多得。

**[关键词]** 尼尔森重选; 综合回收; 优化改造; 金矿

**[中图分类号]** TD953 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 2097-2423(2023)05-0048-05

**DOI:**10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2023.05.009

## 0 前言

陕西凤县四方金矿有限责任公司(以下简称“四方金矿”)下辖两个选矿厂。其中,一选厂包含磨矿 I、II 两个系列,2003 年经过扩建和后续多次技改,处理矿量 2 200 t/d;二选厂处理矿量 300 t/d<sup>[1]</sup>。

从 2013 年开始,供矿品位持续下降,选厂在满负荷生产的同时,容易受气温变化、原矿品位波动等因素的影响,生产指标优化和成本管控提升难度增大。为积极应对国际金价震荡下行、刚性生产成本不断上升、安全环保压力持续加大的严峻形势,四方金矿根据生产实际,进一步优化一选厂选矿工艺,在磨矿工段增加尼尔森选矿设备。该设备可提前回收矿石中的颗粒金,降低后续浸吸系统的压力,稳定并适当增加处理矿量,降低选矿成本,提高回收率,增加经济效益<sup>[2]</sup>。

尼尔森选矿机回收磨矿系统的金精矿,还需要

经过精矿摇床的二次分选,才能达到后续的酸洗和冶炼工序要求。摇床中尾矿品位相对磨矿流程样要高出 100 倍左右,成分以黄铁矿、磁黄铁矿为主,其中包裹未解离的颗粒金。这部分中尾矿的处理就显得尤为关键,既要尽可能多回收其中的颗粒金,又要减少对现有生产系统的冲击,达到“能收早收”的选矿工艺要求,为后续浸吸系统降压、减负,实现优化工艺指标、降低成本、增加经济效益的目的<sup>[3]</sup>。

## 1 原矿性质

随着矿山服务年限的延长,开采深度不断增加,目前,选厂处理矿石主要以深部矿体矿石为主。与上部矿体相比,深部矿石相关的矿石质量特征,特别是金矿物的赋存状态和自然金嵌布粒度也发生变化,对生产产生重要影响。为了研究深部矿体的特征,采集了 36 个深部矿体的矿石样品,进行了分析和鉴定。根据样品分析报告,结合八卦庙矿区上部矿石质量特征,将上部和深部的矿石质量特征进行对比,包括矿物成分、自然金的产出形态和自然金的形状和粒度等。

### 1.1 矿物成分

八卦庙金矿床上部和深部矿石矿物成分及含量对比见表 1。

**[收稿日期]** 2023-04-21

**[作者简介]** 符元飞(1987—),男,陕西咸阳人,本科,工程师,主要从事选矿工作。

**[引用格式]** 符元飞,曹锋.四方金矿尼尔森重选精矿综合回收工艺优化改造[J].绿色矿冶,2023,39(5):48-52,77.

由表1可以看出,上部矿石和深部矿石的矿物成分变化不大,矿物含量均不足3%,脉石矿物含量基本在97%以上。金属矿物含量少而杂,主要金属矿物为磁黄铁矿、黄铁矿;脉石矿物组成简单,主要为石英、绢云母、白云石等。

表1 上部矿石和深部矿石矿物成分及含量对比 %

矿物类别	矿物名称	上部矿石	深部矿石
矿石矿物	黄铁矿	1.02 ~ 1.20	1.0
	磁黄铁矿	0.72 ~ 1.63	1.5
	黄铜矿、斑铜矿、铜蓝	0.02	微量
	闪锌矿	0.024 ~ 0.04	微量
	方铅矿	0.008 ~ 0.01	微量
	碲铅矿	极微	极微
	褐铁矿	一般小于1	极微
	磁铁矿	一般小于1	极微
	辉铋矿	极微	微量
	碲铋矿	极微	微量
	钛铁矿	极微	少量
	毒砂	极微	微量
	金红石	1	极微
	脉石矿物	石英	30 ~ 40
绢云母		14.60 ~ 31.50	32
铁白云石		10.50 ~ 14.50	12
钠长石		5.5 ~ 6.0	少量
绿泥石		5.10 ~ 6.80	少量
黑云母		极少	极微
炭质		极微	微量
方解石	极微	极微	

## 1.2 自然金的产出形态

八卦庙金矿床上部矿石和深部矿石自然金产出形态占比对比见表2。

由表2可以看出,深部包裹金占比上升明显(从5.24%上升到50.1%),粒间金占比下降明显(从85.32%下降到42.80%),裂隙金含量变化不大。

## 1.3 自然金的形状和粒度

上部矿石与深部矿石的自然金粒度及含量对比见表3。

上部矿石中,自然金的形状多为不规则粒状、它形粒状、近圆粒状、椭圆粒状、麦粒状、细脉状。自然金的粒度较细,主要为中细粒,以粗粒、中粒、细粒、

微粒不均匀分布为特点。其中100 - 74  $\mu\text{m}$  的粗粒金占28.38%,74 - 20  $\mu\text{m}$  的中细粒金占63.24%,20 - 1  $\mu\text{m}$  的细微粒金仅占8.38%。

表2 上部矿石和深部矿石自然金产出形态对比 %

产出形态	上部矿石含量	深部矿石含量	上部矿石平均含量	深部矿石平均含量
脉石粒间金	54.55 ~ 76.2	12.7		
黄铁矿与脉石粒间金	2.13 ~ 26.28	12.0		
磁黄铁矿与脉石粒间金	7.13 ~ 10.06	—	85.32	42.80
石英和白云石之间金	—	18.1		
黄铁矿粒间金	0.22	—		
褐铁矿与脉石粒间金	5.62	—		
裂隙金	黄铁矿裂隙金 磁黄铁矿裂隙金	0.65 ~ 9.20 0.24	7.1	9.44 7.10
包裹金	脉石包裹金 黄铁矿包裹金 磁黄铁矿包裹金	1.92 ~ 2.58 0.39 ~ 2.52 0.07 ~ 0.14	2.2	5.24 50.10

表3 上部矿石和深部矿石自然金粒度及含量对比

自然金粒度/ $\mu\text{m}$	上部矿石占比/%	深部矿石含量/%
粗粒金(100 - 74)	28.38	无
中粒金(74 - 48)	63.24	27.3
细粒金(48 - 20)	8.38	60.8
微粒金(20 - 1)	无	11.7
超微粒金(<1)	无	0.2

深部矿石中,自然金的形状多为不规则粒状,次为片状。自然金颗粒较更细,以细粒金(48 - 20  $\mu\text{m}$ )为主,其次为中粒金(74 - 48  $\mu\text{m}$ )和微粒金(20 - 1  $\mu\text{m}$ )。中粒金占27.3%,细粒金占60.8%,微粒金占11.7%,未发现粗粒金。

由上述对比看出,上部矿石和深部矿石的金分布形态变化不大,多为不规则粒状;但深部矿石的金粒度整体有变小趋势,粗粒金消失,中细粒金占比增大,从不到63.24%上升到88.1%,微粒金占比变化不大。

## 2 矿石质量特征对比

综上所述,上部矿石和深部矿石的矿物成分、自然金的产出形态变化不大,但随着开采深度的增加,自然金的粒度变化明显。深部矿石中金颗粒变细,粗粒金消失,中细粒金占比增大,且包裹金占比增大,粒间金占比下降。因此,深部矿石和上部矿石相

比,选矿难度有所增大,自然金的产出形态和粒度变化对于选矿工艺优化、选矿回收率的提高均有不利影响。

### 3 四方金矿尼尔森重选改造和精矿回收

#### 3.1 四方金矿尼尔森重选改造

四方金矿一选厂采用的尼尔森选矿机,属于间断性排矿设备,刚开始投用安装在一段磨矿回

路,重选回收率在 32% 左右。随着矿区开采深度的增加,因深部矿体原矿性质与上部矿石有所差异,经过大量取样、分析和对比,改造现场连接管路,将尼尔森选矿机安装位置调整到二段磨矿回路,重选回收率提高到 52% 左右,提前将重砂金从磨矿系统回收,避免了单体金在球磨机和分级设备之间形成死循环<sup>[4]</sup>。尼尔森选矿机改造前后流程如图 1 所示。

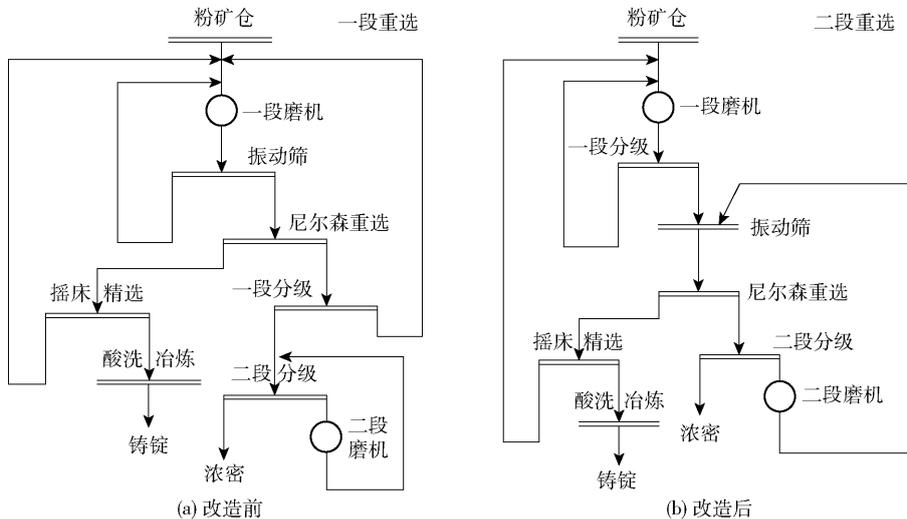


图 1 尼尔森选矿机改造前后流程图

尼尔森选矿机安装位置调整后,入选矿浆细度的提升,使原矿重选回收率提高近 20%,浓密矿浆品位从原来的 0.72 g/t 下降到 0.51 g/t 左右,降幅近 30%。这也间接验证了八卦庙矿区深部矿体矿石性质的变化,特别是矿石中颗粒金粒度变小这一特性。

#### 3.2 尼尔森重选精矿综合回收

尼尔森重选精矿作为重选流程产品,金品位达到 100 ~ 800 g/t,但由于其中非自然金杂质含量过高,不能作为冶炼流程原料,需要进一步处理。根据同行现场生产经验,尼尔森重选精矿多采用摇床二次分选工艺进行处理,该分选流程产生两个产品,一个是摇床精矿,另一个是摇床中尾矿。经过多次现场试验,四方金矿采用两段精选的方式处理尼尔森重选金精矿,一段精选选用细砂摇床,去除尼尔森重选精矿中粗粒石英和云母等杂质;二段精选采用矿泥摇床,去除其中的黄铁矿和磁黄铁矿等。

##### 3.2.1 摇床精矿回收

经过摇床二次分选后,尼尔森重选精矿品位进一步提高,摇床精矿自然金含量能达到 40% ~ 70%。摇床精矿中自然金的含量和同期原矿入选品位密切相关,摇床精矿经过后续的酸洗和冶炼等处理

工序,最后成品为金锭,产品纯金含量在 88% ~ 91%。

根据表 3,原矿中的微粒金含量变化不大,但在实际精选作业生产中,部分微粒金和超微粒金出现“抱团水漂”现象,这可能与硫化矿的疏水性相关,这部分粒度最小的含金矿物,在经过后续酸洗和烘干程序时,多半会溶解和氧化变黑。

##### 3.2.2 摇床中尾矿处理

相对摇床精矿,摇床中尾矿裸露自然金含量较少,但相对于磨机出料口、旋流器沉砂等磨矿流程样品(7 ~ 12 g/t),摇床中尾矿品位要高出很多(100 ~ 300 g/t),多以包裹金和裂隙金等形式存在。摇床中尾矿主要化学成分分析结果见表 4。由表 4 可知,除了金元素以外,银含量也比较高。

摇床中尾矿金品位较高,一方面是因为尼尔森重选设备具有高倍分选重力场(60 ~ 120 G),基本能够回收原矿中的粗粒金、中粒金和部分细微粒金;另一方面是因为摇床设备属于常规重力场,只能部分回收尼尔森重选精矿。对于这类高品位摇床中尾矿,常规处理方案主要包括浸出、浮选和再磨再选等,四方金矿由于生产场地的限制,优先选择再磨再选的方案。

表4 摇床中尾矿主要化学成分分析结果

成分	Au*	Ag*	S	As	Sb	Cu	Pb	SiO <sub>2</sub>
含量/%	109.3	24.0	11.94	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	55.36
成分	C	Zn	Fe	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
含量/%	1.27	0.009	5.64	14.19	7.44	3.25	5.44	1.45

注\*: Au、Ag单位为g/t。

## 4 摇床中尾矿再磨再选方案应用情况及存在问题

### 4.1 再磨再选方案应用情况

再磨再选方案应用后,根据尼尔森选矿机当月产金数据,相较于改造前,每月可多生产金3~5 kg,具体生产数据见表5。

表5 再磨再选方案生产数据对比

技术指标	原矿含金量/kg	重选产金量/kg	重选回收率/%
改造前	80.325	41.822	52.07
改造后	84.150	43.864	52.13

### 4.2 存在问题

四方金矿所在矿区矿石属于超大型低品位矿石,矿石性质决定了企业的基本生产方式,即通过“大矿量”来保障“高产量”,但较大的处理矿量也造成了选矿厂各项生产指标对原矿品位、浓密矿浆品位和磨矿细度等参数非常敏感,尼尔森重选摇床中尾矿再磨再选的应用,使这一问题更加凸显,主要表现在以下几个方面。

1) 深部矿石中的颗粒金粒度变小,要使含金矿物充分从解理面暴露,就要提高磨矿细度。每年4—10月,当地气温高位期,为了更好利用气温这一有利因素,选厂会适当增加球磨机处理矿量,从740 t/班提高到780 t/班,磨矿产品细度-200目含量从76%下降到74%,在原矿品位1.05 g/t情况下,浓密矿浆品位由0.50 g/t上升到0.65 g/t,浓密品位的上升,给后续生产系统造成较大压力。

2) 摇床中尾矿由于产率低、吨位少,前期直接加入磨矿系统进行处理,但由于人工添加量难控制,摇床中尾矿金品位相对较高(100~300 g/t),且波动较大,对生产系统产生较大冲击。特别每月月中和月底进行摇床作业时,后续3~5个班次,由于摇床中尾矿的添加,浓密矿浆品位出现跳跃式波动。

3) 上述两种因素叠加,对生产系统的影响更为突出。每年4—10月温度高位时期,选厂处理矿量

增加、磨矿产品细度下降,同期进行尼尔森精矿摇床作业,对生产现场的指标管控产生更大的不利影响。

### 4.3 解决办法和应用效果

原矿品位、浓密矿浆品位和磨矿细度等指标的波动,对现场生产造成较大影响,不利于生产的稳定和尾渣的管控。为了解决上述问题,一方面,可以采用其他方式回收摇床中尾矿,比如采用浸出和浮选的方法;另一方面,优化再磨再选方案,尽可能减少或者消除高品位摇床中尾矿对生产系统的冲击。

#### 4.3.1 浸出和浮选方案探索

##### 4.3.1.1 摇床中尾矿浸出试验

对摇床中尾矿进行氰化浸出探索试验。氰化浸出验证试验条件:再磨细度为-400目(-0.038 mm)占85.0%,石灰添加量5.0 kg/t,调节矿浆pH值至11.0,矿浆浓度33.0%,氰化钠用量20.0 kg/t,活性炭密度20.0 g/L,采用机械搅拌浸出,浸出时间72.0 h,试验结果见表6。

初步探索试验结果表明,摇床中尾矿经过氰化浸出后,金的浸出率可达到93.98%。

表6 摇床中尾矿氰化浸出探索试验结果

技术指标	摇床中尾矿金品位/g·t <sup>-1</sup>	浸渣金品位/g·t <sup>-1</sup>	金浸出率/%
数值	109.30	6.58	93.98

##### 4.3.1.2 摇床中尾矿浮选试验

将摇床中尾矿作为给矿进行浮选探索试验,试验流程如图2所示,试验结果见表7。试验结果表明,摇床中尾矿经过再磨再选,获得了金品位343.00 g/t、金回收率98.46%的金精矿,尾矿金品位降低至2.28 g/t。

表7 摇床重选中尾矿浮选试验结果

产品名称	产率/%	金品位/g·t <sup>-1</sup>	金回收率/%
金精矿	29.87	343.00	98.46
尾矿	70.13	2.28	1.54
给矿(摇床中尾矿)	100.00	104.05	100.00

### 4.3.2 再磨再选方案优化

相比浸出和浮选两种处理方式,摇床中尾矿返

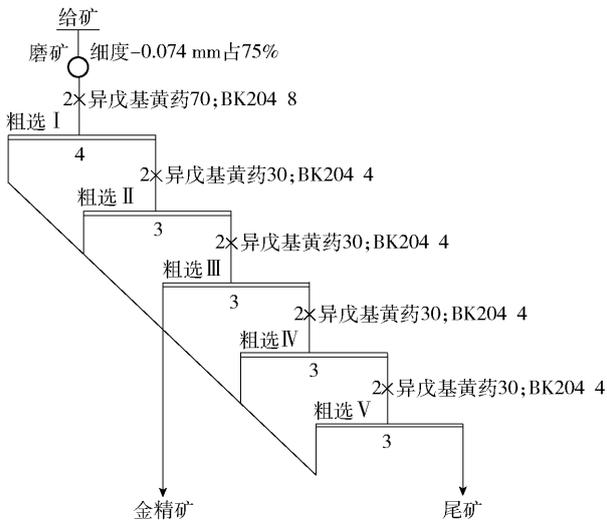


图2 摇床中尾矿浮选试验流程图

回磨矿系统的再磨再选优化方案不需要增加设备、不占用投资和场地,具有投资小、见效快和管理简单、运行成本低的优势。通过再磨后,部分包裹金可以二次解离,从而进一步提高金的回收率。改造后,摇床尾矿连续、均匀返回磨矿系统,确保了生产系统的稳定性。

为了尽可能减少再磨再选方案对磨矿系统的冲击,在重选精矿摇床作业中增加了自动化控制系统(图3)。通过自动化控制系统,控制摇床中尾矿少批量、多批次返回磨矿系统,既能确保较高的回收率,也能消除对系统产生的冲击,自动化系统的应用,具有运行稳定、安全高效的特征。

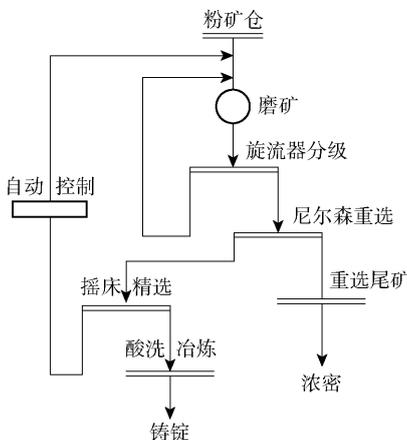


图3 摇床中尾矿处理流程图

本次技术改造项目总投资 10 万元左右,主要包括 DN100 矿浆气动阀、DH48S-S 数显时间继电器、DN50 电磁水阀以及附属设施。项目实施后,由以往每天人工精摇作业将尾矿集中返回磨矿系统的模式,转换为定时自动精摇将尾矿连续、均匀返回磨矿系统的模式,确保了生产系统的稳定,减少了后续工序的药剂用量。

该系统投用近 2 年来,入浸品位由 0.68 g/t 降低至 0.50 g/t<sup>[5]</sup>。截至 2023 年 9 月,处理矿量增加 1 000 t/月,尾渣降低了 0.01 g/t,保持了后续工序的稳定性,减少了后续流程药剂用量,减轻了人工劳动强度,提升了现场生产管控水平,累计创造经济效益 1 222 万元。

### 5 结束语

四方金矿尼尔森重选精矿综合回收工艺优化改造,既符合“能收早收、能收尽收”的选矿原则,也为后续工序真正降压、减负,实现了优化工艺指标、降低生产成本、增加经济效益的目的。

项目改造过程中,自动控制系统的应用,对选厂生产优化和黄金安全管理意义重大,实现了精矿精选无人参与、连续作业,保证了生产系统的稳定性,提升了精选环节的贵金属安全管理水平,对国内其他矿山具有一定的参考和借鉴意义。

#### [参考文献]

[1] 杨思军. 四方金矿选矿工艺技术改造与生产实践[J]. 黄金, 2013, 34(9): 65-67.  
 [2] 李显辉, 田晟, 曹锋, 等. 尼尔森选矿设备在四方金矿的改造实践[J]. 矿山机械, 2016, 44(6): 52-55.  
 [3] 张金钟, 姜良友, 吴振祥, 等. 尼尔森选矿机及其应用[J]. 有色矿山, 2003(3): 28-31.  
 [4] 侯明亮, 武俊杰, 崔长征. 陕西某金矿石尼尔森选矿试验[J]. 金属矿山, 2013, 42(5): 88-91.  
 [5] 曹锋, 符元飞. 尼尔森重选精矿摇选作业改造过程及生产实践[J]. 矿山机械, 2022, 50(12): 68-69.

(下转第 77 页)

## Analysis of Municipal Solid Waste Characteristics Based on Solid Recovered Fuel Technology

ZHANG Bangchao, LIU Jie

**Abstract:** Municipal solid waste has a wide range of sources, and the physical composition and chemical composition of various solid waste are quite different. Accurate investigation and analysis of waste sources provide a basis for the planning, collection, transportation and comprehensive utilization of solid waste treatment. Solid recovered fuel can truly realize the reduction and recycling of solid waste. In this paper, taking the representative urban solid waste as an example, combined with the current vigorous development of solid recovered fuel technology at home and abroad, investigated solid waste from different sources, deeply analyzed its total amount, composition, moisture content and calorific value and other characteristics, so as to provide the original analysis for the classification of solid waste and the preparation of solid recovered fuel products to.

**Key words:** municipal solid waste (MSW); sorting treatment; source investigation; thermal analysis; waste treatment

(上接第 52 页)

## Optimization of Comprehensive Recovery Process of Nelson Gravity Concentrate in Sifang Gold Mine

FU Yuanfei, CAO Feng

**Abstract:** With the increase of mining depth in Baguamiao mining area, the properties of raw ore have changed, especially the gold content of each particle size of raw ore has changed, and the original concentrate treatment process has been unable to meet the on-site production. Based on the analysis and comparison of the mineral composition, natural gold output form, shape and particle size of the upper ore and the deep ore, this paper put forward the reconstruction scheme of Nelson ore machine process gravity separation. Aiming at the comprehensive recovery and utilization of Nelson concentrate, the optimal treatment method was determined by comparing the schemes of leaching, flotation and regrinding. After the traditional shaking table separation of Nielsen gold concentrate, the grade of medium tailings is high. Through the automatic control system, the multi-batch and small-batch return to the production system for regrinding and re-separation can not only maintain a high recovery rate, but also eliminate the impact of high-grade tailings on the production system. Compared with the leaching and flotation recovery methods, the existing processes and equipment are better utilized, the cost of beneficiation is reduced, and better economic benefits are achieved.

**Key words:** Nielsen gravity separator; comprehensive recovery; optimization and transformation; gold mine