

生物氧化在内蒙某低品位原生金矿浸出研究中的应用

简勇章

(内蒙古金中矿业有限公司, 内蒙古 锡林郭勒盟 011300)

摘要: 对内蒙某低品位原生金矿进行了生物氧化浸出实验研究, 考查了配入硫磺以及硫精矿对降低酸耗, 以及金浸出率的影响。结果表明, 当磨矿细度-74 μm 80%, 酸浸 1 h, 矿石酸耗为 31 kg/t; 全泥浸出 24 h, 金浸出率为 51%~55%; 生物搅拌浸出, 氧化 6 d, 硫氧化率为 80%, 金的浸出率提高到 91.4%; 生物柱浸, 矿石粒度 12 mm 80%, 生物氧化 170 d-转型-氰化浸出 180 d 较直接氰化浸出 360 d, 金浸出率提高 3.72%~23.54%; 柱内配入硫磺及硫精矿不利于金的氰化浸出; 柱外生物氧化硫磺可以减少硫酸酸耗 15.7 kg/t。

关键词: 低品位原生金矿; 硫磺; 硫精矿; 生物氧化; 硫酸耗量; 浸出率

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.03.025

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2022)03-0143-05

内蒙某金矿采用的选冶工艺为“三段一开路破碎, 堆浸-碳浸工艺”, 最终破碎产品粒度为-20 mm (>85%), 选矿处理规模 300 万 t/a。矿山原生矿以 0.2 g/t 为边界, 尚余金金属量 14~15 t, 原生矿以 0.5 g/t 为边界, 尚余金金属量 8~9 t, 矿山的金属储量较少。矿石露天开采至原生矿层。原生矿按现有的破碎流程破碎入堆, 浸出率较低。同时, 矿石为碱性矿石, 硫含量较低, 使用生物氧化柱浸-体系转化-氰化浸出存在酸耗较高的问题, 因此, 开展矿石配入硫磺或配入黄铁矿的生物氧化^[1]研究, 减少硫酸耗量, 提高金的浸出率, 具有十分重要的现实意义。

1 实验

1.1 实验原料

原矿为内蒙某矿山低品位原生金矿石, 矿粒度为-74 μm 80%, 其化学多元素、金化学物相分析结果见表 1、2。

表 1 结果表明, 原矿中金含量为 0.90 g/t, 总硫含量为 1.01%, 负二价硫含量为 0.96%, 矿石氧化程度较小, 矿石类型为原生矿; 铜和银含量低, 附带回收价值较低。金物相分析结果表明, 金主要以裸露金和硫化物包裹金的形式存在, 裸

露金占 52.37%, 硫化物包裹金占 37.26%。

表 1 化学多元素分析结果/%

Au*	Ag*	Cu	Fe	Zn	Pb	TS	S ²⁻
0.9	2.98	0.022	2.84	<0.01	<0.01	1.01	0.96
As	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
0.1	0.019	1.71	8.06	77.48	1.51	0.18	0.038

*单位为g/t。

表 2 金化学物相分析结果

金物相	裸露金	碳酸盐及氢氧化物包裹	硫化物包裹	硅酸盐包裹
含量/(g·t ⁻¹)	0.52	0.06	0.37	0.043
占有率/%	52.37	6.04	37.26	4.33

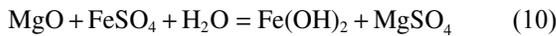
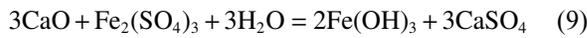
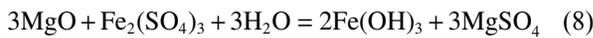
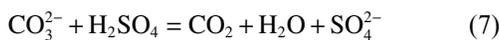
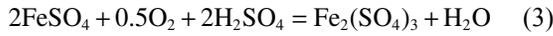
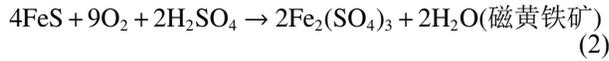
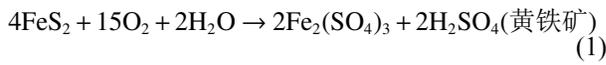
1.2 实验原理

生物氧化过程主要是在 pH<2.0 的硫酸酸性条件下, 矿石中的二价铁被溶出, 溶液持续曝气, 细菌氧化二价铁获得能量, 从而生长繁殖^[2], 二价铁被氧化成为三价铁, 三价铁氧化矿石中低价态硫化物, 被还原成二价铁, 二价铁又在细菌的作用下, 不断的生成三价铁, 从而持续的进行生物氧化, 同时磁黄铁矿的氧化速度大于黄铁矿^[3]。菌液中的酸与脉石反应, 造成硫酸消耗, 脉石与铁

收稿日期: 2021-06-21

作者简介: 简勇章 (1971-), 男, 工程师, 主要研究方向为湿法冶金。

反应生成沉淀。



1.3 实验方法

1.3.1 样品酸耗实验

样品粒度为-74 μm，硫酸调节 pH 值，控制 pH 值为 1.5，搅拌浸出 1 h，考查硫酸耗量。

1.3.2 全泥氰化浸出实验

矿石粒度-74 μm，全泥氰化，石灰调碱 pH>9.5，矿浆浓度 33.3%，维持氰化钠浓度 0.8‰~1‰，常温搅拌下浸出 24 h。实验结束后过滤，渣、液送检测 Au，液测氰化钠浓度，考查金浸出率和药剂消耗情况。

1.3.3 生物氧化搅拌浸出实验

生物氧化样品粒度为-74 μm，样品未进行酸预处理。生物浸出实验在恒温水浴锅中进行，采用搅拌电机进行搅拌，氧化过程中进行曝气。实验条件：45℃ 水浴，矿浆浓度 20%，菌液电位达到 600 mV 后，各加入 300 g 矿样以及矿样相应重量比的硫磺，1#~6#硫磺加入量分别为矿样重量比的 0%、0%、1%、2%、3%、5%。

1#实验氧化矿浆电位达到 600 mV 后，开始每天取矿浆样约 100 mL，样品过滤、洗涤、烘干、称重后进行氰化。2#~6#氧化 12 d 后，全部样品过滤洗涤，氧化后液洗涤到 1.2 L 送检硫酸；渣样洗涤、烘干、称重后进行氰化。

氰化条件为：氰化钠浓度维持 1‰，液固比 3~4，CaO 调碱，pH=11~12，浸出时间 24 h。实验结束后过滤，渣、液送检测 Au，液测氰化钠浓度。

1.3.4 柱浸浸出实验

直接氰化柱浸，用氢氧化钠溶液喷淋，到浸出液体 pH 值>11 后，转换成 1‰ 氰化钠溶液喷淋，浸出后液经过炭柱后返回滴淋，过程中定期更换活性炭，烘干后称重送检 Au。期间定期滴定氰化钠，补加氰化钠。浸出结束，洗柱，收集的洗涤液并取样进行 Au 分析。渣样干燥，称重并制样用于分析。

生物氧化柱浸，分别称取矿石重量相应比例的硫磺以及硫精矿，与矿石混合均匀装柱，用稀硫酸溶液预浸数天，待柱子流出液体 pH 值达到 2.0 左右时，进行菌液循环喷淋。每天检测浸出液的 pH 值、电位，补加蒸发的水量；每周检测浸出液中 TFe、Fe²⁺、H₂SO₄ 等浓度。生物氧化结束后，水洗碱性，到柱子流出液体 pH 值>11，接入氰化钠，步骤与氰化柱浸相同。柱浸参数见表 3。

表 3 柱浸参数

Table 3 Column parameters

编号	重量/kg	浸出方式	柱内	柱外
0	10	直接氰化浸出	0%	0%
1	10	生物氧化	0%硫磺	0%硫磺
2	10	生物氧化	0%硫磺	3%硫磺
3	9	生物氧化	1%硫磺	0%硫磺
4	7.81	生物氧化	3%硫磺	0%硫磺
5	10	生物氧化	3.2%硫精矿	0%硫精矿
6	9	生物氧化	9.6%硫精矿	0%硫精矿

2 结果与讨论

2.1 样品酸耗实验

矿石粒度为-74 μm 浸出 1 h，酸耗为 31 kg/t。现场硫酸到厂价为 500 元/t，矿山年处理矿石量为 300×10⁴ t/年，则硫酸药剂消耗药剂价格为 4640 万/年。

2.2 全泥氰化浸出实验

矿石粒度为-74 μm，全泥氰化浸出，浸出 24 h，结果见表 4。

表 4 全泥氰化浸出实验结果

Table 4 Tests of fine grain cyanide leaching

尾矿重/g	液体量/mL	NaCN耗量/(kg·t ⁻¹)	渣金/(g·t ⁻¹)	液金/(mg·L ⁻¹)	浸出率/%
199.9	429.5	0.65	0.36	0.21	55.60
199.8	402.7	0.59	0.34	0.18	51.62

实验结果表明，金浸出率约为 51%~55%，浸出结果与金物相分析结果相符，预计直接氰化堆

浸，金的浸出率小于50%。

2.3 生物氧化搅拌浸出实验

2[#]~6[#]搅拌浸出过程中的电位、pH值变化见图1、2。

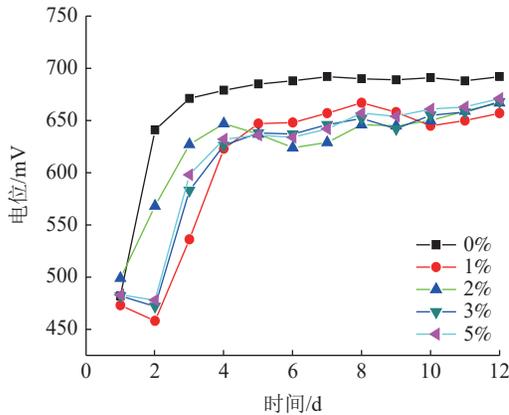


图1 电位随时间变化曲线
Fig.1 Graph of potential change with time

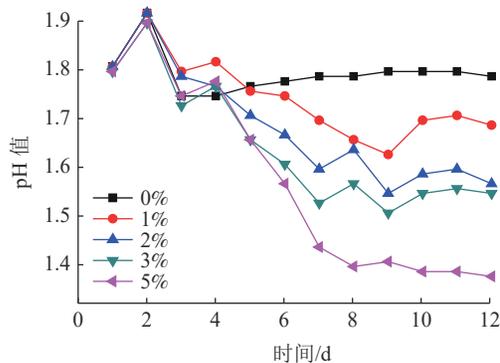


图2 pH值随时间变化曲线
Fig.2 Graph of pH change with time

实验结果表明，生物搅拌浸出过程中，氧化第4d氧化电位均达到600mV，同时，pH值随氧化时间的增加而降低，氧化12d，6[#]（硫磺5%）的pH值降低到1.35。

1[#]过程取样的氧化结果见表5，2[#]~6[#]氧化12d，氧化结果见表6。

实验结果表明，硫磺配入量为矿石重量比的0%，生物氧化6d，硫氧化率为80%，金的浸出率由原来的55%提高到了91.4%。硫酸生成量随硫磺配入量增加而增加；单位时间内，硫磺氧化不完全，会导致金的浸出率随硫磺配入量增加而有所下降。残余硫磺与氰化钠反应导致氰化钠消耗上升，生产中可根据矿石硫磺消耗情况，堆外单独氧化硫磺，选择配入的硫磺量，从而实现体系酸平衡，节省硫酸耗^[4]。

表5 1[#]氧化渣氰化浸出实验结果

氧化天数/d	NaCN耗量/(kg·t ⁻¹)	渣金/(g·t ⁻¹)	液金/(mg·L ⁻¹)	浸出/%	硫氧化/%
4	1.03	0.08	0.12	85.71	59.58
5	1.06	0.07	0.12	87.27	75.31
6	0.87	0.05	0.14	91.40	80.73
7	0.91	0.06	0.13	90.03	84.79
8	0.94	0.04	0.12	92.31	87.50
9	0.88	0.04	0.12	91.09	85.10
10	0.78	0.03	0.12	95.02	91.67
11	0.56	0.02	0.13	96.79	92.71
12*	0.75	0.03	0.33	96.66	88.54

注：*为氧化结束后，剩余样品全部氧化结果

表6 2[#]~6[#]氧化渣氰化浸出实验结果

Table 6 Tests of oxidation residue (2[#]~6[#]) cyanide leaching

编号	渣金/(g·t ⁻¹)	液金/(mg·L ⁻¹)	液酸量/(g·L ⁻¹)	NaCN耗量/(kg·t ⁻¹)	金浸出率/%	未氧化硫/%
2 [#]	0.05	0.79	2.56	0.75	96.76	0.11
3 [#]	0.04	0.37	5.90	0.76	96.66	0.12
4 [#]	0.09	0.41	6.85	1.13	92.96	0.38
5 [#]	0.06	0.26	9.07	1.40	92.58	0.76
6 [#]	0.13	0.39	15.52	1.54	89.63	1.47

2.4 柱浸浸出实验

生物氧化过程，电位、pH值、总铁含量监测结果分别见图3~5，生物氧化预处理-转型-氰化浸出结果见图6。

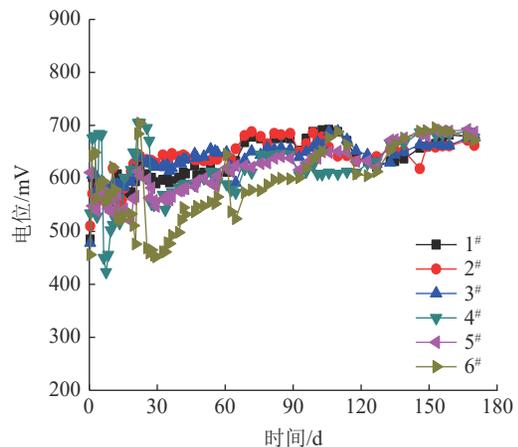


图3 电位随时间变化曲线
Fig.3 Graph of potential change with time

表7结果表明，生物氧化可以提高金的浸出率，体系硫磺增多，单位时间内矿物硫氧化率减少，浸出率降低，少量配入硫精矿，可增加氧化剂铁的含量，提高浸出率，大量配入硫精矿，铁容易沉淀，包裹矿物，浸出率降低。矿石配入硫

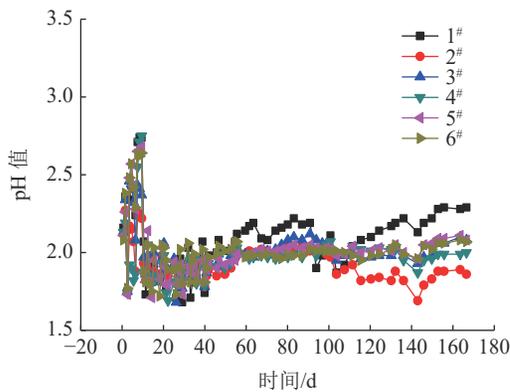


图4 pH值随时间变化曲线
Fig.4 Graph of pH change with time

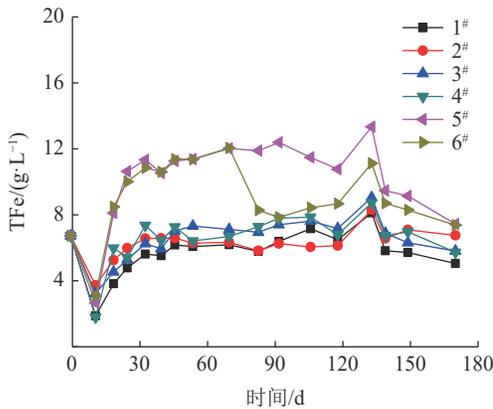


图5 总铁含量随时间变化曲线
Fig.5 Graph of TFe change with time

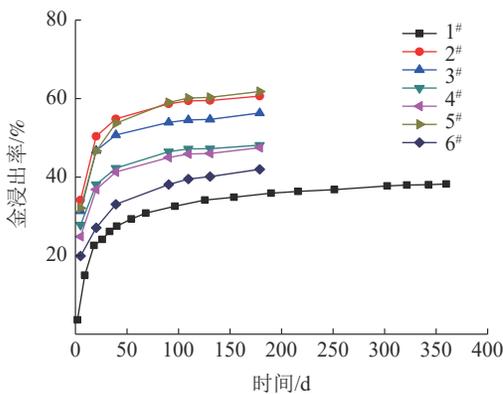


图6 金浸出率随时间变化曲线
Fig.6 Graph of gold leaching rate change with time

磺及黄铁矿，在氧化时间 170 d 内，产酸效果不明显，大量配入硫精矿，酸耗升高，其主要原因为，硫精矿硫铁比为 31.04:45.49，推测硫精矿含有雌黄铁矿及其他铁矿物，磁铁矿氧化耗酸，同时矿石溶出的铁会结合大量的酸根，而增加运行硫酸酸耗^[5]。柱外单独氧化硫磺，产酸效果明显，体系配入硫磺以及硫精矿均会增加氰化钠耗量。

表7 生物氧化柱浸实验结果
Table 7 Tests of biological oxidation column leaching

编号	0 [#]	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]
生物氧化时间/d	0	170	170	170	170	170	170
氧化浸出时间/d	360	180	180	180	180	180	180
硫酸耗量/(kg·t ⁻¹)	—	36.8	21.1	30.27	36.5	36.17	45.69
氰化钠耗量/(kg·t ⁻¹)	2.59	2.88	3.23	3.2	3.14	3.57	3.68
尾渣品位/(g·t ⁻¹)	0.52	0.39	0.42	0.52	0.58	0.36	0.55
金浸出率/%	38.26	60.64	56.32	48.12	47.52	61.8	41.98

3 结论

(1) 针对内蒙某低品位原生金矿石，采用生物槽浸工艺，生物氧化 6 d，硫氧化率为 80%，金的浸出率由直接氰化浸出的 55% 增加到 91.4%。控制硫磺配入量为矿石重量比的 1% 左右，在相同的氧化时间内，对金的浸出率以及氰化钠药剂耗量影响较小，生产中可根据矿石酸耗情况，选择配入的硫磺量和氧化时间，从而实现体系酸平衡，节省硫酸耗。

(2) 采用生物堆浸，矿石粒度 -12 mm 的生物氧化预处理-转型-氧化柱浸，较-12 mm 直接氧化柱浸，金浸出率提高 3.72%~23.54%。配入硫磺及大量配入硫精矿，金浸出率提高较少，少量配入硫精矿，金浸出率较高，较直接生物氧化柱浸提高 1.16%

(3) 柱外生物氧化硫磺可以减少硫酸酸耗 15.7 kg/t，柱内矿石配入硫磺及硫精矿，在氧化 170 d 时间内，减少硫酸耗量较少，大量配入硫精矿，增加硫酸耗量。

参考文献:

[1] 王康林,汪模辉,蒋金龙. 难处理金矿石的细菌氧化预处理研究现状[J]. *黄金科学技术*, 2001, 9(1):19-24.
WANG K L, WANG M H, JIANG J L. Current status of studies on bacterial oxidation and pre-disposal of refractory gold ores[J]. *Gold Science and Technology*, 2001, 9(1):19-24.
[2] D E Rawling, B D Johnson, Springer-verlagberlin Heidelberg[M]. *Bio mining*, 2007: 113-138.
[3] 刘晓荣,姜圣才. 磁黄铁矿和黄铁矿的生物浸出研究[J]. *矿冶工程*, 2006, 19(9): 34-36.
LIU X R, JIANG S C. Bioleaching of pyrrhotite using thiobacillus ferrooxidans [J]. *Mining & Metallurgical Engineering*, 2006, 26(6): 39-42.
[4] 温建康,阮仁满,陈景河,等. 紫金山铜矿生物堆浸提铜酸铁平衡工艺研究[J]. *稀有金属*, 2006, 30(5):661-665.

WEN J K, RUAN R M, CHEN J H, et al. Acid and iron balance in bacterial heap-leaching of Zijinshan copper ore[J]. *Chinese Journal of Rare Metal*, 2006, 30(5):661-665.

[5] 蒋磊, 周怀阳, 彭晓彤. 氧化亚铁硫杆菌对黄铁矿、黄铜矿和磁黄铁矿的生物氧化作用研究 [J]. 科学通报, 2007,

52(15): 1802-1813.

JIANG L, ZHOU H Y, PENG X T. Study on the biological oxidation of pyrite, chalcopyrite and pyrrhotite by thiobacillus ferrooxidans[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(15): 1802-1813.

Application of Bio-Oxidation in Leaching of a Low-Grade Primary Gold Ore in Inner Mongolia

Jian Yongzhang

(Inner Mongolia Jinzhong Mining Co., Ltd., Xilin Gol League, Inner Mongolia, China)

Abstract: Bio-oxidation leaching test was conducted on a low-grade primary gold mine in Inner Mongolia. The acid consumption of ore, cyanidation, bio-oxidation stirred leaching, column leaching, add sulfur and sulfur concentrate to reduce acid consumption, and impact on gold leaching efficiencies were investigated. The results showed that with grinding fineness at $-74\ \mu\text{m}$ 80%, acid leaching for 1h, consumption of sulfur acid at 31 kg/t; After cyanidation for 24 h, the gold leaching efficiencies were 51%~55%; After Bio-oxidation stirring leaching for 6 d, the sulfur oxidation efficiencies was reaching 80%, and the gold leaching efficiencies was reaching 91.4%; Bio-oxidation column leaching tests on gold ore of particle size at $-2\ \text{mm}$ 80% for 350 d (oxidation 170 d and cyanide leaching 180 d), the gold leaching efficiencies was increased by 3.72%~23.54% than the direct cyanide leaching 360 d; The addition of sulfur and sulfur concentrate was not conducive to gold cyanide leaching, and the bio-oxidation of sulfur outside the column could reduce the consumption of sulfuric acid by 15.7 kg/t.

Keywords: Low-grade primary gold ore; Sulfur; Sulphur concentrate; Biological oxidation; Sulfuric acid consumption; Leaching rate

(上接第 120 页)

Experimental Study on Investigation Method of Soil Pollution in Typical Pyrite Mining Area in South Sichuan

Dai Li, Deng Jie

(Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: According to the special geochemical landscape and soil characteristics of typical pyrite mining areas in southern Sichuan, soil investigation method test was carried out in the pollution assessment of mining areas. The enrichment and distribution characteristics of elements in different soil horizon and size fraction were studied by multivariate statistical analysis, significance test, pollution load index calculation and other methods combined with element geochemical analysis. The results show that there are significant differences in the enrichment characteristics of elements among soil horizon. The sampling horizon is an important factor affecting the overall enrichment of elements. The surface soil has a higher overall enrichment degree of elements, and the sulfur element combination has a more obvious distribution tendency in coarse-grained soil. It is suggested that the area with high suitability should be selected, the sampling horizon should be surface (0~10 cm), and the particle size of sample preparation should be $-2.00\ \text{mm}$.

Keywords: Soil pollution; Pyrite; Experiment of soil sampling; Size fraction