

从低品位含金尾矿中回收金的堆浸参数研究

周贺鹏^{1,2}, 胡洁¹, 王金庆¹, 钟志刚¹

(1. 江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 江西省矿业工程重点实验室, 江西 赣州 341000)

摘要: 辽宁丹东某铜矿尾矿金品位为 1.35 g/t, 属低品位难处理金矿。采用柱浸模拟现场堆浸工艺条件, 对工艺参数进行了模拟试验。条件实验表明, 在浸出剂氰化钠浓度为 0.10%、石灰水喷淋调整浸出液 pH=11、矿层高度 305 mm、在 10℃以上浸出 120 h, 金浸出率为 58.14%。放大试验延长浸出时间至 480 h, 金浸出率达到 70%左右。获得的工艺参数可为堆浸生产提供指导。

关键词: 有色金属冶金; 含金尾矿; 低品位; 堆浸; 氰化浸出

中图分类号: TD923 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2017)02-0042-05

Study on Process Parameters in Heap Leaching for Gold Recovery from Low Grade Tailings

ZHOU Hepeng^{1,2}, HU Jie¹, WANG Jinqing¹, ZHONG Zhigang¹

(1. Faculty of Resource and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Mining Engineering, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: The copper tailings from Dandong of Liaoning province contains gold 1.35 g/t, mainly in the form of low grade refractory gold ore. The column leaching simulation experiments were carried out to simulate the process parameters of dump leaching. The experimental results showed that the leaching rate of gold was 58.14% when the ore was leaching at above 10℃ for 120 hours under the following conditions: 0.10% sodium cyanide, pH=11 (adjusted by spraying lime water), 305 mm of the height of the ore bed. For an enlarged experiment in which the leaching time was prolonged to 480 hours, up to 70% of gold in the ore was leached out. The obtained parameters can provide guidance for heap leaching production.

Keywords: non-ferrous metallurgy; gold-bearing tailing; low grade; heap leaching; cyanide leaching

随着矿产资源的不断开发, 自然禀赋好、品位高、易处理的原生金矿石日益减少, 大量难处理低品位风化矿、尾矿等含金资源逐步增多, 现已成为黄金提取冶炼的重要原料之一。针对此类难处理低品位含金尾矿, 采用常规或单一的浮选工艺难以实现金矿物的有效提取^[1], 而常用的搅拌浸出工艺又因入选矿石品位低、生产成本高等原因不适应。与常规搅拌浸出工艺相比, 堆浸工艺具有工艺流程简单、基建投资成本低、对矿石适应性强、操作简便、生产运行成本低等优点, 现已成为低品位金矿石选矿生产的主要方法^[2-5]。

辽宁丹东某铜矿石选矿生产后的尾矿属低品位难处理金矿石。本文以柱浸模拟堆浸提金工艺对该矿石进行金的回收试验研究, 以确定技术可行、经济合理的堆浸工艺参数, 为开发此类矿产资源提供技术支撑。

1 实验部分

1.1 试样分析

试样采取于辽宁丹东某铜矿选别后的尾矿, 经过自然晾干、混匀、缩分等制备加工, 将试样分为

收稿日期: 2016-07-22

基金项目: 江西省自然科学基金(20151BAB216013)。

第一作者: 周贺鹏, 男, 讲师, 研究方向: 矿物加工理论与工艺研究。E-mail: zhp0919@163.com

化学分析样、岩矿鉴定样和试验试样。

1.1.1 化学成分

试样的化学组成分析结果见表 1。由表 1 可见，

试样中金含量为 1.35 g/t，虽然品位较低，但仍是主要回收的元素；其他有价金属如 Cu、Pb、Zn 等含量均较低，回收价值不大。

表 1 原矿化学多元素分析结果

Tab.1 Chemical multi-elemental analysis results of a crude ore

Composition	Au/(g/t)	Ag/(g/t)	Cu	Pb	Zn	S	Fe	As	Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO
ω	1.35	7.00	0.11	0.13	0.18	6.37	3.58	0.08	3.36	66.28	5.77	4.31	1.63	3.52

1.1.2 矿物组成

矿石中主要矿物含量见表 2。由表 2 可见，试样中金属矿物黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、褐铁矿

等含量较少，而云母、黏土矿物、泥质含量较高，是构成试样的主要成分。

表 2 主要矿物相对含量

Tab.2 The relative contents of main minerals

矿物名称	黄铜矿	方铅矿	褐铁矿	黄铁矿	铅矾	闪锌矿	白云母	绢云母	粘土矿物	泥质	石英	其它矿物
ω	0.08	0.1	3.5	5.27	0.04	0.13	2.89	1.62	14.32	14.06	54.97	1.36

1.1.3 金矿物赋存形式与嵌布特性

试样中金矿物主要以自然金、银金矿的形式存在，多呈浑圆粒状、凹凸状、不规则状等形态分布。部分金矿物中分布有小沟、洼坑，且被粘土矿物和铁矿物等充填；少量银金矿与硫锑铜银矿、硫砷铜银、黄铜矿等连生，且嵌布粒度较细，对堆浸回收不利。

1.2 实验方法

采取一定量的原矿试样，自然松散地加入到 $\Phi 200 \times 1000$ mm 的浸出柱中，参照现场堆浸喷淋强度，并充分考虑原矿渗透系数等综合因素，调节喷淋速度约为 $10 \text{ L}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ 进行连续喷淋，定时取样，测定贵液(即浸出液)中金的含量和 pH 值。实验完毕后，浸渣经过滤、多次洗涤、烘干和称重，测定总的浸出贵液(包括体积)和浸渣中金的含量。实验工艺流程如图 1 所示，按此流程进行条件实验和放大试验。

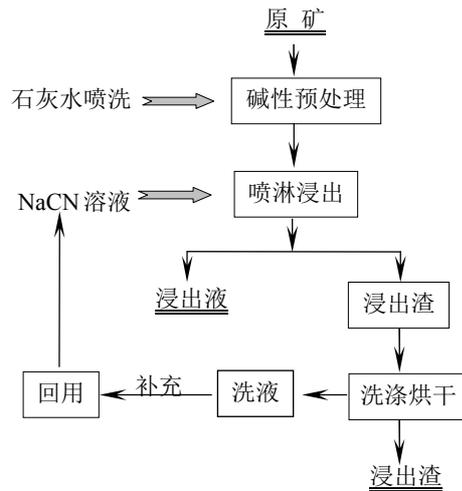


图 1 柱浸实验(模拟现场堆浸)工艺流程

Fig.1 Technological flow chart of the pillar immersion experiment (simulation of heap leaching)

浸出率为浸出作业已溶解金的金属量(g/t)占原矿金属量(g/t)的百分比。计算公式为：

$$\text{浸出率} = \frac{\text{已溶解金的金属量}}{\text{原矿金属量}} = \frac{\text{原矿金属量} - \text{浸渣金属量}}{\text{原矿金属量}}$$

2 结果与讨论

2.1 条件实验

2.1.1 浸出剂浓度对金浸出率的影响

以氰化钠为浸出剂，固定试样量为 5 kg、浸出

矿层高度 220 mm、浸出时间 96 h、石灰喷淋预处理后浸出液 pH=11、浸出温度(平均室温)25℃，考察不同的浸出剂浓度对金浸出率[R(Au)]的影响，结果如图 2 所示。由图 2 可知，当浸出剂 NaCN 浓度在 0.10%以下时，金浸出率随 NaCN 浓度的升高而逐渐升高；当 NaCN 浓度达到 0.10%时，金浸出率增至最大值；此后继续提高 NaCN 浓度，且高于 0.10%后，金浸出率明显降低。

在氰化浸金初期，随浸出剂 NaCN 浓度的增加，试样中金的溶解反应速度也逐渐加快；当浸出剂浓

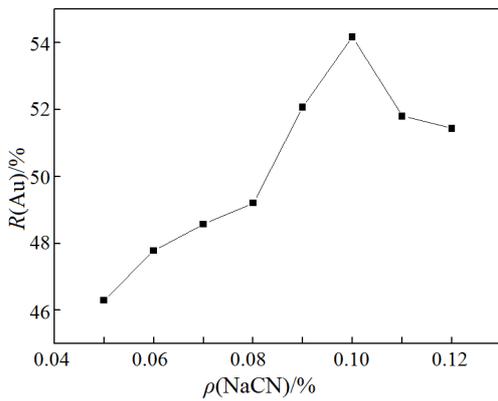


图 2 NaCN 浓度对金浸出率的影响

Fig.2 Effect of NaCN concentrations on gold leaching rate

度超过反应临界值时,过量的浸出剂与试样中的钙、镁等矿物反应形成的凝胶状物质,并交杂在矿粒渗流间隙,阻碍堆浸过程浸出剂的渗透,影响金的浸出;当浸出剂浓度足够高时,金的浸出反应速度主要取决于浸出过程的含氧浓度^[6-7],并不随浸出剂浓度的升高而升高。综合分析,选取浸出过程 NaCN 浓度为 0.10%。

2.1.2 浸出时间对金浸出率的影响

浸出时间与金矿物的嵌布粒度和矿石渗透性有关。固定氰化钠浓度为 0.10%、试样 5 kg、浸出矿层高度 220 mm、石灰喷淋预处理后浸出液 pH=11、浸出温度 25℃,考察不同浸出时间对金浸出率的影响,结果如图 3 所示。由图 3 可见,随浸出时间的延长,金的浸出率明显升高;当浸出时间延长至 120 h,金浸出率达到最大值。此后继续延长浸出时间,不但金的浸出率无明显变化,而且浸出体系的稳定性受到影响,部分杂质离子随浸出时间的延长而进入浸出液,进一步影响金的浸出回收^[8]。综合考虑,选取金的浸出时间为 120 h。

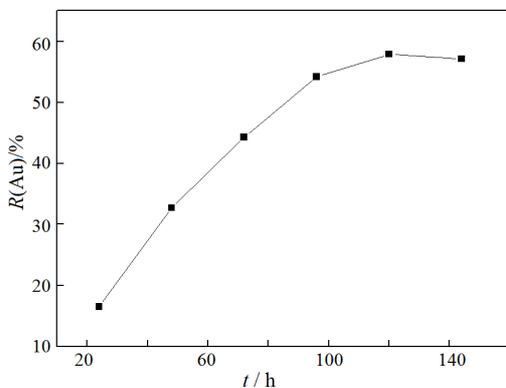


图 3 浸出时间对金浸出率的影响

Fig.3 Effect of the leaching time on gold leaching rate

2.1.3 浸出矿层高度对金浸出率的影响

矿层高度对浸出剂的渗透浸出、浸出液的渗流收集有重要的影响。固定氰化钠浓度为 0.10%、浸出时间 120 h、石灰喷淋预处理后浸出液 pH 值为 11、浸出平均室温 25℃,考察不同的浸出矿层高度对金浸出率的影响,结果如图 4 所示。由图 4 可知,随浸出矿层高度的升高,金浸出率呈现先增后减的趋势。在矿层高度为 305 mm 时,金的浸出率最大,为 58.14%。此后继续增加矿层高度,金浸出率急剧下降,浸出剂和浸出贵液在矿层中的渗透性显著变差,不利于金矿物的溶浸回收^[9]。因此,选取浸出矿层高度为 305 mm。

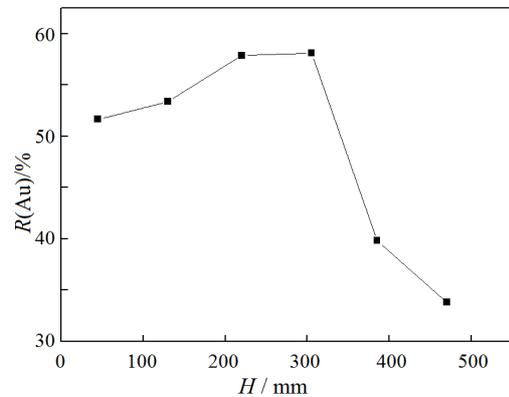


图 4 浸出矿层高度对金浸出率的影响

Fig.4 Effect of ore deposit height on gold leaching rate

2.1.4 浸出矿浆 pH 值对金浸出率的影响

固定氰化钠浓度为 0.10%、浸出时间 120 h、浸出矿层高度为 305 mm、浸出平均室温 25℃,采用石灰喷淋,考察不同浸出液 pH 值对金浸出率的影响,结果如图 5 所示。

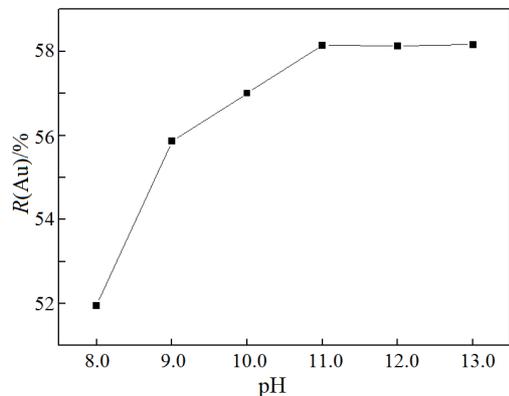


图 5 浸出液 pH 值对金浸出率的影响

Fig.5 The effect of pH values on gold leaching rate

矿浆 pH 值对金的氧化浸出有重要影响。该过

程一般要求在 pH>10 的碱性溶液中进行，以防止氰化物以 HCN 形式从溶液中逸出，导致氰化物流失，影响金浸出率，并造成环境污染^[10-11]。由图 5 可知，当浸出液 pH 值低于 11 时，金的浸出率随 pH 值的增大而升高；当浸液 pH 值高于 11 后，继续增大浸液 pH 值时，金浸出率趋于平稳。因此，选取浸液 pH 值为 11。

2.1.5 浸出温度对金浸出率的影响

固定氰化钠浓度为 0.10%、浸出时间 120 h、浸出矿层高度 305 mm、石灰喷淋预处理后浸出液 pH 值为 11，考察不同浸出温度对金浸出率的影响，结果如图 6 所示。

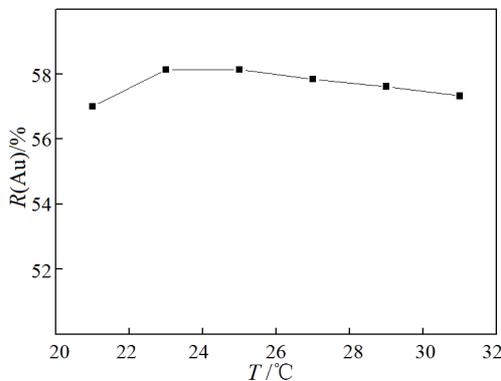


图 6 浸出温度对金浸出率的影响

Fig.6 Effect of temperatures on gold leaching rate

由图 6 可知，随浸出温度的升高，金浸出率无明显变化，温度对金浸出指标的影响不大。当温度升高至 27℃后，金的浸出率略微有所降低。可能因为温度升高后，浸液蒸发量增大，导致浸出贵液的体积量减少。因此只要室温不低于 10℃，并且不高于 35℃，对浸出指标影响不明显。

2.2 放大试验

为进一步考察堆浸法对该金尾矿的回收效果，优化堆浸工艺条件和参数，参照条件实验最佳工艺条件，对该含金尾矿试样进行堆浸工艺放大试验。

2.2.1 堆浸高度对金浸出率的影响

放大试验在 $\Phi 400 \times 1000$ mm 的堆浸柱中进行，固定浸出剂氰化钠浓度为 0.10%，采用石灰喷淋预处理后浸出液 pH 值为 11，在平均室温为 25℃时，考察不同的堆浸高度随时间的变化对浸出指标的影响。为避免浸出液蒸发减少，放大试验采取多次接取、累积计算的方法进行，即在浸液完全渗透矿层高度后的每 24 h 监测一次浸出液体积、浸液中金的含量和 pH 值，进一步计算金的累积浸出率，从而确定堆浸的最佳条件，结果如图 7 所示。

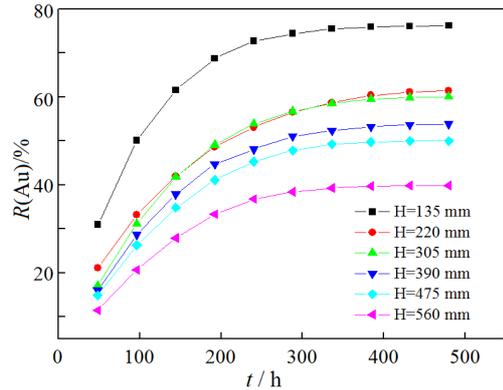


图 7 堆浸高度对金浸出率的影响

Fig.7 Effect of the heap leaching height on gold leaching rate

由图 7 可知，随着堆浸高度的升高，金浸出率明显下降。当堆浸高度为 135 mm 时，浸出 480 h 后，浸出渣金含量为 0.32 g/t，金浸出率达到最高，为 76.21%；继续升高堆浸高度，金的浸出率急剧降低。若选用 135 mm 作为堆浸高度，势必会增大原矿堆浸面积，导致蒸发量增大，影响堆浸指标，降低经济效益，工程实际应用价值不大。因此，必须提高堆浸高度。根据图 7 结果，当堆浸高度由 220 mm 上升到 305 mm 时，金的浸出率相差不大，仅仅降低了 1.31%。当堆浸高度大于 305 mm 时，金的浸出率急剧下滑。主要是由于堆浸高度增加，渗透性变差，出液体积明显减少，从而严重影响金的浸出率。因此，综合考虑选择原矿堆浸高度为 305 mm，这与条件实验结果相吻合。

2.2.2 浸出剂浓度对金浸出率的影响

试验固定堆浸高度为 305 mm，采用石灰喷淋预处理后浸出液 pH=11，在平均室温为 25℃时，改变浸出剂 NaCN 的浓度，考察不同的浸出剂浓度随时间变化对浸出指标的影响，结果如图 8 所示。

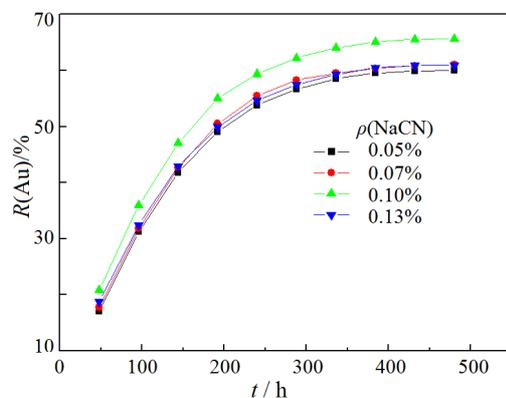


图 8 堆浸浸出剂(NaCN)浓度对金浸出率的影响

Fig.8 Effect of leaching agent (NaCN) concentrations of heap leaching on gold leaching rate

由图 8 可知, 随氰化钠浓度升高, 金浸出率逐步增大, 当氰化钠浓度上升到 0.10% 时, 浸出 480 h 后, 浸出渣金含量为 0.46 g/t, 金浸出率最高为 65.62%, 当氰化钠浓度超过 0.10% 时, 金浸出率逐步下降。这主要反映在浸出液的出液体积减少, 过高的氰化钠浓度将促进了浸出过程絮凝胶状类物质的生成, 从而降低了堆浸过程的渗透性, 导致金浸出率下降。因此, 为避免这类物质的过分干扰以及适当减少浸出剂消耗, 综合考虑选择氰化钠浓度为 0.10%, 与条件实验结果相吻合。

3 结论

1) 丹东某铜矿选别后的尾矿含金 1.35 g/t, 主要以自然金、银金矿的形式存在, 少部分为硫锑铜银矿-硫砷铜银矿, 嵌布特征复杂、赋存形式多样, 为难处理低品位尾矿。

2) 柱浸条件实验表明, 在氰化钠作浸出剂浓度为 0.10%、浸出液 pH=11、浸出矿层高度 305 mm、浸出时间 120 h、浸出室温不低于 10℃ 时, 可获得较好的指标, 金浸出率可达 58.14%。

3) 柱浸放大试验表明, 在矿层高度为 305 mm、浸出剂浓度为 0.10%, 延长浸出至 480 h, 金浸出率可达 70% 左右。

4) 与常规搅拌浸出工艺相比, 堆浸提金工艺不论投资和生产成本均较低, 是处理此类低品位金矿较佳的方法。柱浸模拟试验过程稳定、指标良好, 得到的工艺参数可作为实际生产的指导。

参考文献:

- [1] 高起方, 罗思岗, 赵志强. 某低品位金矿的氰化浸出试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2015(3): 48-51.
- GAO Q F, LUO S G, ZHAO Z Q. Cyanide leaching test research of low grade gold ore[J]. Nonferrous metals (mineral processing section), 2015(3): 48-51.
- [2] 罗真华, 吴伯增, 陈建明, 等. 某低品位高硫高碳难处理金矿无氰堆浸工艺工业试验研究[J]. 有色金属科学与工程, 2011, 2(5): 70-73.
- LUO Z H, WU B Z, CHEN J M, et al. Industrial experimental research on heap leaching of low-grade refractory gold ore bearing high sulfide and carbon without cyanide[J]. Nonferrous metals science and engineering, 2011, 2(5): 70-73.
- [3] LI X B, CHEN F L, LIU X B. Analysis of heap leaching process rate and migration behavior of gold mine tailings [J]. Scientific journal of earth science, 2013, 3(2): 66-70.
- [4] 曹飞, 吕良, 李文军, 等. 河南某低品位金矿堆浸试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2014(4): 37-40.
- CAO F, LÜ L, L W J, et al. Heap leaching test for a low grade gold ore in Henan[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2014(4): 37-40.
- [5] MCBRIDE D, CROSS M, GEBHARDT J E. Heap leach modeling employing CFD technology: A 'process' heap model[J]. Minerals engineering, 2012, 33: 72-79.
- [6] BAS A D, KOC E, YAZICI Y E, et al. Treatment of copper-rich gold ore by cyanide leaching, ammonia pre-treatment and ammoniacal cyanide leaching[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(2): 597-607.
- [7] 宫博, 薛仕林. 内蒙某低品位金矿浸出的试验研究[J]. 矿业快报, 2008(3): 29-31.
- GONG B, XUE S L. Research on leaching of low grade gold ore in Inner Mongolia[J]. Express information of mining industry, 2008(3): 29-31.
- [8] 张帅, 曾怀远, 张村, 等. 氰化法、硫代硫酸盐法、硫脲法浸出某难浸银精矿比较研究[J]. 有色金属科学与工程, 2015, 6(1): 74-78.
- ZHANG S, ZENG H Y, ZHANG C, et al. Comparisons of leaching a silver ore with cyanide, thiosulfate and thiourea solutions[J]. Nonferrous metals science and engineering, 2015, 6(1): 74-78.
- [9] 习泳, 吴爱祥, 朱志根. 矿石堆浸浸出率影响因素研究及其优化[J]. 矿业研究与开发, 2005, 25(5): 19-22.
- XI Y, WU A X, ZHU Z G. Study on the factors influencing the recovery of ore heap leaching and their optimization[J]. Mining research and development, 2005, 25(5): 19-22.
- [10] 方夕辉, 陈杜娟. 某难浸银精矿强化浸出试验研究[J]. 有色金属科学与工程, 2011, 2(5): 65-69.
- FANG X H, CHEN D J. Experimental research on intensification leaching of a certain refractory silver concentrate[J]. Nonferrous metals science and engineering, 2011, 2(5): 65-69.
- [11] 罗星, 李尽善, 周卫宁, 等. 某金矿热压氧化后氰化浸金氰化钠消耗实验研究[J]. 贵金属, 2015, 36(4): 51-55.
- LUO X, LI J S, ZHOU W N, et al. Research on the dosage of sodium cyanide used for leaching refractory gold ore after pressure oxidation procedure[J]. Precious metals, 2015, 36(4): 51-55.