

引用格式:张众,伊力亚斯·艾合买提江,赵晨晨,等. 中和除铁铝工艺 pH 值控制原理分析[J]. 有色设备,2025,39(3):91-98.

ZHANG Zhong, Yiliyasi Aihemaitijiang, ZHAO Chenchen, et al. Analysis of pH control principle in neutralization and removal of iron and aluminum[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(3): 91-98.

# 中和除铁铝工艺 pH 值控制原理分析

张 众, 伊力亚斯·艾合买提江, 赵晨晨, 曹 刚, 孟熙祥

(瑞木镍钴管理(中冶)有限公司, 北京 100000)

**[摘 要]** 针对红土镍矿中镍钴品位低、杂质金属难以有效分离的问题, 工业生产中通常采用浓硫酸湿法高温高压浸出工艺, 使矿石中的金属氧化物与硫酸反应生成可溶性硫酸盐, 实现镍、钴及杂质金属离子的转化。为提升产品纯度, 需精准调控沉淀 pH, 使杂质离子与有价金属离子有效分离。本文基于不同金属沉淀物的溶解平衡常数, 推导出符合实际工况的 pH 控制公式, 建立了适用于生产的理论模型。研究成果为杂质高效去除与产品质量提升提供了理论依据, 助力红土镍矿资源的高效开发与稳定运行。

**[关键词]** 红土镍矿; 沉淀; 溶解平衡; 溶度积常数; pH 值

**[中图分类号]** TF815 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)03-0091-08

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.03.010

## 0 前言

镍金属矿主要有硫化镍矿以及氧化物镍矿, 氧化物镍矿中红土镍矿的镍钴品位相对较低<sup>[1-4]</sup>。瑞木镍钴管理(中冶)有限公司镍矿是低品位的氧化物红土镍矿, 镍的生产工艺主要有: 火法工艺, 湿法工艺, 湿法与火法联合工艺以及其他新技术。红土镍矿中的褐铁矿层的铁含量较高、镁和镍含量较低, 通常含有一定数量的钴, 结晶性较差, 且结构较为疏松, 所以不适用传统的火法冶炼方法来进行镍钴提炼。瑞木镍钴管理(中冶)有限公司采用高温、高压、强酸浸出的湿法工艺对红土镍矿进行提炼。金属氧化物在高压釜中与浓硫酸发生反应, 镍钴以及铁铝镁锰等杂质离子被浸出以硫酸盐形式存在于浸出液中。逆流洗涤只能洗去未浸出渣表面及孔隙粘附的镍钴离子, 无法通过物理洗涤除去浸出液中的杂质离子, 大部分浸出的杂质元素经过逆流洗涤后随镍钴离子进入中和工序, 所以中和工序的除杂至关重要, 除杂的效率直接影响最终产品的品质和含杂量。中和除铁铝工序采用一个系列两段工序: ①一段除铁铝工序除去较多的杂质离子; ②二段除铁铝工序除去浸出液中剩余的杂质离子, 生产中通过

向浸出液中添加石灰浆调节 pH 值来沉降铁铝离子。影响除杂效率的因素较多, 其中 pH 值控制是最重要影响因素。在生产过程中浸出液的温度相对稳定, 所以沉淀物的溶度积常数基本维持不变, 温度对其影响较小, 所以初始浸出液的杂质元素离子浓度变化会直接导致 pH 值变化。合理精准的 pH 值控制是除铁铝效率的最关键步骤, 以沉淀的溶解平衡原理来控制<sup>[7-9]</sup>。本文通过对不同的杂质铁离子浓度、不同的杂质铝离子、初始溶液的 pH 值影响因素进行公式推算, 得出不同参数情况下的 pH 值精确控制和石灰浆加入量计算。

## 1 红土镍钴湿法浸出工艺介绍

红土镍矿高压强酸浸出提炼工艺在应用中已成熟, 通过将较低品位红土镍矿选矿配矿制浆后浓密增固, 增固后的矿浆经过三级预热器预热将矿浆温度加热至 200 °C 左右, 预热后的矿浆在高压釜内通过蒸汽二次加热使矿浆温度达到 252 °C 左右的最佳浸出温度, 矿浆中的金属氧化物与浓硫酸反应形成硫酸盐溶液, 浸出液经过三级闪蒸泄压之后进入 E143 循环浸出系列, 在循环浸出区域加入适量石灰浆对浸出液 pH 值进行调节控制降低浸出液中的残

**[收稿日期]** 2024-12-19

**[第一作者]** 张众(1995—), 男, 甘肃靖远人, 助理工程师, 硕士, 主要从事有色金属冶炼工艺研究工作。

酸浓度,然后通过 CCD 逆流洗涤工序<sup>[5-6]</sup>,洗去未反应渣上面粘附的浸出液镍钴金属离子,CCD1 溢流进入中和除铁铝工序,通过调节 pH 值除去浸出液中的铁铝杂质离子,除铁铝沉淀浓密工序通过浓密机对沉降的铁铝渣进行浓密固液分离,经过两级浓密机分离后的溢流送至沉镍钴工序,一段沉镍钴工序添加适量稀释的液碱溶液调节 pH 值沉淀镍钴金属离子,沉降后的混合液经浓密机固液分离,部分底流送至产品压滤机压滤包装形成产品 MHP,部分底流返回一段沉镍钴工序作为晶种加速镍钴离子沉降结晶速率。溢流进入二段沉镍钴装置强化镍钴沉淀,沉降后的镍钴和一段沉镍钴采用相同的方式进行固液分离以及底流输送,调节 pH 值来满足除铁铝工序金属离子沉淀的溶解平衡状态。

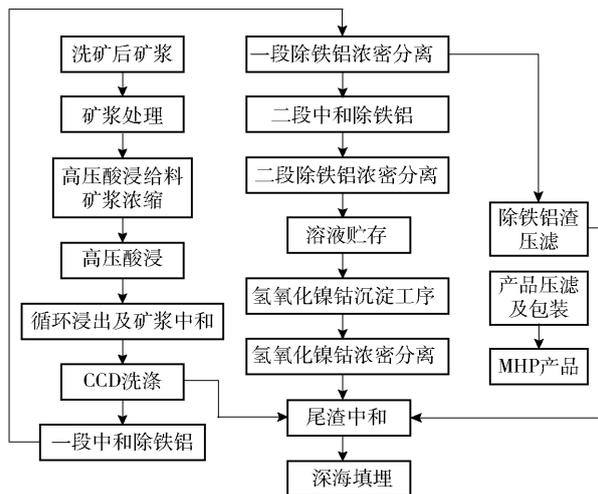


图 1 红土镍矿高压酸浸湿法提炼工艺流程

Fig. 1 Schematic diagram of the hydrometallurgical process for nickel laterite leaching by high-pressure acid leaching (HPAL)

## 2 中和除铁铝工艺

中和除铁铝工序主要采用石灰浆调节 CCD1 溢流液的 pH 值,使其达到沉淀初始形成沉淀的 pH 值,根据沉淀溶解平衡以及沉淀效率计算对应的 pH 控制,将除铁铝工艺中的 pH 精确控制提出公式以及反应阶段推导,为稳定生产提供理论指导。

### 2.1 一段除铁铝

中和除铁铝作为生产过程中唯一的除杂工序,需要保证高效的除铁铝效率,假设 CCD1 溢流中含铁浓度为  $a$  (单位:  $g/L$ ),含铝离子浓度为  $b$  (单位:

$g/L$ ), CCD1 溢流的 pH 值为  $c$ , E144 单位时间进料流量为  $Q$  (单位:  $m^3/h$ ),在 E144 进料温度下氢氧化铁的溶度积为  $m$ ,氢氧化铝的溶度积为  $n$ ,石灰浆有效浓度为  $D$ ,石灰浆密度为  $\rho$ ,且忽略温度对 2 种沉淀溶度积值的影响(实际温度变化不大的情况下,沉淀物的溶度积常数变化较小),该温度下水的电解常数为  $kw$ ,一段除杂效率为  $\eta$ , E144 处理浸出液体积  $V$ ,处理时间  $t$ ,如果处理时间为 1 h 的浸出液,  $V = Q$ ,则有以下计算结果。

#### 2.1.1 pH 值控制

初始浸出液:铁离子浓度  $a/56 \text{ mol/L}$ ;铝离子浓度  $b/27 \text{ mol/L}$ 。

中和除铁铝工序反应:



式中,  $A$  代表 Fe 和 Al。

沉淀溶解平衡<sup>[10-11]</sup>是除铁铝工序反应 pH 值控制的主要原理,通过计算对应效率下以及反应完全时溶液中的沉淀溶解平衡来计算 pH 值,具体计算如下。

除杂效率  $\eta$  对应平衡态下铁离子浓度  $C(OH^-)_{Fe}$ :

$$C(OH^-)_{Fe} = \sqrt[3]{\frac{m}{(1-\eta)(a/56)}} \quad (2)$$

此除铁效率下溶液的  $pH_1$ :

$$pH_1 = -\log \frac{kw}{\sqrt[3]{\frac{m}{(1-\eta)(a/56)}}} \quad (3)$$

除杂效率  $\eta$  对应平衡态下铝离子浓度  $C(OH^-)_{Al}$ :

$$C(OH^-)_{Al} = \sqrt[3]{\frac{n}{(1-\eta)(b/27)}} \quad (4)$$

此除铝效率下溶液的  $pH_2$ :

$$pH_2 = -\log \frac{kw}{\sqrt[3]{\frac{n}{(1-\eta)(b/27)}}} \quad (5)$$

铁离子初始沉淀时最小  $pH_3$  值:

$$pH_3 = -\log \frac{kw}{\sqrt[3]{\frac{m}{(a/56)}}} \quad (6)$$

铝离子初始沉淀时最小  $pH_4$  值:

$$pH_4 = -\log \frac{kw}{\sqrt[3]{\frac{n}{(b/27)}}} \quad (7)$$



$$C_2 = \frac{kw}{\sqrt[3]{\frac{n}{b/27}}} \quad (12)$$

假设  $\sqrt[3]{\frac{kw}{a/56}}$  是较小 pH 值下的氢离子浓度, 则

石灰浆的调节量有以下计算结果:

$$n_1(\text{CaCO}_3) = (1 \times 10^{-c} - C_1) \times V/2 \quad (13)$$

$$V_{1(\text{石灰浆})} = \frac{m}{\rho} = \frac{n_1(\text{CaCO}_3) \times 100}{\rho \times D} \quad (14)$$

假设  $\sqrt[3]{\frac{kw}{a/27}}$  是较小 pH 值下的氢离子浓度, 石

灰浆的调节量有以下计算结果:

$$n_1(\text{CaCO}_3) = (1 \times 10^{-c} - C_2) \times V/2 \quad (15)$$

$$V_{1(\text{石灰浆})} = \frac{m}{\rho} = \frac{n_1(\text{CaCO}_3) \times 100}{\rho \times D} \quad (16)$$

II : a. 假设  $\sqrt[3]{\frac{kw}{a/56}}$  是较小 pH 值下的氢离子浓

度, 则石灰浆的调节加入量计算有以下计算结果。

中和氢离子消耗石灰浆:

$$n_2(\text{CaCO}_3) = (C_1 - C_2) \times V/2 \quad (17)$$

$$V_{2(\text{石灰浆})} = \frac{m}{\rho} = \frac{n_2(\text{CaCO}_3) \times 100}{\rho \times D} \quad (18)$$

忽略因为一阶段添加石灰浆导致整体溶液体积变化。

b: a. 假设  $\sqrt[3]{\frac{kw}{a/27}}$  是较小 pH 值下的氢离子浓

度, 则石灰浆的调节加入量计算有以下计算结果。

中和氢离子消耗石灰浆:

$$n_2(\text{CaCO}_3) = (C_2 - C_1) \times V/2 \quad (19)$$

$$V_{2(\text{石灰浆})} = \frac{m}{\rho} = \frac{n_2(\text{CaCO}_3) \times 100}{\rho \times D} \quad (20)$$

III : 第三阶段反应过程中铁铝离子消耗的石灰浆计算如下:

$$n_{3(\text{Fe}^{3+})}(\text{CaCO}_3) = a/56 \times \eta \times 1.5 \quad (21)$$

$$n_{3(\text{Al}^{3+})}(\text{CaCO}_3) = b/27 \times \eta \times 1.5 \quad (22)$$

$$V_{3(\text{石灰浆})(\text{Fe}^{3+})} = \frac{m}{\rho} = \frac{n_{3(\text{Fe}^{3+})} \times 100}{\rho \times D} \quad (23)$$

$$V_{3(\text{石灰浆})(\text{Al}^{3+})} = \frac{m}{\rho} = \frac{n_{3(\text{Al}^{3+})} \times 100}{\rho \times D} \quad (24)$$

综上, 在一段除铁铝工序中保持除铁铝效率  $\eta$

下, 需要消耗的石灰浆体积为:

$$V = V_{1(\text{石灰浆})} + V_{2(\text{石灰浆})} + V_{3(\text{石灰浆})(\text{Fe}^{3+})} + V_{3(\text{石灰浆})(\text{Al}^{3+})} = \frac{n_1(\text{CaCO}_3) \times 100}{\rho \times D} + \frac{n_2(\text{CaCO}_3) \times 100}{\rho \times D} + \frac{n_{3(\text{Fe}^{3+})} \times 100}{\rho \times D} + \frac{n_{3(\text{Al}^{3+})} \times 100}{\rho \times D} \quad (25)$$

其中  $V_1$  和  $V_2$  代入视分类情况。

详细地分析和推导了每个阶段的石灰浆消耗计算公式, 实际生产过程中可以通过质量守恒的方式去计算石灰浆的加入量, 以石灰浆调节 pH 值, 先计算出初始溶液 pH 值到终点 pH 值时所消耗的石灰浆量, 然后根据初始铁铝离子浓度和终点铁铝离子浓度来计算石灰浆的消耗量, 之后将两部分量加起来就是实际反应消耗的石灰浆量。

## 2.2 二段除铁铝工艺

二段除铁铝反应结束时, 国际标准默认溶液中的离子浓度为  $1 \times 10^{-6}$  代表离子完全沉淀, 国内标准默认离子浓度为  $1 \times 10^{-5}$  代表离子完全沉淀。

### 2.2.1 pH 控制

1) 以国际标准计算。

铁离子完全沉淀时溶液的 pH<sub>5</sub>:

$$\text{pH}_5 = -\log \frac{kw}{\sqrt[3]{\frac{m}{10^{-6}}}} \quad (26)$$

铝离子完全沉淀时溶液的 pH<sub>6</sub>:

$$\text{pH}_6 = -\log \frac{kw}{\sqrt[3]{\frac{n}{10^{-6}}}} \quad (27)$$

2) 以国内标准计算。

铁离子完全沉淀时溶液的 pH<sub>5</sub>:

$$\text{pH}_5 = -\log \frac{kw}{\sqrt[3]{\frac{m}{10^{-5}}}} \quad (28)$$

铝离子完全沉淀时溶液的 pH<sub>6</sub>:

$$\text{pH}_6 = -\log \frac{kw}{\sqrt[3]{\frac{n}{10^{-5}}}} \quad (29)$$

比较 pH<sub>5</sub> 和 pH<sub>6</sub> 的大小, 二段除铁铝终点 pH 值应选择控制在较大 pH 值。

### 2.2.2 石灰浆加入量计算

二段除铁铝过程中主要石灰浆消耗是以铁铝离子沉淀反应为主的, 其中二段除铁铝工序铁离子水解消耗的石灰浆为:

以国际标准计算:

$$n_{4(\text{Fe}^{3+})}(\text{CaCO}_3) = [ [(a/56) \times (1 - \eta)] - (1 \times 10^{-6}) ] \times 1.5 \quad (30)$$

$$V_{4(\text{石灰浆})(\text{Fe}^{3+})} = \frac{m}{\rho} = \frac{n_{4(\text{Fe}^{3+})} \times 100}{\rho \times D} \quad (31)$$

以国内标准计算:

$$n'_{4(\text{Fe}^{3+})}(\text{CaCO}_3) = [ [(a/56) \times (1 - \eta)] - (1 \times 10^{-5}) ] \times 1.5 \quad (32)$$

$$V'_{4(\text{石灰浆})(\text{Fe}^{3+})} = \frac{m}{\rho} = \frac{n'_{4(\text{Fe}^{3+})} \times 100}{\rho \times D} \quad (33)$$

二段除铁铝工序铝离子水解消耗的石灰浆为:

以国际标准计算:

$$n_{4(\text{Al}^{3+})}(\text{CaCO}_3) = [ [(b/27) \times (1 - \eta)] - (1 \times 10^{-6}) ] \times 1.5 \quad (34)$$

$$V_{4(\text{石灰浆})(\text{Al}^{3+})} = \frac{m}{\rho} = \frac{n_{4(\text{Al}^{3+})} \times 100}{\rho \times D} \quad (35)$$

以国内标准计算:

$$n'_{4(\text{Al}^{3+})}(\text{CaCO}_3) = [ [(b/27) \times (1 - \eta)] - (1 \times 10^{-5}) ] \times 1.5 \quad (36)$$

$$V'_{4(\text{石灰浆})(\text{Al}^{3+})} = \frac{m}{\rho} = \frac{n'_{4(\text{Al}^{3+})} \times 100}{\rho \times D} \quad (37)$$

因此,二段除铁铝工序消耗的石灰浆体积为:

以国际标准计算时:

$$V_{\text{总}} = V_{4(\text{石灰浆})(\text{Fe}^{3+})} + V_{4(\text{石灰浆})(\text{Al}^{3+})} = \frac{n_{4(\text{Fe}^{3+})} \times 100}{\rho \times D} + \frac{n_{4(\text{Al}^{3+})} \times 100}{\rho \times D} \quad (38)$$

其中,代入  $n_{4(\text{Fe}^{3+})}$  和  $n_{4(\text{Al}^{3+})}$ , 终点铁铝离子浓度采用国际标准  $1 \times 10^{-6}$ 。

以国内标准计算时:

$$V'_{\text{总}} = V'_{4(\text{石灰浆})(\text{Fe}^{3+})} + V'_{4(\text{石灰浆})(\text{Al}^{3+})} = \frac{n'_{4(\text{Fe}^{3+})} \times 100}{\rho \times D} + \frac{n'_{4(\text{Al}^{3+})} \times 100}{\rho \times D} \quad (39)$$

其中:代入  $n'_{4(\text{Fe}^{3+})}$  和  $n'_{4(\text{Al}^{3+})}$ , 终点铁铝离子浓度采用国内标准  $1 \times 10^{-5}$ 。 $n_{X(\text{Fe}^{3+})}/n'_{X(\text{Fe}^{3+})}$  代表铁离子水解消耗碳酸钙物质的量,  $n_{X(\text{Al}^{3+})}/n'_{X(\text{Al}^{3+})}$  代表铝离子水解消耗碳酸钙物质的量, 其中  $X$  为 3, 4。

### 3 生产实际数据与理论推算数据对比分析

根据公式推算, 影响 pH 值和石灰浆加入量的因素主要有: 浸出液流量、浸出液中铁铝离子浓度、初始溶液 pH 值、石灰浆密度、石灰浆有效浓度等参数, 下文对这些影响因素进行分析讨论。

#### 3.1 生产控制 pH 值与理论计算 pH 值对比分析

表 1 为中和除铁铝生产过程的实际 pH 值控制和理论 pH 值计算结果对比分析, 以验证上述反应过程的推导公式的实用性, 为工业生产 pH 精确化控制提供理论帮助。

表 1 一段除铁铝工序 pH 精确化控制计算

Table 1 Precise pH control calculation in the primary iron and aluminum removal stage

序号	CCD1 溢流 含铁量/ (g·L <sup>-1</sup> )	CCD1 溢流 含铝量/ (g·L <sup>-1</sup> )	CCD1 溢流 含亚铁量/ (g·L <sup>-1</sup> )	一段除铁铝 后液含铁 量/(g·L <sup>-1</sup> )	一段除铁铝 后液含铝 量/(g·L <sup>-1</sup> )	一段除铁铝 后液含亚铁 量/(g·L <sup>-1</sup> )	$\eta$ (除铁)/ %	$\eta$ (除铝)/ %	实际 pH	理论 pH 值
1	1.655	2.844	0.55	0.72	0.32	0.38	56.5	88.8	3.96	3.73
2	1.615	3.108	0.61	0.72	0.61	0.31	55.4	80.3	3.73	3.64
3	1.994	3.716	0.60	0.71	0.17	0.08	64.4	95.4	3.99	3.82
4	1.782	3.117	0.45	0.73	0.27	0.16	59.0	91.3	3.86	3.76
5	1.786	2.580	0.53	0.70	0.43	0.26	60.8	83.3	3.93	3.69
6	1.835	2.702	0.49	0.68	0.37	0.23	62.9	86.3	3.81	3.71

注: E144 理论 pH 值根据上述推动公式计算,  $\eta_{\text{除铁}} = (\text{CCD1 溢流含铁量} - \text{一段除铁后液铁含量}) / \text{CCD1 溢流含铁量} \times 100\%$ ,  $\eta_{\text{除铝}} = (\text{CCD1 溢流含铝量} - \text{一段除铁后液铝含量}) / \text{CCD1 溢流含铝量} \times 100\%$ 。

在 25 ℃ 时, 氢氧化铁的溶度积常数为  $1.1 \times 10^{-36}$ , 氢氧化铝的溶度积常数为  $1.9 \times 10^{-33}$ , 考虑

到溶度积常数只受温度影响, 且在温度不发生大幅度变化时, 溶度积常数基本不变, 所以在计算除铁铝

溶解平衡时以 25 ℃ 温度对应下的溶度积常数为例来计算。

把一段除铁铝后液铁离子含量 1.655 g/L、溶度积常数和除铁效率代入公式得：

$$\text{pH}_1 = -\log \sqrt[3]{\frac{kw}{(1-\eta)a \times 56} \cdot \frac{m}{27}} = 2.65 \quad (40)$$

把一段除铁铝后液铝离子含量 2.844 g/L、溶度积常数和除铝效率代入公式得：

$$\text{pH}_2 = -\log \sqrt[3]{\frac{kw}{(1-\eta)b \times 27} \cdot \frac{m}{56}} = 3.73 \quad (41)$$

综合对比,在控制一段除铁铝后液铁离子浓度为 0.72 g/L 时需要控制 pH 理论值为 2.65,铝离子浓度在 0.32 g/L 时需要理论 pH 值为 3.73,除铁铝工序是在同一反应容器中进行反应,所以一段除铁铝终点 pH 控制以较大 pH 值为准。

依次对序号 2~6 的 pH 值进行计算将理论 pH 填入表中,经过计算发现一段理论 pH 值与实际值比较接近,且实际值均高于理论值 0.1~0.2,属正常范围,因为实际反应会受反应效率影响。通过上述计算为除铁铝工序稳定控制 pH 值提供理论计算,确保生产稳定进行,因此,pH 值的精确化控制至关重要。

一段除铁铝工序是保证整个除铁铝工序有足够的除铁铝效率,最终决定除铁铝是否彻底的工序是二段除铁铝,按国内标准,由式(28)(29)计算出铁离子完全沉淀时的 pH 值为 3.68,铝离子完全沉淀的 pH 值为 4.76,因为除铁铝二段工艺终点 pH 值控制与初始离子浓度等不相关,所以生产过程中二段除铁铝工序 pH 值控制在  $4.76 + (0.1 - 0.2)$ ,可在该基础上适当上调 pH 值或延长反应时间,二段 pH 值控制一定不能低于理论沉淀 pH 值,防止铁铝沉淀不完全进入产品,导致产品含杂质较高。

### 3.2 生产实际石灰浆加入量与理论计算加入量对比分析

生产过程中的流量相对稳定,正常生产期间不会发生较大变化,除铁铝工序的处理流量基本维持在 1600 m<sup>3</sup>/h,石灰浆的密度为 1.3 g/cm<sup>3</sup>,石灰浆的有效浓度为 33%,有效成分为碳酸钙,以上述数据为准代入表 1 中的一段除铁铝工序的初始和反应后离子浓度、溶液初始 pH 值以及终点理论 pH 值代

入上述推导公式中计算出理论石灰浆加入量列入表 2。

表 2 E144 一段除铁铝石灰浆加入量生产统计数据  
Table 2 Production statistical data on lime slurry addition for iron and aluminum removal in stage 1 of E144

序号	初始溶液 pH 值	实际 pH 值	理论 pH 值	实际加入量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	理论加入量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
1	1.73	3.96	3.73	60.3	58.8
2	1.65	3.73	3.64	60.6	58.8
3	1.76	3.99	3.82	90.3	87.9
4	1.69	3.86	3.76	75.8	72.8
5	1.80	3.93	3.69	59.7	56.6
6	1.68	3.81	3.71	65.7	62.1

注:初始溶液中的铁铝离子以及一段反应后的铁铝离子见表 1。

从表 2 中的一段除铁铝石灰浆理论加入量计算可以看出,对比实际加入量,理论加入量相对较少,但是理论值与实际值数据差距较小,理论值是由沉淀反应彻底来衡量,但是生产实际过程中,由于反应时间以及石灰浆粒度等其他原因都会导致加入的石灰浆反应不完全,实际的加入量需高于理论计算值,这样可以保证足够的反应效率。过多增加石灰浆的加入量,从成本上考虑不经济,另一方面会导致沉淀生成量的变化以及系统其他环节不稳定,因此,石灰浆实际加入量在理论计算值的基础上增加 2~3 m<sup>3</sup>/h 的石灰浆加入量。

对比表 3 二段除铁铝工序石灰浆理论计算值和实际生产石灰浆加入量,可以发现实际石灰浆的加入量高于理论加入量,而且理论石灰浆的加入量也是存在差异性,这主要归因于一阶段除铁铝后液的铁铝离子浓度不同。生产过程中实际的石灰浆加入量不能低于理论值,实际加入量参照理论计算值以及反应结束溶液中的杂质离子浓度以及反应时间进行上调,一般石灰浆可上调流量 1~2 m<sup>3</sup>/h。

### 3.3 初始铁铝离子浓度对石灰浆加入量的影响

从表 3 中也可直接看出溶液中杂质离子浓度对石灰浆消耗量的影响,石灰浆的消耗量随着浸出液中杂质离子浓度的升高而相应增加,导致除铁铝工序添加的石灰浆量显著上升,所以从考虑生产的成本的角度出发,生产中需要尽可能在源头矿浆中控

制杂质元素的含量以及在硫酸浸出的过程去抑制杂质离子的浸出率,除此之外,生产过程中更要实时监

测溶液中杂质离子的变化及时调整 pH 值的控制和石灰浆的加入量。

表 3 E144 二段除铁铝石灰浆加入量生产统计数据

Table 3 Production statistical data on lime slurry addition for iron and aluminum removal in stage 2 of E144

序号	二段除铁铝后 溶液铁离子浓度	二段除铁铝后 溶液铝离子浓度	E144 二段反应 后液 pH 值	E144 一段反应 后液理论 pH 值	E144 二段反应 后液理论 pH 值	石灰浆实际 加入量	石灰浆理论 加入量
1	0.033	0.018	4.96	3.73	4.76	18.5	16.3
2	0.019	0.023	5.13	3.64	4.76	23.4	21.2
3	0.014	0.027	5.06	3.82	4.76	12.3	10.5
4	0.029	0.031	4.99	3.76	4.76	15.6	14.3
5	0.016	0.022	5.11	3.69	4.76	19.5	17.1
6	0.026	0.004	5.28	3.71	4.76	17.3	15.4

注:初始溶液中的铁铝离子见表 2 一段除铁铝后液铁铝离子浓度,终点铁铝离子浓度以  $C_{\text{杂质}} = 1 \times 10^{-5}$  来计算,二段反应后液理论 pH 以终点离子浓度为  $C_{\text{杂质}} = 1 \times 10^{-5}$  推导得到。

### 3.4 石灰浆密度和有效浓度对石灰浆加入量的影响

由石灰浆的加入量推导公式可以看出:石灰浆密度与石灰浆的加入量成反比例关系,在石灰浆的加入质量一定的情况下,石灰浆的密度越小,单位时间的石灰浆加入体积越大,反之,石灰浆的密度越大,单位时间的石灰浆加入体积越小。同理在石灰浆的加入质量一定的情况下,石灰浆的有效浓度越小,单位时间的石灰浆加入体积越大,反之,石灰浆的有效浓度越大,单位时间的石灰浆加入体积越小。所以生产过程中,石灰浆品质稳定是除铁铝工序运行平稳的前提。

### 3.5 浸出液流量对石灰浆加入量的影响

由公式(8)(9)可以看出,铁铝离子与碳酸钙的消耗计量系数是 2:3,影响铁铝离子物质的量的因素主要是溶液铁铝离子浓度以及溶液流量,在溶液中铁铝离子波动较小时,铁铝离子物质的量的最主要影响因素为溶液流量,溶液流量越大,溶液中铁铝离子物质的量越大,对应需要消耗的石灰浆物质的量越大。生产正常运行时浸出液的流量波动较小,但遇减负荷或者生产流量异常期间,流量波动较大时,可以较快且精确的计算出理论所需石灰浆体积,保证除铁铝工序的高效除杂效率同时能够保障生产的稳定运行。

### 3.6 溶液初始 pH 值对石灰浆加入量的影响

由 2.1.1 章节 pH 值推导过程:加入石灰浆调

节 pH 值使其达到铁铝离子形成沉淀的最小 pH 值 (pH3 和 pH4 中较小值)和公式(10)可知,在加入石灰浆调节 pH 值的过程中,石灰浆中和浸出液中的残酸反应至铁铝离子最小沉淀 pH 值时,铁铝离子开始沉淀,在此过程中仅是石灰浆和残酸的中和反应,溶液初始 pH 值越大,则越靠近杂质离子初始形成沉淀的 pH 值,石灰浆所需加入量越小,反之,溶液初始 pH 值越小,则越远离杂质离子初始形成沉淀的 pH 值,石灰浆所需加入量越大。

## 4 结语

1)生产过程中铁铝离子的浸出率是随着原始矿浆成分以及高压釜操作工艺条件而波动的,因此浸出液的成分不是一成不变的,通过理论推导的 pH 值计算控制能够更好的指导生产实际操作,保证生产的稳定性以及高效性。

2)精细化的 pH 控制既可以保障生产稳定进行,也可以保障产品的高质量生产。

3)精细化的石灰浆加入量不仅可辅助精细化 pH 值控制,也可保证适量且不过量的石灰浆加入量,从而实现保证生产效率的同时降低生产成本。

4)通过理论计算推导过程,以及与生产实际情况对比,明晰了除铁铝工序生产过程的反应原理,为稳定高质量的生产提供理论指导。

[参考文献]

[1] 刘苏宁,丁剑,李诺,等.红土镍矿湿法冶炼石灰乳沉淀

- 镍钴工艺[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(4): 49-52.
- [2] 蒋继波, 王吉坤. 红土镍矿湿法冶金工艺研究进展[J]. 湿法冶金, 2009, 28(1): 3-11.
- [3] 马保中, 杨玮娇, 王成彦, 等. 红土镍矿湿法浸出工艺的进展[J]. 有色金属(冶炼部分), 2013(7): 1-8.
- [4] 李艳军, 于海臣, 王德全, 等. 红土镍矿资源现状及加工工艺综述[J]. 金属矿山, 2010(11): 5-9, 15.
- [5] 殷书岩, 陆业大. CCD逆流洗涤设备选型及计算方法[J]. 中国有色冶金, 2012, 41(5): 37-40.
- [6] 胡为民, 卢松, 何海斌, 等. 实现多台浓密机共用稀释水的逆流洗涤系统: CN202021816178.0[P].
- [7] 蒋念龙, 姜妹月. 沉淀溶解平衡的应用[J]. 数理化学学习, 2011(7): 7-8.
- [8] 王延广. “难溶电解质的溶解平衡”教学实录与反思[J]. 化学教与学, 2018(5): 44-47.
- [9] 蔡惠君. 沉淀溶解平衡中疑难问题的辨析[J]. 化学教学, 2012(2): 78-80.
- [10] 孙宁磊, 刘国, 彭建华, 等. 处理除铁铝后液的方法: CN201610974420.9[P].
- [11] 陈欢, 张银亮, 谭群英, 等. 废旧电池回收过程中硫酸镍钴锰溶液除铁铝工艺研究[J]. 湿法冶金, 2018, 37(6): 482-486.

## Analysis of pH control principle in neutralization and removal of iron and aluminum

ZHANG Zhong, Yiliyasi Aihemaitijiang, ZHAO Chenchen, CAO Gang, MENG Xixiang  
(Ramu Nico Management (MCC) Co., Ltd., Beijing 100000, China)

**Abstract:** In response to the challenges of low nickel and cobalt grades and the difficulty of effectively separating impurity metals in laterite nickel ores, industrial production commonly employs a high-temperature and high-pressure sulfuric acid hydrometallurgical leaching process. This process enables the reaction of metal oxides in the ore with sulfuric acid to form soluble sulfates, facilitating the conversion of nickel, cobalt, and impurity metal ions. To enhance product purity, precise control of precipitation pH is required to achieve effective separation between impurity ions and valuable metal ions. Based on the solubility equilibrium constants of different metal precipitates, this paper derives a pH control formula suitable for actual operating conditions and establishes a theoretical model applicable to industrial production. The research results provide a theoretical basis for efficient impurity removal and product quality improvement, supporting the efficient development and stable operation of laterite nickel ore resources.

**Keywords:** laterite nickel ore; precipitation; dissolution equilibrium; solubility product constant; pH values

