

选择性磨矿技术优化生物氧化工艺研究及工业应用

杨 鹏, 韩永群, 田立国, 杨 超, 石 岐, 张耀军, 赵俊蔚

(贵州锦丰矿业有限公司)

摘要:针对金精矿生物氧化工艺中矿物单体解离度不足导致的氧化慢、效率低等问题,聚焦选择性磨矿与生物氧化—炭浸提金工艺的协同作用,结合试验与工业实例,分析其对氧化效率、金回收率及污染物控制的影响。工业应用结果表明:采用选择性磨矿技术后,S²⁻氧化率提高了0.71个百分点,炭浸金回收率提升了3.81个百分点;炭浸尾液中硫氰化物、亚铁氰化物质量浓度分别下降了34.40%、27.99%。该技术可为黄金行业生物氧化工艺提质增效与污染物减量化提供参考。

关键词:选择性磨矿;艾砂磨机;生物氧化;污染物过程控制;炭浸;硫氰化物

中图分类号:TD953

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)11-0079-07

doi:10.11792/hj20251112

引言

中国低品位、难处理金矿约占全国已探明黄金总储量的30%^[1]。随着矿产资源开发需求的日益增长,传统选矿工艺面临着诸多挑战,如氰化法能耗高、污染物浓度高等问题^[2]。生物氧化提金技术作为一种新型预处理方法,已广泛应用于含砷、含硫等难处理金精矿的选治过程中,但其氧化周期长(通常需5~6 d)^[3]、有价元素回收效率波动大(金浸出率70%~85%)^[4]等问题仍待优化。近年来,选择性磨矿技术

通过调控矿物解离,已成为优化生物氧化效率的关键手段,其通过矿物硬度差异实现定向破碎,可使金矿物单体解离度提升15%~20%,并暴露反应界面^[5],为生物氧化工艺优化提供新路径。

1 原料性质

1.1 矿物组成及化学成分分析

试验所用精矿原料为贵州锦丰矿业有限公司浮选工艺生产的金精矿(试验中称常规精矿),其矿物组分分析结果见表1,化学成分分析结果见表2。

表1 金精矿矿物组成分析结果

Table 1 Analysis results of mineral composition of gold concentrate

金属矿物		相对含量/%	非金属矿物		相对含量/%
黄铁矿、磁黄铁矿		23.51	雌黄、雄黄		0.21
毒砂		3.85	长石、云母等		29.87
黄铜矿、辉铜矿、黝铜矿、砷黝铜矿		0.28	石英		23.30
闪锌矿、方铅矿		0.15	方解石、白云石		11.33
辉锑矿、辰砂、辉钼矿		0.12	钙铝榴石、钙铁榴石及角闪石等		5.24
褐铁矿		0.04	磷灰石、金红石、锆石及石墨等		1.62
磁铁矿、赤铁矿		0.48	小计		71.57
小计		28.43			

表2 金精矿化学成分分析结果

Table 2 Analysis results of chemical composition of gold concentrate

成分	Au ¹⁾	Ag ²⁾	Cu	Pb	Zn	Fe	S	Hg
w/%	24.85	7.37	0.099	0.017	0.082	13.74	13.12	0.038
成分	Sb	As	C	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	
w/%	0.075	1.94	2.36	4.26	1.25	43.27	11.51	

注:1)w(Au)/(g·t⁻¹);2)w(As)/(g·t⁻¹)。

由表1可知:该金精矿中金属矿物占28.43%,非金属(脉石)矿物占71.57%。金属矿物中黄铁矿与磁黄铁矿合计占比23.51%,毒砂占3.85%,是主要载金矿物;非金属矿物以长石、云母、石英为主。毒砂是载金矿物中砷含量最高、对金浸出影响最大的组分。因此,后续需通过选择性磨矿技术减少其对氰化物的消耗及污染物的产生^[6]。

收稿日期:2025-07-10; 修回日期:2025-08-13

作者简介:杨 鹏(1984—),男,工程师,从事有色金属选冶研究工作;E-mail: peng.yang@gzjinfenggold.com

由表2可知:该金精矿含硫13.12%、砷1.94%、铁13.74%,为主要耗氧耗氯组分^[7]。生物氧化不完全时,它们在碱性氯化物溶液中有较高的溶解度,大量消耗溶液中的氯化物和溶解氧,形成各种氯络合物和硫氯化物,并影响金的浸出^[8]。

1.2 粒度测定

黄铁矿和毒砂是金精矿中主要的金属硫化物,其

粒度分布直接影响磨矿与氧化效率,主要金属矿物粒度测定结果见表3。由表3可知:黄铁矿粒度主要分布在-0.037~+0.005 mm,占86.68%;毒砂粒度更细,主要分布在-0.037 mm,占96.44%。黄铁矿、毒砂充分解离可为生物氧化提供充足反应界面,需通过选择性磨矿将矿物细化至38 μm以下^[9]。

表3 主要金属矿物粒度测定结果

Table 3 Determination results of particle size of main metal minerals

粒径/mm	+0.053	-0.053~+0.037	-0.037~+0.010	-0.010~+0.005	-0.005	%
黄铁矿	0.66	4.93	53.93	32.75	7.73	100.00
毒砂	—	3.56	38.13	41.87	16.44	100.00

2 试验设备及方法

2.1 试验设备

2.1.1 选择性磨矿设备

试验选用艾砂磨机作为核心选择性磨矿设备,不同试验阶段磨机容积分别为:小型试验10 L、半工业试验100 L、工业应用1 000 L,磨矿介质均采用φ2.0~4.0 mm陶瓷球。相较于传统球磨机,艾砂磨机具有节能、开路磨矿、排料粒级分布窄等优势,可有效避免矿物过磨,促进金属硫化物与脉石矿物分离。例如:杨旭升等^[10]采用艾砂磨机替代原塔磨机+旋流器闭路流程后,磨矿细度-38 μm占比从85%提升至96%,浸出尾渣金品位从1.72 g/t降至1.42 g/t;李环等^[11]在某黄金冶炼公司的研究也证实,艾砂磨机细磨产品的粒级集中度比球磨机高12%~15%,为后续生物氧化提供了更优的物料条件。

2.1.2 生物氧化与炭浸设备

生物氧化设备:小型试验采用8 L生物氧化反应器,半工业与工业试验采用1 000 L生物氧化反应器;炭浸试验设备:小型与半工业试验采用3 L滚瓶试验装置,工业应用采用5级串联炭浸(CIL)浸出槽(单槽容积420 L),该规模设计参考了高明炜等^[12]在遂昌金矿的工业应用经验,确保设备匹配度与工艺稳定性。

2.2 试验方法

选择性磨矿试验:采用可调节参数的艾砂磨机,通过改变磨矿时间、转速、球料比等变量,制备不同粒度组成的金精矿,重点控制-38 μm粒级占比在75%~99%,磨矿参数设定参考肖庆飞等^[13]提出的选择性磨矿“施力状况调节矿物磨碎行为”的研究结论,确保磨矿过程的选择性。

生物氧化试验:在模拟工业条件的生物反应器中进行,接种特定微生物菌群,严格控制反应温度、pH、溶解氧等环境参数,监测S、S²⁻、Fe²⁺、Au等指标的变

化,微生物菌群的选择与培养方法参照杨洪英等^[14]在《细菌冶金学》中提出的“适应含砷金矿氧化的菌群驯化流程”。

炭浸试验:使用新活性炭,测定不同磨矿细度下金吸附率与氯化物浓度变化,分析炭浸尾液中硫氯化物、亚铁氯化物、砷等污染物质量浓度。污染物检测方法依据韩永群等^[15]采用的异烟酸吡唑啉酮分光光度法与电感耦合等离子体发射光谱法。

3 试验结果与分析

3.1 小型试验

3.1.1 艾砂磨机与球磨机细磨精矿对比试验

分别采用艾砂磨机和球磨机制备不同细度的金精矿并开展生物氧化—炭浸试验,结果见表4。

表4 艾砂磨机与球磨机细磨精矿生物氧化—炭浸试验结果

Table 4 Results of fine grinding concentrates biooxidation-carbon-in-leach (CIL) test of IsaMill and ball mill

试验指标	常规精矿	艾砂磨机细磨精矿	球磨机细磨精矿	
w(磨矿细度-38 μm)/%	79.32	84.81	92.82	84.86
氧化渣金品位/(g·t ⁻¹)	27.10	27.86	28.5	27.55
炭浸渣金品位/(g·t ⁻¹)	2.07	1.70	1.36	1.83
金浸出率/%	92.36	93.90	95.23	93.36
				94.77

由表4可知:相近磨矿细度下,艾砂磨机细磨精矿的炭浸渣金品位更低,金浸出率更高。艾砂磨机通过“大磨大、小磨小”的选择性磨矿机制,减少细泥对金颗粒的包裹与对活性炭吸附的干扰;而球磨机细磨精矿粒级分布宽,易产生过磨细泥,降低浸出效率^[16-17]。

3.1.2 艾砂磨机细磨精矿与常规精矿对比试验

艾砂磨机制备细磨精矿与常规精矿进行生物氧化—炭浸对比试验,结果见表5。

表5 细磨精矿与常规精矿生物氧化—炭浸试验结果

Table 5 Results of biooxidation-carbon-in-leach (CIL) test of finely ground concentrate and conventional concentrate

试验指标	常规精矿	细磨精矿
w(磨矿细度-38 μm)/%	74.46	95.46
S ²⁻ 氧化率/%	97.59	98.04
As氧化率/%	82.76	81.09
金回收率/%	92.80	95.38
金浸出率/%	93.10	95.71
金吸附率/%	99.67	99.66

表6 细磨精矿与常规精矿污染物过程控制试验结果

Table 6 Results of pollutant process control test of finely ground concentrate and conventional concentrate

精矿类型	w(磨矿细度-38 μm)/%	氧化率/%				ρ(炭浸尾液污染物)/(mg·L ⁻¹)		
		As	Fe ²⁺	S	S ²⁻	SCN ⁻	[Fe(CN) ₆] ⁴⁻	As
常规精矿	79.32	81.52	71.97	80.68	94.54	2 117	680	18.05
	84.77	76.78	67.85	83.74	95.46	1 841	530	19.11
细磨精矿	92.82	82.84	86.90	89.85	97.28	1 105	424	15.18
	99.08	80.09	79.43	95.28	97.19	998	392	19.11

效果优于常规精矿,随着S²⁻、Fe²⁺氧化率的提升,炭浸尾液硫氰化物和亚铁氰化物浓度大幅下降^[15]。黄铁矿与氰化物的反应(2FeS₂+16NaCN+O₂+2H₂O→2Na₄[Fe(CN)₆]₂+4NaSCN+4NaOH)中,若FeS₂在生物氧化阶段充分氧化为Fe³⁺与SO₄²⁻,则不会再与氰化物反应生成污染物。

3.2 半工业试验

3.2.1 细磨精矿与常规精矿一级生物氧化对比试验

以贵州锦丰矿业有限公司选矿厂生产现场的金精矿为原料,采用100 L艾砂磨机进行选择性细磨,对比细磨精矿(-38 μm占比86.65%,93.51%)与常规精矿(-38 μm占比79.63%~80.58%)生物氧化—炭浸浸出效果。细磨精矿加入29号生物氧化反应器进行一级生物氧化,常规精矿分别加入27号、30号生物氧化反应器进行平行对比试验。细磨精矿与常规精矿一级生物氧化试验结果见表7。在此基础上,将2种精矿的一级生物氧化渣进行炭浸试验,结果见表8。

表7 细磨精矿与常规精矿一级生物氧化试验结果

Table 7 Results of primary biooxidation test on finely ground concentrate and conventional concentrate

试验指标	常规精矿			细磨精矿		
w(磨矿细度-38 μm)/%	79.63	80.58	79.63	80.11	86.65	93.51
ρ(Fe ²⁺)/(g·L ⁻¹)	0.22	0.24	0.17	0.22	0.12	0.15
ρ(氧化渣As)/(mg·L ⁻¹)	6 038	3 755	6 019	3 755	6 365	3 621
w(氧化渣S ²⁻)/%	2.35	2.02	2.03	1.94	1.21	0.94

由表5可知:通过艾砂磨机细磨处理后,破坏了脉石矿物与金属硫化物的包裹关系,使金颗粒充分暴露^[18-19]。当磨矿细度-38 μm占比由74.46%提高至95.46%时,经生物氧化—炭浸工艺处理后,金浸出率由93.10%提升至95.71%,提高2.61个百分点。

3.1.3 污染物过程控制试验

艾砂磨机细磨精矿与常规精矿分析的氧化效果和炭浸尾液主要污染物结果见表6。

由表6可知:细磨精矿后,Fe²⁺、S、S²⁻的生物氧化

表8 细磨精矿与常规精矿一级生物氧化渣炭浸试验结果

Table 8 Results of primary bio-oxidation slag CIL test on finely ground concentrate and conventional concentrate

试验指标	常规精矿			细磨精矿	
w(磨矿细度-38 μm)/%	80.58	80.11	86.65	93.51	
金浸出率/%	76.34	75.96	75.8	75.94	89.79
平均金浸出率/%	76.15	75.87	89.97	91.71	91.82

由表7可知:常规精矿氧化液中Fe²⁺质量浓度为0.17~0.24 g/L,细磨精矿降至0.12~0.15 g/L,表明经过选择性细磨后,Fe²⁺氧化更彻底;常规精矿氧化渣含S²⁻为1.94%~2.35%,细磨精矿降至0.94%~1.21%,S²⁻氧化率提升约40%;细磨精矿(-38 μm含93.51%)氧化渣中As含量较低,表明细磨精矿氧化过程更稳定。

由表8可知:细磨精矿(-38 μm占比93.51%)平均金浸出率为91.77%,常规精矿(-38 μm占比80.58%)为76.15%。细磨精矿的充分解离,显著提高金浸出率。

3.2.2 细磨精矿与常规精矿二级生物氧化—炭浸试验

取常规精矿(-38 μm占比80.58%)和细磨精矿(-38 μm占比93.51%)的一级生物氧化渣样品在实验室进行二级生物氧化试验,结果见表9。将二级生物氧化渣进行炭浸试验,结果见表10。

由表9可知:常规精矿需46 h完成二级氧化,细磨精矿仅需22 h,氧化效率提升52.2%;常规精矿二

表9 细磨精矿与常规精矿二级生物氧化试验结果

Table 9 Results of second-level biooxidation test on finely ground concentrate and conventional concentrate

样品名称	金品位/(g·t ⁻¹)	w(As)/%	w(Fe ²⁺)/%	w(S)/%	w(S ²⁻)/%
常规精矿 (-38 μm 占比 80.58 %)	一级氧化渣	29.2	0.519 1	6.693 3	6.78
	二级氧化渣	31.2	0.326 8	3.303 9	2.52
	ρ (氧化液)/(mg·L ⁻¹)	0.001			
细磨精矿 (-38 μm 占比 93.51 %)	二级氧化时间/h		46		
	一级氧化渣	28.6	0.399 6	4.293 8	4.89
	二级氧化渣	30.4	0.381 6	3.452 3	2.48
ρ (氧化液)/(mg·L ⁻¹)	0.001				
	二级氧化时间/h		22		

表10 细磨精矿与常规精矿二级生物氧化渣炭浸试验结果

Table 10 Results of second-level bio-oxidation slag CIL test on finely ground concentrate and conventional concentrate

试验指标	常规精矿	细磨精矿
w(磨矿细度 -38 μm)/%	80.58	80.11
氧化渣金品位/(g·t ⁻¹)	31.2	29.9
炭浸渣金品位/(g·t ⁻¹)	1.39	1.64
金浸出率/%	95.58 95.51 94.62 94.45 96.68 96.68 95.58 95.61	
平均金浸出率/%	95.55	94.54
	96.68	95.60

表11 细磨精矿与常规精矿污染物过程控制试验结果

Table 11 Results of pollutant process control test of finely ground concentrate and conventional concentrate

样品名称	氧化率/%				炭浸尾液污染物质量浓度/(mg·L ⁻¹)		
	As	Fe ²⁺	S	S ²⁻	SCN ⁻	[Fe(CN) ₆] ⁴⁻	As
常规精矿(-38 μm 占比 80.58 %)	62.96	49.36	36.68	13.43	1 763	523	17.18
常规精矿(-38 μm 占比 80.11 %)	67.77	54.36	41.73	18.18	1 814	541	18.56
细磨精矿(-38 μm 占比 93.51 %)	95.50	80.40	50.72	24.76	1 063	445	17.35

的。二级污染物氧化渣经炭浸后,炭浸尾液中 SCN⁻、[Fe(CN)₆]⁴⁻的质量浓度显著降低。

4 工业应用

4.1 工艺流程概况

贵州锦丰矿业有限公司处理的矿石属于典型的卡林型含砷、含碳贫硫化物难处理金矿石,金主要以微细粒浸染在黄铁矿和砷黄铁矿中^[20]。选矿厂生物氧化设计处理量 790 t/d,原工艺流程为:碎矿—磨矿—浮选—BIOX 生物预氧化—逆流洗涤—炭浸(CIL)—解析电解—熔炼合质金,BIOX 生物氧化流程见图 1。

基于半工业试验结果,选矿厂新增 1 台 ALC-1 000 L 艾砂磨机,用于对金精矿进行选择性磨矿,改造后工艺流程为:精矿浓密机—艾砂磨机—生物氧化

级氧化渣中 S 质量分数从 6.78 % 降至 2.52 %,细磨精矿从 4.89 % 降至 2.48 %,表明二级氧化更彻底;二者氧化液中 Au 质量浓度均为 0.001 mg/L,未出现金随液体流失的现象,证明细磨不会导致金溶解损失。

由表 10 可知:常规精矿金浸出率低于细磨精矿,说明精矿经过细磨后,可打开一些被脉石包裹的黄铁矿颗粒,进而提高了氧化率和浸出率。

3.2.3 污染物过程控制试验

考察了细磨精矿与常规精矿最终污染物指标差异,试验结果见表 11。

由表 11 可知:细磨精矿(-38 μm 占比 93.51 %)二级生物氧化 As、Fe²⁺、S 和 S²⁻的氧化率均高于常规精矿

工艺(见图 2)。改造无需改变原有生物氧化、炭浸设备,仅在精矿进入氧化罐前增加细磨环节,投资成本低且改造周期短。

4.2 工业应用前后指标对比

以 2024 年 1—9 月数据为基础,对比选择性磨矿应用前(1—4 月)、过渡期(5 月)、应用后(6—9 月)的关键指标。艾砂磨机应用前后主要指标对比结果见表 12。

由表 12 可知:艾砂磨机选择性磨矿应用前,生物氧化给矿磨矿细度-38 μm 平均占比 79.83 %,应用后提升至 91.77 %;应用前给矿量平均 8.46 t/h,应用后提升至 11.05 t/h,提高 30.60 %,为原设计处理量的 1.3 倍;应用前 S²⁻ 氧化率平均 97.03 %,应用后提升至 97.74 %,提高 0.71 百分点;应用前金浸出率平均 90.03 %,应用后提升至 93.84 %,提高 3.81 百

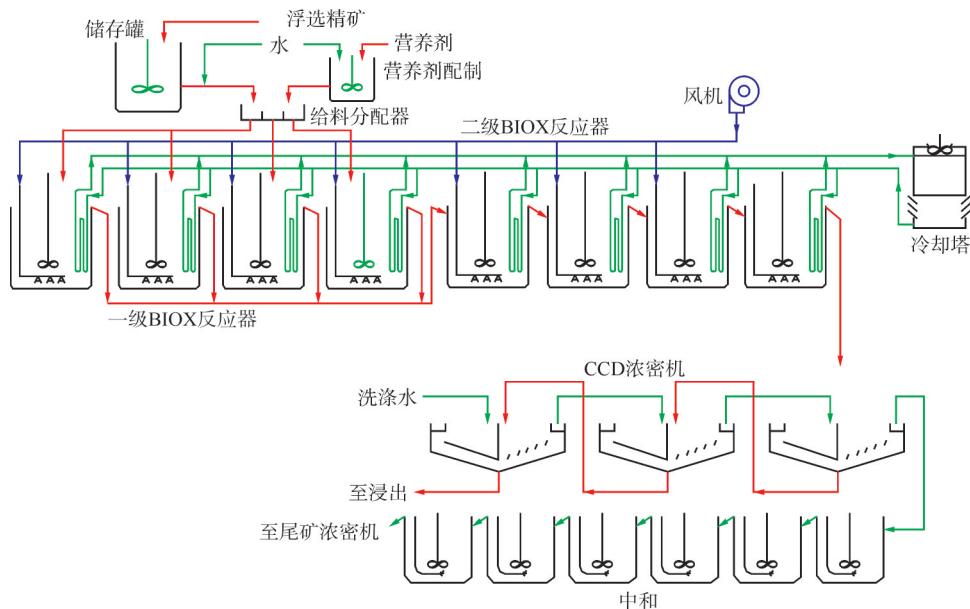


图1 BIOX生物氧化流程图

Fig. 1 Process flowchart of BIOX biooxidation

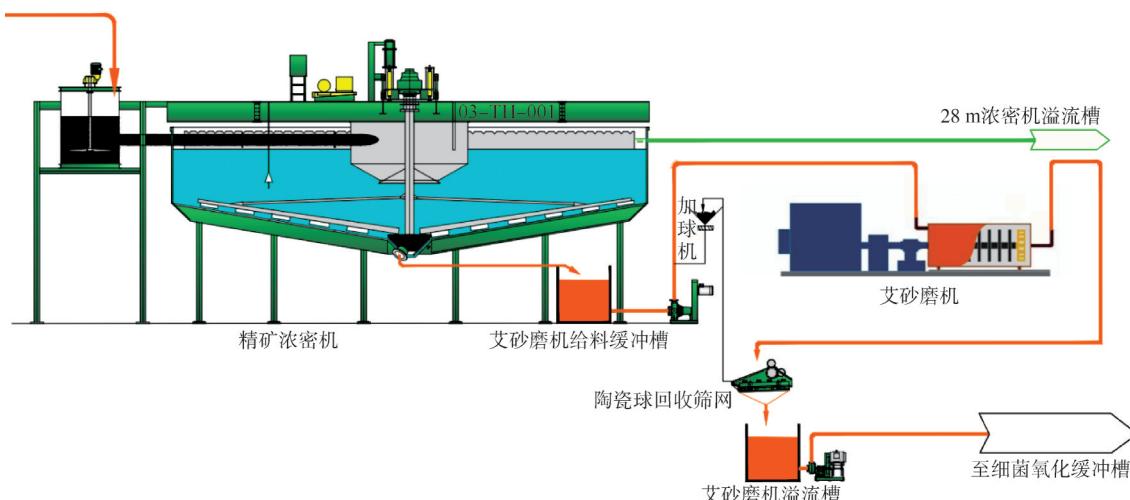


图2 艾砂磨机流程图

Fig. 2 IsaMill process

分点;应用前炭浸渣金品位平均2.17 g/t,应用后降至1.37 g/t。

表12 选择性磨矿应用前后主要指标对比结果

Table 12 Comparison of monthly main indicators before and after selective grinding application

应用阶段	月份	给矿量/(t·h ⁻¹)	w(磨矿细度-38 μm)/%	w(S ²⁻)/%	S ²⁻ 氧化率/%	炭浸渣金品位/(g·t ⁻¹)	金浸出率/%
应用前	1月	8.29	81.12	9.98	97.28	2.45	87.81
	2月	8.22	79.83	11.88	97.33	2.15	90.18
	3月	8.69	79.97	9.25	97.00	2.31	90.21
	4月	8.64	78.40	9.38	96.51	1.75	91.9
过渡期	平均值	8.46	79.83	10.12	97.03	2.17	90.03
	5月	9.56	90.90	9.92	97.88	1.71	93.31
	6月	10.76	92.67	9.72	97.88	1.51	93.55
	7月	11.65	93.21	9.62	97.52	1.36	93.8
应用后	8月	11.25	91.18	9.63	97.82	1.41	93.56
	9月	10.53	90.03	10.84	97.72	1.20	94.44
	平均值	11.05	91.77	9.95	97.74	1.37	93.84

4.3 污染物过程控制效果

工业应用前后(2024年1—8月)污染控制效果按

表13 艾砂磨机选择性磨矿应用前后炭浸尾液污染物浓度

Table 13 Concentration of pollutants in effluent of CIL test before and after selective grinding application of IsaMill

应用阶段	月份	生物氧化		ρ (炭浸尾液)/(mg·L ⁻¹)		
		w (磨矿细度-38 μm)/%	S ²⁻ 氧化率/%	[Fe(CN) ₆] ⁴⁻	As	SCN ⁻
应用前	1月	81.12	97.28	483	18.05	1 531
	2月	79.83	97.33	479	15.18	1 567
	3月	79.97	97.00	425	15.40	1 678
	4月	78.40	96.51	386	9.96	1 341
平均值		79.83	97.03	443	14.65	1 529
过渡期	5月	90.90	97.88	339	19.32	1 095
	6月	92.67	97.88	342	21.31	1 057
	7月	93.21	97.52	293	19.10	1 120
	8月	91.18	97.82	325	19.24	979
应用后	9月	90.03	97.72	317	17.33	856
	平均值	91.77	97.74	319	19.25	1 003

浓度1 529 mg/L,应用后降至1 003 mg/L,降幅34.40%;应用前亚铁氰化物[Fe(CN)₆]⁴⁻平均质量浓度443 mg/L,应用后降至319 mg/L,降幅27.99%。从月度变化趋势来看,应用后SCN⁻与[Fe(CN)₆]⁴⁻质量浓度均呈现“快速下降后稳定”的趋势;1—4月SCN⁻质量浓度为1 341~1 678 mg/L,5月(过渡期)降至1 095 mg/L,6—9月稳定在856~1 120 mg/L,无大幅波动;1—4月[Fe(CN)₆]⁴⁻质量浓度波动在386~483 mg/L,5月降至339 mg/L,6—9月稳定在293~342 mg/L,稳定性良好。这一趋势表明,选择性磨矿对污染物的控制效果具有长期稳定性,不会因原料成分、操作条件的细微变化而失效,适合工业长期运行。

4.4 效益分析

应用选择性磨矿技术后产生的经济效益、环境效益与社会效益呈现显著协同提升。①经济效益方面:金浸出率提升3.81个百分点,每年多回收黄金53.28 kg,以当时金价计算新增产值3 197万元;同时处理量提升30.60%的情况下,每吨精矿电耗减少51.65元,年节省电费371.88万元;氰化钠消耗量年减少47.52 t,节省成本64.15万元;尾液处理成本从18.76元/m³降至13.13元/m³,年节省123.25万元。虽新增艾砂磨机运行成本238万元/a及絮凝剂费用11万元/a,但净利润仍达3 501万元/a。②环保效益上:该技术通过“源头—过程”协同控制,年减少硫氰化物排放115.25 t、亚铁氰化物排放27.24 t,降低尾液处理难度与成本,同时生物氧化效率提升减少废水排放量,从根本上降低环境负荷。③社会效益层面:其为低品位难处理金矿高效利用提供可行方案,推动微生物技术与磨矿

月平均数据统计结果见表13。

由表13可知:应用前硫氰化物(SCN⁻)平均质量

工艺结合的生物湿法冶金技术发展,助力企业在不新增大量设备情况下实现扩能减排、提升竞争力,更为黄金行业生物预氧化工艺的提质增效与污染控制提供技术参考,具备高推广价值。

5 结论与展望

通过小型试验、半工业试验与工业应用,系统验证了选择性磨矿技术对生物氧化—炭浸提金工艺的优化效果,主要结论如下:

1)磨矿与氧化效率协同提升:选择性磨矿将金精矿磨矿细度从-38 μm占比79.83%提升至91.77%,S²⁻氧化率提升0.71个百分点,证明选择性磨矿能够显著提升矿物反应效率,为后续炭浸工艺奠定了良好基础;同时,艾砂磨机的窄粒级分布避免了矿物过磨,确保氧化渣沉降性能良好,仅需适度增加絮凝剂用量即可满足固液分离要求。

2)金回收率显著提高:选择性磨矿工业应用后,炭浸金回收率从90.03%提升至93.84%,提高3.81个百分点,且细磨精矿的金流失量未增加。

3)污染物减量化效果稳定:工业应用后,炭浸尾液中硫氰化物、亚铁氰化物质量浓度分别下降34.40%、27.99%,降低了氰化钠消耗量与废水处理成本,实现了“增产不增污”。

未来研究可进一步优化磨矿参数(如转速、球料比),探索“最低磨矿成本-最高氧化效率”的平衡点,开展选择性磨矿参数优化模型研究;结合微生物选育技术,研究细磨矿物与高效菌种的协同作用,进一步提升生物氧化效率;拓展技术应用范围,将其推广至

含砷、含硫等其他难处理矿产资源加工领域,推动行业绿色发展。

[参考文献]

- [1] 北京中经纵横经济研究院课题组.国内黄金矿的提取技术和发展趋势及现状市场研究[R].北京:北京中经纵横经济研究院,2025.
- [2] 中国黄金协会技术标准委员会.黄金行业氰渣危险特性精准分类识别与风险管控技术获新突破[R].北京:中国黄金协会,2025.
- [3] 赵国惠,张世镖,赵俊蔚,等.一种难处理金精矿的微泡强化生物氧化预处理方法:201610957133.7[P].2017-05-10.
- [4] 邓莎,刘兆悦,杨玮,等.含砷金矿微生物预氧化过程强化方法研究进展[J].矿产保护与利用,2021,41(6):150-156.
- [5] 选矿试验:矿业开发的核心驱动力 [EB/OL].(2025-02-22)[2025-07-10]. https://www.sohu.com/a/862220243_121123898.
- [6] 李海波,曹宏斌,张广积,等.细菌氧化浸出含金砷黄铁矿的过程机理及电化学研究进展[J].过程工程学报,2006,6(5):849-856.
- [7] 杨显万.微生物湿法冶金[M].北京:冶金工业出版社,2003.
- [8] 郑可利,华杰.某浮选金精矿的氰化浸出工艺研究[J].金属矿山,2003(8):21-22,44.
- [9] 郭桂荣,童伟,李建康,等.艾砂磨机在灵宝黄金某冶炼厂焙烧金矿细磨中的应用[J].矿治工程,2023,43(6):97-99.
- [10] 杨旭升,林明国,章恒兴,等.艾砂磨机在某冶炼厂的试验应用[J].黄金,2018,39(4):44-47.
- [11] 李环,卞小冬,朱金超,等.艾砂磨机在某黄金冶炼公司的试验研究[J].黄金,2022,43(5):63-67.
- [12] 高明炜,童伟,叶跃威,等.艾砂磨机在遂昌金矿的试验应用[J].黄金,2017,38(3):63-67.
- [13] 肖庆飞,罗春梅,段希祥,等.选择性磨矿的进展及应用[C]//中国冶金矿山企业协会矿山技术委员会,中钢集团马鞍山矿山研究院,《金属矿山》杂志社,《现代矿业》杂志社,中国矿业114网.2010中国矿业科技大会论文集.昆明:昆明理工大学,云南大学,2010:617-622.
- [14] 杨洪英,杨立.细菌冶金学[M].北京:化学工业出版社,2006.
- [15] 韩永群,田立国,张耀军,等.生物法处理金矿含氰废水同步收金技术研究与应用[J].有色金属(冶炼部分),2024(3):140-147.
- [16] 陈晓东.艾砂磨机在细磨中的应用[J].黄金,2023,44(1):58-62.
- [17] 范富荣,赖桂华.艾砂磨机在多宝山铜矿选矿厂的应用[J].黄金,2019,40(10):52-56.
- [18] 黄子杰,孙伟,高志勇.磨矿对矿物表面性质和浮选行为的影响[J].中国有色金属学报,2019,29(11):2671-2680.
- [19] 高明炜.澳大利亚有色选矿技术的回顾与发展探讨[C]//中国有色金属学会.有色金属工业科学发展——中国有色金属学会第八届学术年会论文集.布里斯班:昆士兰大学,JK矿业技术公司,2010:39-44.
- [20] 徐亮,鲜海洋,杨文淋,等.水银洞卡林型金矿载金黄铁矿含砷环带特征及砷赋存状态[J].矿物岩石,2025,45(1):55-64.

Application research on optimizing bio-oxidation process and pollutant control through selective grinding technology

Yang Peng, Han Yongqun, Tian Liguo, Yang Chao, Shi Qi, Zhang Yaojun, Zhao Junwei
(Guizhou Jinfeng Mining Limited)

Abstract: In response to issues such as slow oxidation rate and low efficiency caused by insufficient mineral liberation in the bio-oxidation process of gold concentrate, the synergistic effect between selective grinding and the bio-oxidation-carbon-in-leach for gold extraction process was studied. Through experimental and industrial case studies, its impacts on oxidation efficiency, gold recovery, and pollutant control were analyzed. Industrial application results demonstrate that after implementing selective grinding technology. The S^{2-} oxidation rate increases by 0.71 %, and the carbon-in-leach gold recovery improves by 3.81 %. The concentrations of thiocyanate and ferrocyanide in the carbon-in-leach tailings decrease by 34.40 % and 27.99 %, respectively. This technology can provide valuable reference for enhancing quality and efficiency and reducing pollution in bio-oxidation processes within the gold industry.

Keywords: selective grinding; IsaMill; bio-oxidation; pollutant process control; carbon-in-leach; thiocyanate