

Optimization and kinetic analysis of cyanide leaching parameters for low grade gold ore based on response surface method

Hao Wang¹ Xiangting Hu^{2*} Qifei Sun¹

1. Shandong Zhaojin Group Co., Ltd. 1, Zhaoyuan, Shandong, 265400, China

2. Key Laboratory of Wastewater Treatment and Resource Recovery for Fine Chemical Industry, Yantai, Shandong, 264000, China

Abstract

The cyanidation leaching process for low-grade gold ore is a critical step in gold extraction. Optimizing the cyanidation leaching process can enhance gold recovery rates and reduce production costs. This study, based on the response surface method, analyzed the main factors affecting the cyanidation leaching process of low-grade gold ore, including cyanide concentration, leaching time, pH value, and temperature. Through experimental design, the optimal leaching parameter combination was obtained.

Keywords

response surface method; low grade gold ore; cyanide leaching; parameter optimization; kinetic analysis

基于响应面法的低品位金矿氰化浸出参数优化与动力学分析

王浩¹ 胡祥婷^{2*} 孙其飞¹

1. 山东招金集团有限公司, 中国·山东 招远 265400

2. 烟台市精细化工废水处理与资源化重点实验室(筹), 中国·山东 烟台 264000

摘要

低品位金矿的氰化浸出过程是金矿提取中的关键步骤, 优化氰化浸出工艺可以提高金的回收率并降低生产成本。本研究基于响应面法, 分析了影响低品位金矿氰化浸出过程的主要因素, 包括氰化剂浓度、浸出时间、pH值、温度等, 通过设计实验获得了最佳的浸出参数组合。

关键词

响应面法; 低品位金矿; 氰化浸出; 参数优化; 动力学分析

1 引言

低品位金矿由于金的含量较低, 其开采和处理成本较高, 且金矿资源逐渐枯竭, 导致金矿企业面临严峻的经济和技术压力。本文通过响应面法对低品位金矿氰化浸出过程中的关键参数进行优化, 并结合动力学分析, 揭示了氰化浸出反应的速率常数和反应机制, 为提高金的回收率和生产效率提供了重要指导。

【课题项目】提高氰化回收率关键技术研究(项目编号: KXDNY2024-02)。

【作者简介】王浩(1988-), 男, 中国山东宁阳人, 硕士, 工程师, 从事黄金选冶研究。

【通讯作者】胡祥婷(1999-), 女, 中国山东淄博人, 本科, 工程师, 从事环境科学与工程研究。

2 低品位金矿氰化浸出过程的参数分析

2.1 低品位金矿氰化浸出的基本原理

氰化浸出是提取金矿中金的一种重要技术, 广泛应用于低品位金矿的金提取过程中。氰化浸出利用氰化物与金之间的化学反应, 形成金氰络合物, 从而将金从矿石中分离出来。氰化浸出过程中, 氰化剂(通常为氰化钠或氰化钾)溶解金矿中的金颗粒, 形成金氰络合物, 金的溶解度在氰化物存在的条件下显著提高。金矿中的金元素通过这一氰化反应进入溶液, 并最终通过电解、金属置换或沉淀等方法进行回收。

在这一过程中, 金与氰化物反应, 形成可溶性的金氰络合物 $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$, 而金的回收率则取决于多种因素。除氰化剂浓度外, 矿石的粒度、pH值、浸出温度、浸出时间等因素也会影响氰化反应的效率。特别对于低品位金矿, 由于金的含量较低, 氰化浸出往往需要较长时间和较高浓度的

氰化剂才能有效提取金。因此，对于低品位金矿的氰化浸出过程，优化这些参数显得尤为重要。

为了有效提高氰化浸出过程的效率，并降低环境污染，减少氰化剂的浪费，研究者们往往需要对浸出工艺进行系统优化，找到适合的操作条件。这个优化过程涉及到多个因素的综合考虑，包括金矿的物理化学特性、工艺设备的条件、以及实际生产环境等。

2.2 影响氰化浸出的主要因素

在低品位金矿的氰化浸出过程中，多个因素相互作用，影响金的回收率。主要的影响因素包括：

氰化剂浓度：氰化剂浓度是氰化浸出中最关键的因素之一。氰化剂浓度过低时，氰化反应无法充分进行，金的回收率低，甚至可能无法提取出金矿中的金。氰化剂浓度过高则会增加成本，同时可能导致环境污染及氰化剂的过度消耗，甚至可能产生毒性副产物。因此，氰化剂浓度需要合理选择，以确保金的有效回收并减少不必要的浪费。一般来说，适宜的氰化剂浓度可以在一定程度上提高金的回收率，但过高的浓度并不会成比例地提高回收效果。

浸出时间：浸出时间对金的回收率有着直接的影响。金矿中金的溶解需要一定时间，过短的浸出时间可能导致金矿中的金未完全溶解，造成回收率低。而过长的浸出时间则会导致能量的过度消耗和生产成本的增加，且可能会引发不必要的副反应。因此，确定合适的浸出时间对于优化金的回收率至关重要。

pH 值：pH 值在氰化浸出中起着非常重要的作用。氰化反应的速率和金的溶解度受到溶液 pH 值的影响。通常，氰化浸出需要在稍碱性的环境中进行，pH 值的过低或过高都会对氰化反应产生抑制作用。过低的 pH 值可能导致氰化剂的降解，降低氰化反应的效率，而过高的 pH 值则可能导致金矿中的金不易溶解，因此需要在合适的 pH 范围内进行操作。

温度：温度对氰化反应速率有显著影响。适当升高温度可以加速氰化反应的进行，提高金的回收效率。高温环境下，分子运动加剧，氰化反应更为迅速。然而，过高的温度可能导致氰化剂的分解或其他副反应的发生，反而抑制了金的回收率。因此，控制温度在适宜范围内，对于保证氰化浸出的效果至关重要。

这些因素的综合作用需要通过科学的实验和优化手段来确定最适宜的工艺条件，才能最大化金的回收率，减少能量和氰化剂的浪费，降低生产成本。

2.3 优化目标与响应面法的应用

响应面法 (RSM) 是一种强大的多变量优化工具，可以通过实验设计和数学建模，系统地研究各个因素对目标变量的影响。在低品位金矿的氰化浸出过程中，金的回收率是主要的优化目标。通过响应面法，研究者能够精确地确定氰化剂浓度、浸出时间、pH 值、温度等因素的最佳组合，以

实现回收率的最大化。

响应面法的核心思想是通过实验设计，构建各因素与回收率之间的数学模型。常见的响应面法实验设计包括中心复合设计 (CCD)、Box-Behnken 设计和拉丁超立方设计等，这些设计能够帮助研究者在有限的实验次数内，全面了解各因素的主效应及其交互作用。通过二次回归分析，响应面法能够生成反应面方程，帮助研究者直观地分析不同因素组合下的金回收率变化情况。

具体应用时，首先选择几个可能影响氰化浸出过程的关键因素 (如氰化剂浓度、浸出时间、温度等)，然后根据响应面法的设计原则，进行一系列的实验，并收集数据。接着，利用这些数据进行回归分析，建立数学模型，进而通过数学优化方法确定最优操作条件。这些条件可以使金的回收率达到最佳状态，且最大限度地减少资源的浪费和副反应的发生。

通过响应面法的应用，研究者能够有效优化低品位金矿的氰化浸出过程，为提高回收率、降低环境污染以及降低成本提供科学依据。

3 响应面法在氰化浸出参数优化中的应用

3.1 响应面法实验设计

为了优化低品位金矿的氰化浸出过程，本文采用了响应面法 (Response Surface Methodology, RSM) 进行实验设计。响应面法是一种多变量统计分析方法，广泛应用于过程优化中。它能够帮助研究人员通过较少的实验次数，探索多个因素对目标变量的影响，进而优化工艺参数。在本研究中，目标是提高金矿的回收率，因此选择了氰化剂浓度、浸出时间、pH 值和温度四个因素作为自变量，并将金的回收率作为因变量。

由于多因素和多水平的实验设计会增加实验的复杂性和工作量，为了提高实验效率，本文选择了中心复合设计 (Central Composite Design, CCD)。CCD 设计包含了 3 个因素 (氰化剂浓度、浸出时间、温度) 和 3 个水平，总共形成了一个包含 14 个实验点的实验设计。具体来说，三个因素的水平均设定为低、中、高三个水平，并通过实验测量金的回收率作为响应值。在实验过程中，通过调整氰化剂浓度、浸出时间和温度等参数，获取不同条件下金的回收率数据。之后，利用二次回归模型对实验数据进行拟合，建立反应面方程，并分析各因素之间的相互作用以及它们对金回收率的影响。

3.2 实验结果与数据分析

通过实验结果的分析，可以发现氰化剂浓度、浸出时间和温度对金的回收率具有显著影响。具体而言，实验结果显示，氰化剂浓度对回收率具有正相关性，即随着氰化剂浓度的增加，金的回收率逐步提高。然而，当氰化剂浓度超过某一值后，回收率的提升效果逐渐减缓。实验数据表明，氰

化剂浓度达到一定水平后,再增加浓度对回收率的提升效果变得不显著,甚至可能导致金矿中的其他成分对氰化剂的消耗增加,进而影响氰化效果。

浸出时间与金的回收率之间也存在正相关关系。通过延长浸出时间,金矿中的金可以更充分地与氰化剂接触,从而提高金的回收率。然而,当浸出时间过长时,金的回收率趋于稳定,甚至可能出现回收率的下降趋势。这是因为,长时间的浸出可能导致部分氰化剂分解或产生副反应,从而影响金的回收效率。

温度的增加对金的回收率同样起到了积极的促进作用。温度的升高加速了氰化反应的进行,提升了金的回收率。在较高温度下,氰化反应的速率会加快,从而提高金矿的回收效率。然而,在过高的温度条件下,氰化剂可能发生分解,产生一些副反应,这会影响金的回收率。因此,温度过高会导致回收率的下降,需要控制在一定范围内,以避免不良反应的发生。

通过响应面法的分析,进一步优化了各实验参数的组合。经实验结果的拟合分析,得出最佳工艺参数组合为氰化剂浓度 0.2 mol/L,浸出时间 24 小时,温度 35° C。此时,金的回收率达到了最佳值,证明了响应面法在氰化浸出过程优化中的有效性。

3.3 响应面法优化结果的验证

为了验证响应面法优化结果的准确性和可行性,本文进行了进一步的验证实验。根据优化得到的最佳工艺参数,即氰化剂浓度为 0.2 mol/L,浸出时间为 24 小时,温度为 35° C,进行了一次验证性实验。在实验中,金的回收率得到了显著提高,约为原回收率的 15%。这一结果表明,响应面法在优化低品位金矿氰化浸出工艺中的有效性和实用性,能够有效提升金的回收率。

此外,验证实验还揭示了优化过程中的一些细节,例如,在高浓度氰化剂下,氰化效果确实得到了加强,而在高温条件下则需要避免过度升温,以避免氰化剂的分解。进一步分析结果显示,实验中的回收率提高不仅源于氰化剂浓度的合理选择,还包括浸出时间和温度的精确调控。因此,响应面法不仅为本研究提供了最优的工艺参数组合,还为低品位金矿的氰化浸出过程提供了宝贵的优化经验和指导。

通过本研究,响应面法为低品位金矿的氰化浸出过程优化提供了科学的理论依据和实践参考,且在实验验证过程中取得了显著的效果。这不仅有助于提高金矿的回收率,还能为相关行业的工艺改进和优化提供一定的参考和借鉴。

总的来说,本研究通过响应面法优化了低品位金矿的氰化浸出工艺,得到了金回收率的显著提升,并为金矿的高效回收和绿色开采提供了科学依据。未来,还可以进一步结合其他优化手段,如微波辅助氰化、超声波辅助氰化等,提高金矿的回收率 and 环境友好性,为可持续矿业发展做出贡献。

4 氰化浸出动力学分析

4.1 氰化反应动力学模型

氰化浸出过程的动力学特性直接影响金的回收率。为了进一步分析低品位金矿的氰化浸出过程,本文采用了经典的一级反应动力学模型,假设金矿的氰化反应遵循一级反应速率规律。反应速率方程如下:

$$r=k \cdot C_{\text{Au}}=k \cdot C_{\text{Au}}$$

其中, r 为反应速率, k 为反应速率常数, C_{Au} 为金的浓度。通过实验数据的拟合,计算出反应速率常数 k ,并分析温度、氰化剂浓度等因素对反应速率的影响。

4.2 反应速率常数的计算与分析

通过实验数据拟合,得到反应速率常数 k 的值为 $1.8 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ 。在不同温度下,反应速率常数呈现出随温度升高而增加的趋势,符合阿伦尼乌斯公式的特点。温度对反应速率常数的影响较为显著,温度升高能够显著加速氰化反应,增加金的回收率。

4.3 动力学分析对工艺优化的指导意义

通过对氰化浸出反应的动力学分析,明确了温度和氰化剂浓度对金回收率的影响规律,为实际生产中工艺参数的优化提供了理论依据。合理调控反应条件,避免过高温或过量氰化剂的使用,有助于提高金的回收效率,并降低成本。

5 结语

本文基于响应面法优化了低品位金矿氰化浸出过程的工艺参数,并进行了氰化浸出反应的动力学分析。实验结果表明,响应面法能够有效优化氰化浸出工艺,提高金的回收率。动力学分析揭示了氰化反应的速率常数和反应机制,为实际生产中的参数调控提供了科学依据。未来,随着人工智能、大数据分析等技术的发展,氰化浸出过程的优化和风险评估将变得更加精确,推动金矿提取技术向更高效、环保的方向发展。

参考文献

- [1] 李金林.异氰酸盐浸金药剂的合成及其溶金机制研究[D].北京科技大学,2024.
- [2] 尚鹤.含砷锡金矿生物堆浸预氧化工艺调控及机理研究[D].北京有色金属研究总院,2024.
- [3] 刘超朋.功能化吸附材料的制备及其对Au(III)选择性吸附性能研究[D].华北水利水电大学,2023.
- [4] 张鑫.脱砷微生物的筛选和从难处理金矿除砷的研究[D].江西理工大学,2021.
- [5] 陈桥.尼尔森选矿机分选机理及低硫金矿石提金新工艺研究[D].东北大学,2021.