



文章栏目：固体废物处理与资源化

DOI 10.12030/j.cjee.202012002

中图分类号 T-F-09; T-Q-536

文献标识码 A

董萍, 宋永辉, 张红菊, 等. 利用矿浆电解技术处理氰化尾渣[J]. 环境工程学报, 2021, 15(5): 1662-1669.

DONG Ping, SONG Yonghui, ZHANG Hongju, et al. Treatment of cyanide tailings with slurry electrolysis technology[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(5): 1662-1669.

利用矿浆电解技术处理氰化尾渣

董萍¹, 宋永辉^{1,2,*}, 张红菊³, 陈瑶¹, 兰新哲^{1,2}

1. 西安建筑科技大学冶金工程学院, 西安 710055

2. 陕西省黄金与资源重点实验室, 西安 710055

3. 陕西锌业有限公司, 商洛 726007

第一作者: 董萍(1994—), 女, 博士研究生。研究方向: 黄金资源综合利用。E-mail: 401442329@qq.com

*通信作者: 宋永辉(1972—), 男, 博士, 教授。研究方向: 贵金属冶金, 纳米材料的制备及冶金资源综合利用。E-mail: syh1231@126.com

摘要 氰化提金所产生的氰化尾渣会带来环境污染隐患, 而氰化尾渣的无害化处理是黄金冶炼行业节能减排及可持续发展面临的关键问题。采用一步矿浆电解技术对氰化尾渣进行无害化处理, 研究了电解氯化处理过程中 NaCl 添加量、外加电压、极板间距和电解时间等因素对电解氧化效果的影响, 并采用高精度矿物解离分析系统对氰化尾渣进行了分析表征。研究表明, 在 NaCl 添加量 0.5 g、外加电压 8 V、极板间距 10 mm、电解时间 4 h 的条件下, 氰化尾渣 CN_T、CN⁻、Cu、Fe 及 Zn 离子的去除率分别为 94.83%、98.94%、85.65%、84.51% 与 73.85%。随着 NaCl 添加量的增大, 氰化尾渣中黄铁矿、磁黄铁矿与黄铜矿、闪锌矿等包裹矿物的解离度增大, 黄铁矿与黄铜矿、闪锌矿的连生比例分别降低了 12.04%、20.17%, 黄铁矿的自由面积百分比降低了 9.40%。电场作用下定向迁移至阳极的 Cl⁻ 优先氧化生成 Cl₂/ClO⁻, 与定向迁移至阳极附近的游离氰与金属氰络合离子发生氧化还原反应, 使得氰化物被氧化为 N₂ 和 CO₂, 部分金属离子则会在阴极发生电沉积反应, 从而实现快速、高效无害化处理氰化尾渣的目标。

关键词 氰化尾渣; 矿浆电解; 氯化; 阳极氧化

氰化提金所带来的环境污染隐患是黄金冶炼行业面临的共性关键难题。据统计, 我国每年产生的氰化尾渣数量约为 2.45×10^7 t^[1]。氰化尾渣中含有大量的氰化物和有价金属, 如果仅仅进行堆存或填埋处理, 不仅会污染环境, 而且也浪费了资源。因此, 氰化尾渣的无害化处理是黄金冶炼行业节能减排及可持续发展面临的关键问题。

氰化尾渣的综合利用主要包括预处理-二次提取金银, 综合回收铜、铁、锌, 以及无害化处理 3 大类。前 2 类侧重于有价资源的综合回收, 无害化处理则侧重于氰化物的破坏及重金属离子的去除。综合回收一般流程长、工艺较为复杂, 以浮选法为主; 无害化处理工艺则比较简单, 是解决氰化提金高污染问题最直接最有效的方法之一。目前, 氰化尾渣的无害化处理主要包括化学氧化法、电解氧化法、微生物分解法及自然净化法。采用 SO₂-空气氧化法处理氰化尾渣, 以铜为催化

收稿日期: 2020-12-01; 录用日期: 2021-04-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774227); 陕西省自然科学基金重点基金资助项目(2018JZ5011); 陕西省自然科学基金陕煤联合基金资助项目(2019JLM-44)

剂, SO_2 和空气的混合物在碱性条件下能将复合氰化物 (CN_{WAD}) 氧化为氰酸盐 (CNO^-), 同时沉淀除去金属和氧化铁^[2-3]。MANORANJAN 等^[4]的研究结果表明, 硫代硫酸盐和活性炭的混合物能够去除废水中的总氰化物和 CN_{WAD} 。ADJEI 等^[5]发现, 假单胞菌属、芽孢杆菌属等菌种都对氰化物有一定的降解能力。SAARELA 等^[2]发现, 在电化学氧化过程中, 氰化物和金属氰络合物首先在阳极被氧化成氰酸根离子, 然后进一步分解成无毒的 CO_2 和 N_2 , 释放出的金属阳离子在阴极处被还原成金属单质析出。一般情况下, 氰化尾渣的无害化处理主要可分为矿浆直接氧化和矿渣洗涤后含氰废水氧化 2 种。前者氧化剂消耗量大, 金属离子以沉淀形式进入渣中, 氰化尾渣中的有价金属并没有得到有效的去除; 而后者增加了洗涤、液固分离程序, 处理过程比较繁杂, 洗水量大, 处理难度相对增加。因此, 研究开发一种工艺简单、成本低、效果好的处理方法是黄金行业创新发展的迫切需要。

本研究中采用矿浆电解技术无害化处理氰化尾渣, 将氰化尾渣的洗涤、氰化物的电解氧化、金属离子的电解沉积和矿物的氧化分解集成在同一反应器中进行, 利用阳极反应生成的氯气/次氯酸根的强氧化性, 破坏含氰离子, 氧化包裹矿物, 提高氰化尾渣中矿物的单体解离度, 以期为后续有价金属的综合利用创造有利条件。

1 材料与方法

1.1 实验原料

本研究中所用原料为陕西省太白金矿浮选-金精矿炭浆提金后的氰化尾渣, 其主要组成为 CN_T 1 748.00 $\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 CN^- 327.40 $\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 Cu 184.80 $\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 Fe 3 632.04 $\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 Zn 15.84 $\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$, 即该氰化尾渣中总氰与铁氰络合离子含量较高。

1.2 实验装置

矿浆电解无害化处理氰化尾渣实验装置如图 1 所示。阴、阳极板均为 TC_4 钛合金板, 规格为 20 mm×15 mm×2 mm, 采用一阴两阳三板体系。电压由直流稳压电源控制, 型号为 LP2002D 型稳压电源, 搅拌装置采用 78-1 型磁力搅拌器。

1.3 实验方法

室温条件下 (约 25 $^{\circ}\text{C}$), 取 50 g 氰化尾渣、一定量的 NaCl 以及 200 mL 的去离子水加入到 500 mL 烧杯中, 用磁力搅拌器搅拌, 同时控制极板间距。电解一定时间后固液分离, 取滤液测定总氰、游离氰及各金属离子含量, 并计算各离子去除率, 尾渣用去离子水反复冲洗使 pH 稳定在 7 左右。

1.4 分析方法

氰化尾渣中 CN_T 、 CN^- 的含量按照 GB 5085.3-2007^[6] 所示硝酸银滴定法进行测定, 金属离子采用化学滴定法测定, 离子去除率按式 (1) 计算。

$$\varphi = \frac{C_a - C_b}{C_a} \cdot \frac{0.5 \times 10^{-3}}{50 \times 10^{-6}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_a 为氰化尾渣中各离子的浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; C_b 为处理后渣洗液中各离子的浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

实验中采用 FEI MLA 250 型高精度工艺矿物学参数自动测试系统 (MLA) 测定金属矿石的解离

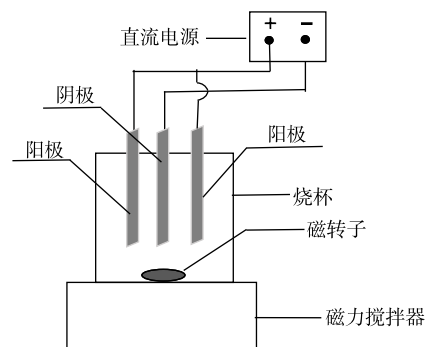


图 1 矿浆电解氰化尾渣实验装置

Fig. 1 Slurry electrolysis cyanide tailings experimental arrangement diagram

程度和连生关系。

2 结果与讨论

2.1 NaCl用量对各离子去除效果的影响

矿浆电解中, Cl^- 在阳极氧化生成的 Cl_2/ClO^- 是主要的氧化物, NaCl 的添加量是影响氰化尾渣氧化效果的重要因素之一。在极板间距 10 mm、电压 8 V、电解时间 4 h 的条件下进行矿浆电解实验, 结果如图 2 所示。随着 NaCl 添加量的增加, CN_T 、 CN^- 及 Cu 、 Zn 离子的去除率逐渐增大, 至 NaCl 添加量大于 0.5 g 后上述离子的去除率几乎不再增加, 最大去除率分别为 94.05%、98.25%、85.61%、73.92%。电解过程中, Cl^- 定向迁移至阳极表面, 发生阳极氧化反应产生有效氯 (ClO^- 和 Cl_2)(式 (2)~式 (4))。其中, 有效氯将游离氰化物、铜氰及锌氰络合离子氧化为氰酸盐及金属离子(式 5~式 10), 氰酸盐进一步被氧化为无毒的 N_2 和碳酸盐。同时, 金属离子定向迁移至阴极附近, 在阴极板上发生金属离子的沉积反应(式 (11)~式 (14))。随着 NaCl 用量的增大, 各离子的氧化去除效果不断增强的原因是矿浆中的 Cl^- 含量增加, 使得电极的电流效率和有效氯浓度增大^[7], 能够不断氧化去除氰离子和金属氰络离子。 NaCl 添加量大于 0.5 g 后, 离子去除率几乎不再变化的原因是, NaCl 添加量的增大造成溶液中离子浓度增加, 离子间距减小, 传质作用降低^[8], 导致有效氯的生成量不会有大幅度提高, 离子去除率便不再增加。

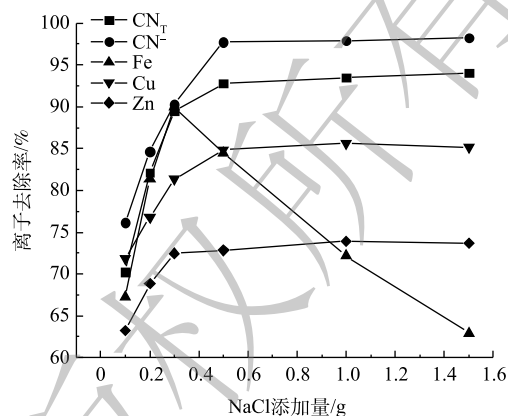
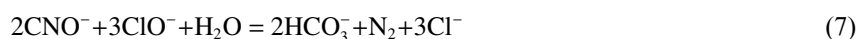


图 2 不同 NaCl 添加量下氰化尾渣中的氰化物及部分金属离子的去除率

Fig. 2 Removal rates of cyanide and some metal ions in cyanide tailings treated under different dosages of NaCl



值得注意的是, Fe 的去除率在 NaCl 添加量大于 0.3 g 时, 随着 NaCl 添加量的增大而大幅度降低, 最大仅为 84.46%。这是因为有效氯的含量随着 Cl⁻ 的增加而增加, ClO⁻ 会氧化部分黄铁矿和磁黄铁矿 (式 (15)~式 (16)), 使得矿石中的铁以离子形态再次回到矿浆液中, 导致 Fe³⁺ 去除率降低。

2.2 外加电压对各离子去除效果的影响

电压的大小直接影响 NaCl 的电解反应速率以及矿浆中 CN⁻ 的迁移过程, 进而影响氰化物的去除效果。在极板间距 10 mm、NaCl 添加量 0.5 g、电解时间 4 h 的条件下进行矿浆电解实验, 结果如图 3 所示。随着电压的升高, CN_T、CN⁻ 的去除率先增大, 在 8 V 之后趋于平缓, 去除率最大为 95.25%、98.97%; Cu、Fe、Zn 离子的去除率随电压增大而增大, 在 10 V 时达到最大值 85.86%、84.76% 和 73.99%, 随后有所下降。根据 Faraday 第一定律, 当电流通过电解质溶液时, 在电极界面上发生化学反应的物质与通过电极的电量成正比, 这说明电压是电化学反应过程的一种驱动力^[9], 随着电压的增大, 电流密度逐渐增大, 阳极析氯量增加, 氧化反应加剧, 各离子的去除率均不断上升。电压大于 8 V 以后, 随着电压的增大, 各离子去除几乎不再增加的原因: 一方面, 是由于电压过大会导致电极表面极化现象过大^[10-11], 造成电流密度减小, 不利于氧化反应的发生; 另一方面, 是难降解的铁氰络离子会与其他金属离子结合转化成更加稳定的金属铁氰络合物沉淀 (式 (17)~式 (18)), 不易被氧化去除。此外, 金属离子的去除率在大于 10 V 时呈现降低趋势, 其原因可能与尾渣中矿物的氧化溶解 (式 (15)、式 (19)、式 (20)) 有关。



2.3 电解时间对各离子去除效果的影响

电解时间是影响氰化尾渣中离子去除效果的一个重要因素。在极板间距 10 mm、NaCl 添加量 0.5 g、电压 8 V 的条件下, 改变电解时间进行矿浆电解实验, 结果如图 4 所示。随着电解时间的增长, CN_T、CN⁻ 及金属离子的去除率不断增大, CN_T 与 CN⁻ 的去除率在 4 h 之后趋于平缓。随着电解时间的增长, 溶液中不断生成有效氯用于氧化氰化物和金属氰化物; 电解 4 h 时, CN_T 与 CN⁻ 去除率已经达到 93.48%、97.84%, 而 Cu、Zn、Fe 离子去除率分别为 83.74%、77.52% 和 90.21%; 随后金属离子去除率的增幅开始变小。考虑到能耗的影响, 选择 4 h 为最佳的电解时间。

2.4 极板间距对各离子去除效果的影响

极板间距会影响电路电流大小、电解反应速率和传质效率。在 NaCl 添加量 0.5 g、电压 8 V、电解时间 4 h 的条件下, 改变极板间距进行矿浆电解实验, 结果如图 5 所示。随着极板间距增大, CN_T 与 CN⁻ 的去除率先增大后减小, 在极板间距为 10 mm 时达到最大, 分别为 95.25% 和 98.95%;

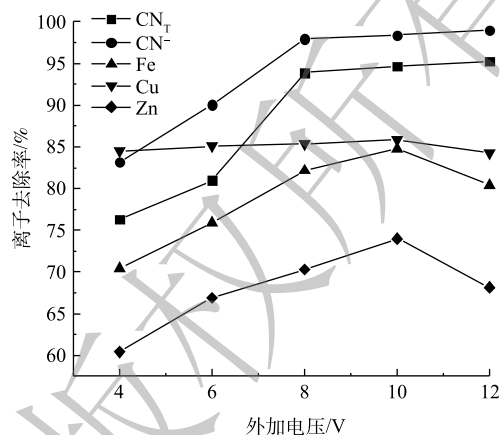


图 3 不同电压条件下氰化尾渣中的氰化物及部分金属离子的去除率

Fig. 3 Removal rates of cyanide and some metal ions in cyanide tailings treated under different tension

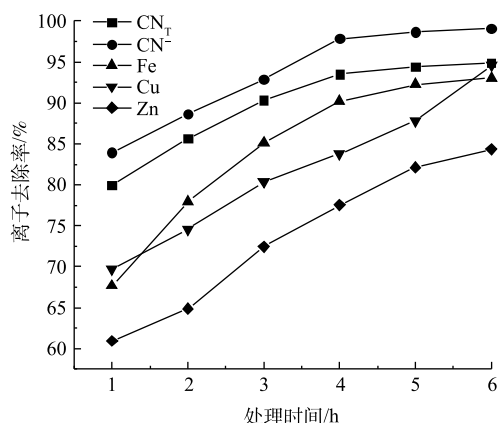


图4 不同电解时间条件下的氰化尾渣中的氰化物及部分金属离子的去除率

Fig. 4 Removal rate of cyanide and some metal ions in cyanide tailings treated under different electrolysis time

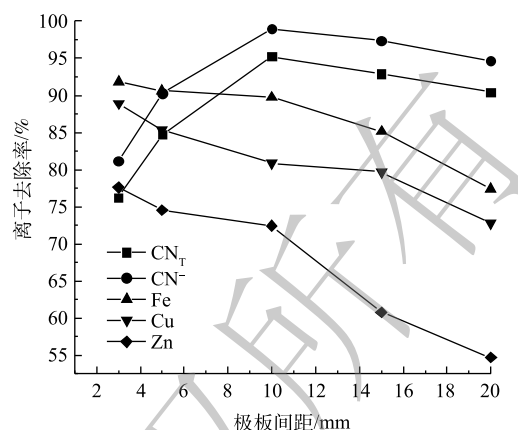


图5 不同极板间距氰化尾渣中的氰化物及部分金属离子的去除率

Fig. 5 Removal rates of cyanide and some metal ions in cyanide tailings treated under different plate spacing

Cu、Zn、Fe的离子去除率随极板间距增大而减小。极板间距过小时，极板间的电压差增大，易形成瞬时强大的电流，从而造成短路现象。随着极板间距的逐渐增大，极板上的析气反应逐渐正常，电解液流速提升，传质作用不断增强，氧化效果和离子去除率随之增大。但有研究者报道，当极板间距过大时，会导致槽电压和电能消耗不断增加^[12]，电解反应速率降低；随着反应的进行，离子浓度下降，导致浓差极化作用增强，亦造成金属单质在阴极表面沉积厚度增加，使得阴极电位降低^[13]，H⁺在金属单质表面的析出电位增高，最终氧化还原效果降低，从而导致氰化物及金属离子的去除率不断降低。

2.5 氰化尾渣中矿物解离度分析

根据 MLA 分析结果统计所得的电解氯化处理前后氰化尾渣主要矿物的解离度，如图 6 所示。黄铁矿、磁黄铁矿与黄铜矿、闪锌矿的连生比例如表 1 所示。当 NaCl 添加量为 0.1 g 时，尾渣中与黄铜矿、闪锌矿连生的黄铁矿、磁黄铁矿的比例存在小幅度的下降，表明电解产生的有效氯能在一定程度上氧化矿石，添加量较少时氧化效果不太明显。随着 NaCl 添加量的增加，矿物的解离度不断增加，与黄铜矿、闪锌矿连生的黄铁矿、磁黄铁矿比例大幅下降，同时有部分矿物被氧化溶解，矿物自由面积百分比含量也存在一定程度的降低。NaCl 添加量为 1.0 g 时，矿粒被氧化的程度继续加深，解离度进一步提高，但是，解离度过高使得更多的黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿暴露并被氧化，反而导致溶液中金属离子含量有所增加。

2.6 矿浆电解氰化尾渣平行验证实验

在极板间距 10 mm、外加电压 8 V、NaCl 用量 0.5 g、电解时间 4 h 的最佳工艺条件下进行了 A、B、C 3 组平行验证实验，结果如表 2 所示。由表 2 可以看出，最佳工艺条件下 CN_T、CN⁻以及 Cu、Fe、Zn 离子的去除率均值分别为 94.83%、98.94%、85.65%、84.51%、73.85%，说明氰化尾渣中大部分氰化物及金属离子已被去除。氰化尾渣中游离氰含量达到了国家黄金行业氰渣污染控制技术规范 (HJ 943-2018) 的要求。

2.7 矿浆电解氧化氰化尾渣过程分析

从热力学角度分析，氰化尾渣矿浆液中的还原性物质的氧化还原电极电位均小于氯的氧化还原电极电位，这些物质是可以被氯氧化的。各物质被氧化分解的顺序为：CN⁻>>Zn(CN)₄²⁻>Cu(CN)₃²⁻>>Fe(CN)₆⁴⁻。在有 NaCl 存在的电解体系中，矿浆液中的 CN⁻、Cu(CN)₃²⁻、Fe(CN)₆⁴⁻、Zn(CN)₄²⁻等阴离子

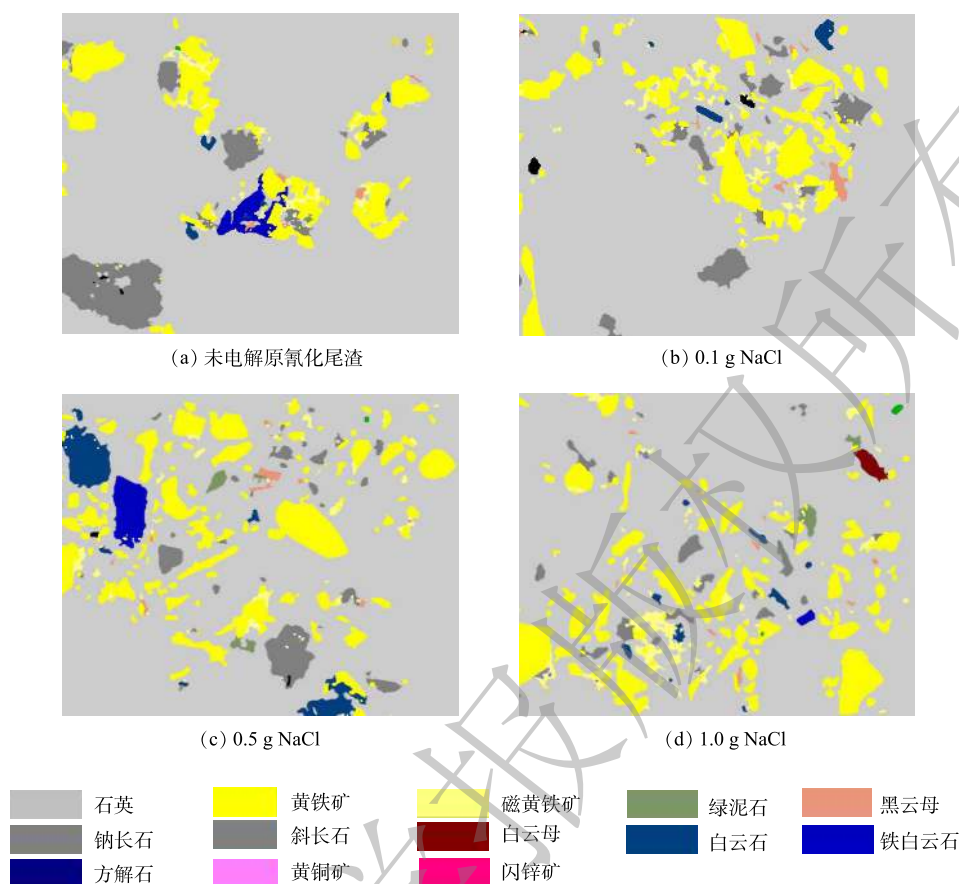


图 6 氰化尾渣和不同 NaCl 添加量电解后尾渣解离情况

Fig. 6 Dissociation situation of cyanide tailings and tailings after electrolysis with different NaCl additions

在电场的作用下向阳极定向迁移，Cl⁻离子在阳极上反应析出的 Cl₂ 和进一步溶解生成的 ClO⁻ 在阳极附近区域将 CN⁻、Cu(CN)₃²⁻、Fe(CN)₆⁴⁻ 等阴离子氧化，铜离子由 +1 价被氧化至 +2 价，氰离子被氧化为无害的 N₂ 和碳酸盐，Fe(CN)₆⁴⁻ 被氧化为 Fe(CN)₆³⁻。Cu(CN)₃²⁻ 和 Zn(CN)₄³⁻ 的氧化在阳极附近释放出溶液中的金属离子大部分在阴极发生沉积反应，只有少量 Cu²⁺ 及 Zn²⁺ 会与溶液中的铁氰络合离子发生沉淀反应，生成亚铁氰化铜、亚铁氰化锌以及铁氰化亚铜^[14-15]，沉降到矿浆渣中。

3 结论

1) 采用一步矿浆电解技术可有效处理氰化尾渣中的氰化物，当极板间距 10 mm、外加电压 8 V、NaCl 添加量 0.5 g、电解时间 4 h 时，CN_T、CN⁻、Cu、Fe 以及 Zn 离子的去除率

表 1 黄铁矿、磁黄铁矿与闪锌矿、黄铜矿之间的连生比例

Table 1 Relationship between pyrite, pyrrhotite and sphalerite, chalcopyrite

矿物	实验条件	连生比例/%		自由面积百分比/%
		与闪锌矿	与黄铜矿	
黄铁矿	原氰化尾渣	35.16	20.91	49.67
	0.1 g NaCl	30.80	16.91	57.54
	0.5 g NaCl	14.99	8.87	40.27
	1.0 g NaCl	10.69	5.40	28.26
磁黄铁矿	原氰化尾渣	4.35	11.55	57.50
	0.1 g NaCl	3.76	9.55	62.43
	0.5 g NaCl	1.47	3.91	32.22
	1.0 g NaCl	0.51	1.79	19.80

分别可达到 94.83%、98.94%、85.65%、84.51% 和 73.85%。

2) 矿浆电解处理氰化尾渣过程中阳极附近主要发生的是氰化物的直接氧化与间接氧化, 阴极板主要是 Cu、Fe、Zn 等重金属离子的电解沉积。随着电解电压、NaCl 添加量以及电解时间的增大, 金属矿物的解离度不断增加, 矿物之间的连生比例不断降低, 尾渣中黄铁矿、磁黄铁矿的大颗粒连生体被分解为小颗粒的单体态并不断被电解氧化溶解。

表 2 最佳条件下氰化尾渣中氰化物及部分金属离子的去除率

Table 2 Removal rates of cyanide and some metal ions in cyanide tailings treated under best conditions

离子种类	滤渣中平均离子含量/(g·t ⁻¹)	平均离子去除率/%
CN _T	90.31	94.83
CN ⁻	3.34	98.94
Cu	26.52	85.65
Zn	949.78	73.85
Fe	2.45	84.51

参 考 文 献

- [1] 吕翠翠, 丁剑, 付国燕, 等. 氰化尾渣中有价元素回收现状与展望[J]. 化工学报, 2016, 67(4): 1079-1089.
- [2] SAARELA K, KUOKKANEN T. Alternative disposal methods for wastewater containing cyanide: Analytical methods for new electrolysis technology developed for total treatment of wastewater containing gold or silver cyanide[C]//Proceedings of the Waste Minimization and Resource Use Optimization Conference. Finland, 2004: 107-121.
- [3] HOWELL C, CHRISTOPHERSEN D. Three-phase mining effluent treatment plant to meet stringent standards[J]. Engineering and Mining Journal, 2009, 210(3): 48-51.
- [4] MANORANJAN M, GAUTAM P, KUMAR J B. Cyanide detoxification process[J]. Patent Issued, 2003, 27(6): 32-34.
- [5] ADJEI M D, OHTA Y. Factors affecting the biodegradation of cyanide by Burkholderia cepacia strain C-3[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2000, 89(3): 274-277.
- [6] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 危险废物鉴别标准-浸出毒性鉴别标准: GB 5085.3-2007[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [7] 刘纯玮, 冯莉, 冯一纳, 等. 无隔膜法电解制备次氯酸钠及其稳定性研究[J]. 化工学报, 2018, 69(2): 5246-5255.
- [8] 田建茹, 宁海丽, 王征, 等. 氰化尾渣资源化技术及环境影响应用研究[J]. 环境科学与管理, 2019, 44(6): 24-28.
- [9] LI X Q, WU X M, JIA Y N, et al. Research on electrolysis parameters on the running effect of sodium hypochlorite reactor[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(11): 135-138.
- [10] BADRUZZAMAN M, OPPENHEIMER J, ADHAM S. Innovative beneficial reuse of reverse osmosis concentrate using bipolar membrane electro dialysis and electrochlorination processes[J]. Journal of Membrane Science, 2009, 326(2): 392-399.
- [11] BERGMANN M E H, KOPARAL A S. Studies on electrochemical disinfectant production using anodes containing RuO₂[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2005, 35(12): 1321-1329.
- [12] LIU J H, WANG J J. Summary on tests of membrane polar distance of ion-exchange membrane electrolyzers with high current density[J]. Chlor-Alkali Industry, 2011, 47(2): 20-21.
- [13] 邱沙, 陈志国, 郭鹏志, 等. 淋洗-废水解毒工艺处理氰化物污染土壤[J]. 环境工程学报, 2017, 11(10): 5737-5742.
- [14] 刘会芳, 乔建刚, 田世超, 等. 石墨烯修饰的二氧化钛纳米管电极光电催化去除铜氰络合物研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(6): 2027-2032.
- [15] 游丽燕, 胡承志, 刘会娟, 等. 富含活性氯与Al₁₃水处理药剂对铜氰络合物去除效能[J]. 环境工程学报, 2014, 8(4): 1391-1396.

(责任编辑: 金曙光)

Treatment of cyanide tailings with slurry electrolysis technology

DONG Ping¹, SONG Yonghui^{1,2,*}, ZHANG Hongju³, CHEN Yao¹, LAN Xinzhe^{1,2}

1. School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China

2. Shaanxi Gold and Resources Key Laboratory, Xi'an 710055, China

3. Shaanxi Zinc Industry Co. Ltd., Shangluo 726007, China

*Corresponding author, E-mail: syh1231@126.com

Abstract In this paper, one-step pulp electrolysis technology is used to detoxify cyanide tailings from gold smelting. NaCl addition amount, applied voltage, electrode spacing and electrolysis time were studied on electrolytic oxidation during direct electrolytic chlorine oxidation. Mineral Liberation Analyzer was used to deeply analyze the oxidation reaction mechanism of cyanide and the main encapsulated minerals during the process. The results show that with NaCl dosage of 0.5 g, the applied voltage of 8.0 V, plate spacing of 10 mm and electrolysis time of 4 h, the removal rates of CN_T , CN^- , Cu, Fe and Zn in the slurry are 94.83%, 98.94%, 85.65%, 84.51% and 73.85%, respectively. After the treatment, the proportion of pyrite from chalcopyrite and sphalerite continuously reduced by 12.04% and 20.17%, respectively, and free surface percentage content of pyrite reduced by 9.4%. Under the action of an electric field, Cl^- migrates to the anode and preferentially oxidizes to Cl_2/ClO^- , which undergoes a redox reaction with the free cyanide and metal cyanide complex ions that migrate to the vicinity of the anode, resulting in the oxidation of cyanide to N_2 and CO_2 , and some metal ions were precipitated by the electrodeposition reaction at the cathode. This study can achieve the goal of rapid, efficient and harmless treatment of cyanide tailings.

Keywords cyanidation residue; pulp electrolysis; oxychlorination; anodic oxidation