

# 拜耳法赤泥中钪、钇浸出行为及动力学研究<sup>①</sup>

黄魁<sup>1,2</sup>, 丁艳<sup>1</sup>, 唐启桁<sup>1</sup>, 李汝桂<sup>1</sup>, 单馨可<sup>1</sup>, 卢远桓<sup>1</sup>, 卢思妍<sup>1</sup>

(1.广西大学资源环境与材料学院, 广西南宁 530004; 2.广西高校环境保护重点实验室, 广西南宁 530004)

**摘要:** 采用两步酸浸法浸出赤泥中的钪和钇, 用磷酸对赤泥进行一段酸浸, 实现脱碱和脱硅并富集稀土金属钪、钇; 用硫酸对磷酸浸出渣进行二段酸浸, 考察了硫酸浓度、液固比、反应温度、反应时间对钪、钇浸出过程的影响, 并进行了浸出动力学分析。结果表明, 赤泥经磷酸浸出后, 脱碱和脱硅效果较好, K、Na、Si 浸出率分别为 75.62%、87.82%、80.25%; 在硫酸浓度 2.5 mol/L、液固比 7:1、反应温度 70 °C、反应时间 45 min 条件下进行二段硫酸浸出, Sc、Y 平均浸出率分别为 74.49%、80.02%。Sc 和 Y 的硫酸浸出过程均符合多相液固区域反应模型, 受扩散控制, 表观反应活化能分别为 18.50 kJ/mol 和 16.74 kJ/mol。

**关键词:** 拜耳法赤泥; 酸浸; 钪; 钇; 动力学; 磷酸浸出; 硫酸浸出

中图分类号: TF111

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.03.024

文章编号: 0253-6099(2024)03-0111-05

## Leaching Behavior and Kinetics of Scandium and Yttrium from Bayer Red Mud

HUANG Kui<sup>1,2</sup>, DING Yan<sup>1</sup>, TANG Qiheng<sup>1</sup>, LI Rugui<sup>1</sup>, SHAN Xinke<sup>1</sup>, LU Yuanhuan<sup>1</sup>, LU Siyan<sup>1</sup>

(1. School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China; 2. Key Laboratory of Environmental Protection (Guangxi University), Education Department of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530004, Guangxi, China)

**Abstract:** A two-step acid leaching process was used to leach scandium and yttrium from red mud. Phosphoric acid was used in the first stage of leaching to achieve dealkalization, desilication and enrichment of rare earth elements (scandium and yttrium). Then, the leaching residue was leached with sulfuric acid in the second stage. The effects of sulfuric acid concentration, liquid-solid ratio, reaction temperature and reaction time on the leaching process of scandium and yttrium were investigated, and the leaching kinetics was also analyzed. It is found that leaching of red mud with phosphoric acid can bring better dealkalization and desilication effect, showing the leaching rates of K, Na and Si at 75.62%, 87.82% and 80.25%, respectively. Then, in the second stage of leaching process with sulfuric acid concentration of 2.5 mol/L and liquid-solid ratio of 7:1, reaction runs at 70 °C for 45 min, leading to the average leaching rates of Sc and Y up to 74.49% and 80.02%, respectively. It is shown that the leaching processes of Sc and Y with sulfuric acid follow the liquid-solid reaction model, which is controlled by diffusion, and the apparent reaction activation energies are calculated to be 18.50 kJ/mol and 16.74 kJ/mol, respectively.

**Key words:** Bayer red mud; acid leaching; scandium; yttrium; kinetics; phosphoric acid leaching; sulfuric acid leaching

赤泥是氧化铝生产过程中产生的废渣, 其产量大、碱性强、环境危害大<sup>[1]</sup>。赤泥中富含稀土元素, 如钪和钇。稀土元素被列为我国战略性关键金属<sup>[2]</sup>, 从赤泥中提取稀土元素具有重要意义。

赤泥中 Fe、Al、Si 等含量远高于稀土元素 Sc 和 Y,

加之赤泥碱性强, 直接酸浸提取稀土元素不仅会消耗大量试剂, 并且会导致 Fe、Al 等大量杂质离子共溶, 造成后续进一步分离 Sc、Y 困难<sup>[3]</sup>。此外, 赤泥在酸浸过程中容易形成胶状硅酸, 影响混合液的固液分离, 降低 Sc、Y 浸出率; 同时, 浸出液中硅酸的存在对 Sc、Y

① 收稿日期: 2023-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(21767003); 国家级大学生创新创业训练计划支持项目(202210593083)

作者简介: 黄魁(1981—), 男, 广西柳州人, 博士, 副教授, 主要从事固体废弃物无害化处理与资源化利用研究。E-mail: khuang@gxu.edu.cn

通信作者: 丁艳(2002—), 女, 四川凉山州人, 主要研究方向为赤泥资源化。E-mail: 2731668158@qq.com

的萃取过程也有很大影响,容易产生乳化现象<sup>[4]</sup>。本文针对赤泥碱性强、赤泥酸浸提取 Sc 和 Y 过程中产生硅酸等问题,以磷酸-硫酸两步酸浸法浸出赤泥中的 Sc 和 Y,并分析其浸出过程动力学,为从赤泥中酸浸回收 Sc 和 Y 提供新思路。

## 1 实验部分

### 1.1 实验原料与设备

实验原料为广西平果某铝厂拜耳法赤泥,经烘干、研磨、0.125 mm 筛网过筛后得到实验原料,其主要成分见表 1, XRD 图谱见图 1。从图 1 可知,赤泥原料主要物相为赤铁矿、硬水铝石和加藤石等。

表 1 赤泥原料主要化学成分(质量分数) %

Al	Fe	Ca	K	Na	Si	Ti	Sc <sup>1)</sup>	Y <sup>1)</sup>	La <sup>1)</sup>
8.37	20.16	8.57	0.22	1.33	15.20	3.33	7.8	20.6	5.1

1) 单位为 g/t。

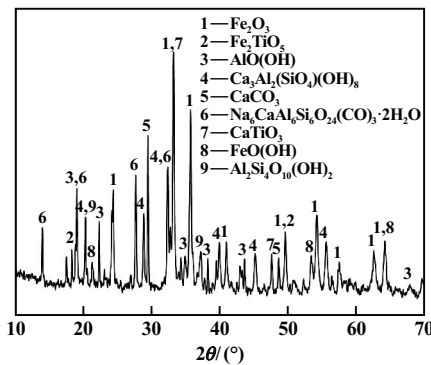
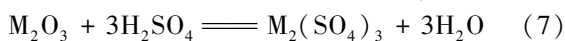
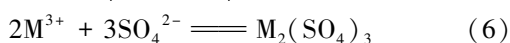
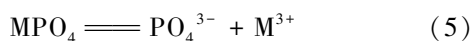
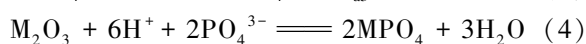
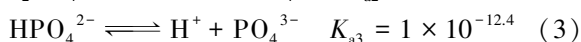
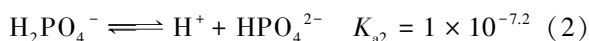
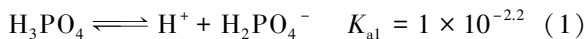


图 1 赤泥原料 XRD 图谱

主要设备包括 X 射线衍射仪(XRD)、电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)、水浴恒温振荡器等。

### 1.2 实验原理

采用磷酸和硫酸先后浸出赤泥,将赤泥中的稀土元素钪、钇富集和浸出。主要反应如下:



式中  $\text{M} = \text{Sc}, \text{Y}, \text{Al}, \text{Fe}_0$ 。

### 1.3 实验方法

采取两步酸浸的方法浸出稀土元素。一段酸浸将

赤泥原料置于锥形瓶中,按实验设定的参数加入磷酸,混匀后放置于已设定好水浴振荡时间、温度、转速的恒温水浴振荡器中,达到设定时间后,立即取出进行固液分离和定容,采用 ICP-OES 测定滤液中钪、钇、铁和铝的含量,计算钪、钇、铁和铝的浸出率;滤渣经烘箱烘干后采用 XRD 测定其物相组成。二段酸浸取一段酸浸滤渣,按设计参数取定量硫酸进行酸浸,其方法与一段酸浸相同。

$$X_M = \left( 1 - \frac{m \times w'_M}{m_0 \times w_M} \right) \times 100\% \quad (8)$$

式中  $X_M$  为金属 M(代表 Sc、Y、Fe、Al) 浸出率,%;  $m_0$  为赤泥质量,g;  $m$  为浸出渣质量,g;  $w'_M$  为浸出渣中 M 的含量,%;  $w_M$  为赤泥中 M 的含量,%。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 赤泥一段磷酸酸浸实验

先采用磷酸浸出赤泥原料,前期探究了磷酸浓度、液固比、反应温度与反应时间对赤泥原料脱碱和脱硅效果,得到磷酸浸出赤泥的适宜条件为:磷酸浓度 1 mol/L、液固比 10:1、反应温度 30 °C、反应时间 20 min,在该条件下,各金属离子浸出情况及浸出渣分析结果分别如表 2 和表 3 所示。赤泥磷酸浸出过程中,二氧化硅容易在酸性溶液中形成硅胶,增大赤泥黏度,影响后续 Sc 和 Y 的分离<sup>[5]</sup>。由表 2 可知,K、Na、Si 元素大量浸出,浸出率分别为 75.62%、87.82%、80.25%,赤泥脱硅和脱碱效果较好;Sc、Y 浸出率较低。由表 3 可知,经过磷酸酸浸后,浸出渣中 Sc 含量相比原赤泥提高了 50.00%,Y 含量提高了 54.37%。

表 2 磷酸浸出过程各元素浸出率 %

Al	Fe	Ca	K	Na	Si	Ti	Sc	Y	La
45.18	0.75	57.76	75.62	87.82	80.25	1.07	10.34	20.62	6.29

表 3 磷酸浸出后浸出渣主要化学成分(质量分数) %

Al	Fe	Ca	K	Na	Si	Ti	Sc <sup>1)</sup>	Y <sup>1)</sup>	La <sup>1)</sup>
7.03	31.51	5.54	0.12	0.34	3.98	5.25	11.7	31.8	9.3

1) 单位为 g/t。

对磷酸浸出渣进行了 XRD 分析,结果见图 2。赤泥原料中 Si 主要存在于加藤石、钙霞石、叶蜡石中,Na 主要存在于钙霞石中。由图 2 可知,与赤泥原料相比,赤泥磷酸浸出渣中加藤石含量减少,钙霞石、叶蜡石全部溶解,可知赤泥中的 Si 和 Na 已被大量去除。另外,赤铁矿、钙钛矿等矿物未溶解。文献[6]研究发现磷

酸可将硅酸盐转化为  $H_4SiO_4$ , 与  $Na_2O$  形成可溶性磷酸盐, 并且保持溶液的 pH 值高于  $Sc_2O_3$  的溶解 pH 值, 使 Sc 在浸出渣中富集。磷酸可以达到选择性去除 Si 等杂质元素并富集 Sc、Y 等稀土元素的目的, 有利于后续对赤泥中 Sc、Y 的进一步浸出。

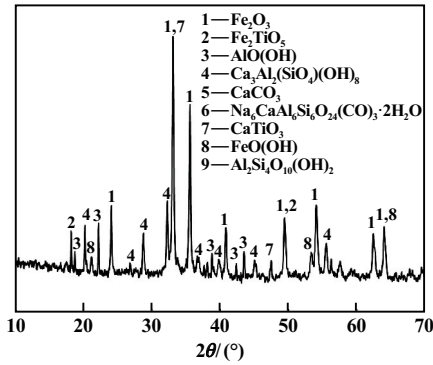


图2 赤泥磷酸浸出渣 XRD 图谱

## 2.2 赤泥二段硫酸酸浸实验

### 2.2.1 硫酸浓度的影响

以一段磷酸浸出渣为原料, 反应温度  $80\text{ }^\circ\text{C}$ 、反应时间  $60\text{ min}$ 、液固比  $7:1\text{ (mL/g)}$  条件下, 硫酸浓度对各金属离子浸出率的影响如图3所示。由图3可知, Y 较容易从赤泥中浸出, 在较低的硫酸浓度下, Y 浸出率就可以稳定在  $75\%$  以上。Sc、Fe 和 Al 的浸出率均随着硫酸浓度增大而增加, 其中 Sc 浸出率增加较为明显。

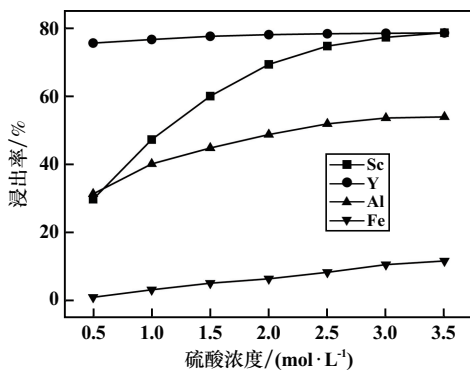


图3 硫酸浓度对各金属离子浸出率的影响

硫酸浓度较低时, 溶液中  $H^+$  浓度较低, 和赤泥中的稀土氧化物反应不完全, 随着硫酸浓度增加, 溶液中  $H^+$  浓度增加, 和赤泥中的稀土氧化物反应更充分, 钪和钇浸出率随之提高<sup>[7]</sup>。另外, 铁浸出率虽然逐渐增加, 但始终在  $10\%$  以下。综合考虑, 适宜的硫酸浓度为  $2.5\text{ mol/L}$ 。

### 2.2.2 液固比的影响

硫酸浓度  $2.5\text{ mol/L}$ , 其他条件不变, 液固比对各

金属离子浸出率的影响如图4所示。由图4可知, 随着液固比升高, Sc、Y、Al 和 Fe 浸出率变化不大, 其中 Fe 浸出率始终保持在  $10\%$  以下。提高液固比有利于赤泥和溶液充分接触, 且使溶液黏度降低, 提高 Sc 和 Y 的浸出效率<sup>[8]</sup>。考虑到酸耗以及赤泥与酸的充分混合, 选择液固比  $7:1$ 。

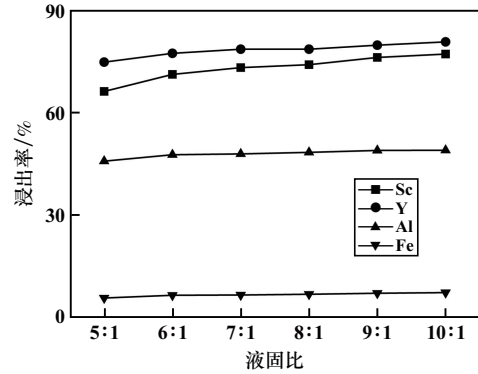


图4 液固比对各金属离子浸出率的影响

### 2.2.3 反应温度的影响

液固比  $7:1$ , 其他条件不变, 反应温度对各金属离子浸出率的影响如图5所示。由图5可知, Sc、Y、Al 浸出率均随温度升高而增加, 钪和钇的浸出反应分别在  $60\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $70\text{ }^\circ\text{C}$  时逐渐达到平衡, 此时钪和钇浸出率分别为  $73.65\%$  和  $78.87\%$ ; 铝浸出率在  $40\sim 90\text{ }^\circ\text{C}$  不断增加, 区间内浸出率增长了  $20\%$  左右。温度升高, 溶液中离子移动速度加快, 在相同条件下  $H^+$  可以更快到达反应物表面并与其中的矿物发生反应, 各金属浸出率提高<sup>[9]</sup>。铁浸出率始终维持在较低水平。综合考虑, 选择反应温度  $70\text{ }^\circ\text{C}$ 。

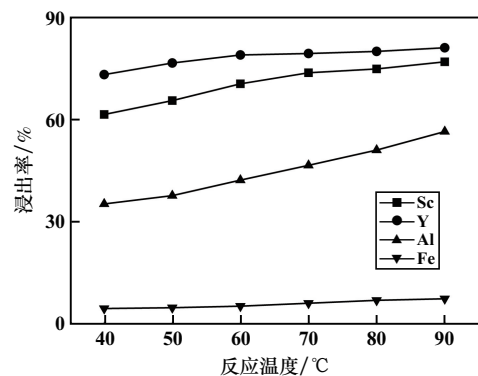


图5 反应温度对各金属离子浸出率的影响

### 2.2.4 反应时间的影响

反应温度  $70\text{ }^\circ\text{C}$ , 其他条件不变, 反应时间对各金属离子浸出率的影响如图6所示。由图6可知, 各金属离子浸出率随反应时间增加而增加, 反应时间  $45\text{ min}$  时, Sc 和 Y 浸出率分别为  $74.49\%$  和  $80.02\%$ , 此后, Sc 和

Y 浸出率增长幅度变小。反应时间 60 min 后, Fe 和 Al 浸出率增长幅度变小。因此, 适当延长浸出时间, 可以使赤泥与硫酸的接触和反应更充分, 使金属离子浸出率更高。考虑到硫酸对杂质离子的选择性浸出效果, 选择反应时间 45 min。

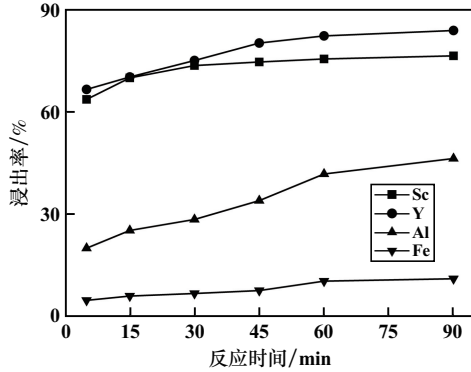


图6 反应时间对各金属离子浸出率的影响

### 2.2.5 二段酸浸结果分析

综合以上研究, 确定适宜的硫酸浸出条件为: 硫酸浓度 2.5 mol/L、液固比 7:1、浸出温度 70 °C、浸出时间 45 min, 在该条件下进行 5 组重复实验, Sc、Y、Fe、Al 平均浸出率分别为 74.49%、80.02%、7.70%、33.99%。对硫酸浸出渣进行了 XRD 物相分析, 结果见图 7。对比图 2 与图 7 可知, 硫酸浸出渣中主要有赤铁矿、假板钛矿、硬水铝石、钙钛矿等。赤泥中的稀土元素部分赋存于赤铁矿、针铁矿、钙钛矿等矿物质中<sup>[2]</sup>, 图 7 中赤铁矿和钙钛矿衍射峰依然存在, 且峰强度增加, 说明这两种矿物在该实验条件下只发生少量分解, 赋存于该矿物中的稀土元素并未浸出。因此要进一步提升钪、钇浸出率, 就无法避免钪、钇和铁大量共浸出的情况, 对钪的分离提纯变得困难。同时硫酸与  $\text{Ca}^{2+}$  生成了  $\text{CaSO}_4$  与  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。  $\text{CaSO}_4$  结构非常致密, 赤泥颗粒被  $\text{CaSO}_4$  覆盖后, Sc 和 Y 的浸出会变得更加困难, 甚至  $\text{CaSO}_4$  形成过程也会与稀土离子形成共沉淀, 不利于稀土浸出<sup>[10]</sup>。

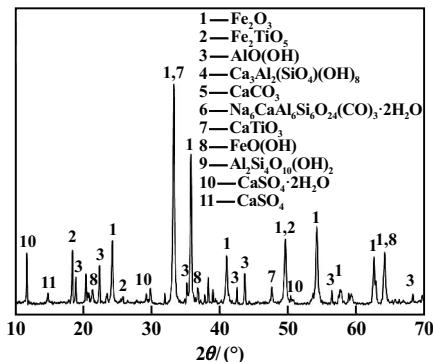


图7 硫酸浸出渣 XRD 图谱

## 2.3 浸出动力学分析

### 2.3.1 动力学反应模型

赤泥中钪、钇的硫酸浸出属于多相液固反应, 主要包括扩散、吸附和化学反应三个过程, 一般分为以下阶段: ① 在赤泥硫酸混合液中, 硫酸向赤泥矿粒表面扩散, 与钪、钇等快速反应生成硫酸钪和硫酸钇, 与钙接触反应生成难溶的硫酸钙; ② 产生的硫酸钙在赤泥矿粒表面积聚, 对钪、钇离子有黏附作用, 对硫酸向矿粒内部扩散形成阻碍, 使硫酸与钪、钇反应速率下降; ③ 硫酸钙在矿粒表面积聚形成致密层, 致使硫酸与钪、钇不能接触反应而达到平衡状态<sup>[11]</sup>。

对于初期反应速率极快、随着反应时间延长反应速率逐渐减小的酸浸反应, 通常采用多相液固区域反应模型进行动力学分析拟合<sup>[11]</sup>。该模型可用 Avrami 方程解释:

$$x = 1 - \exp(-kt^n) \quad (9)$$

对式(9)进行两边取对数, 得:

$$\ln(-\ln(1-x)) = \ln k + n \ln t \quad (10)$$

式中  $x$  为金属浸出率, %;  $k$  为反应速率常数,  $\text{min}^{-1}$ ;  $t$  为反应时间, min;  $n$  为矿物晶粒性质和几何特性函数。

利用 Arrhenius 公式对反应速率常数  $k$  进行计算, 可求出反应表观活化能  $E_a$ :

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (11)$$

式中  $k$  为 Arrhenius 表观反应常数,  $\text{min}^{-1}$ ;  $E_a$  为表观活化能, kJ/mol;  $T$  为热力学温度, K;  $R$  为摩尔气体常数, 8.314 J/(mol · K);  $A$  为频率因子,  $\text{min}^{-1}$ 。

### 2.3.2 钪、钇浸出反应动力学

不同温度条件下赤泥中钪和钇在 0~60 min 内的浸出实验结果如图 8 和图 9 所示。从图 8 和图 9 可以看出, 钪、钇浸出率随温度和时间增加而增大, 前期浸出速率较大, 随时间延长, 形成硫酸钙与稀土元素离子共沉淀, 反应速率逐渐减小, 该特征与多相液固区域反应模型相符<sup>[12]</sup>。

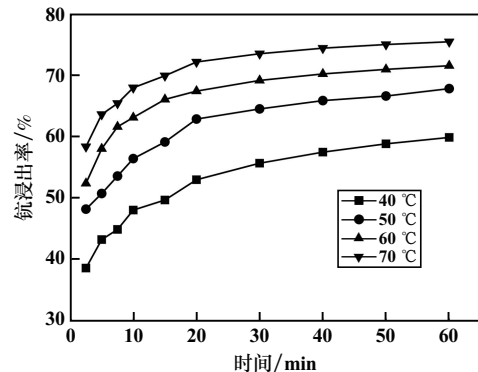


图8 不同温度下钪浸出率随时间的变化曲线

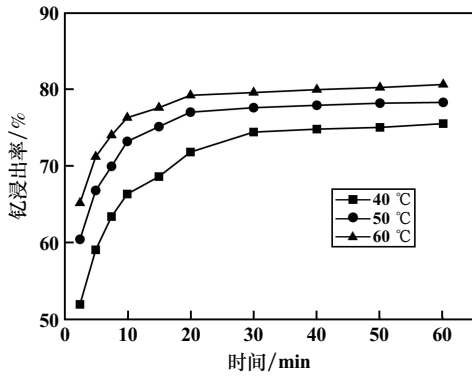


图9 不同温度下钒浸出率随时间变化曲线

将图8和图9数据代入式(10),以 $\ln(-\ln(1-x))$ 对 $\ln t$ 作图,得到动力学拟合曲线如图10和图11所示,可知钒的浸出动力学拟合曲线相关系数均大于0.97,钇的浸出动力学拟合曲线相关系数均在0.96以上,两者的拟合相关性均较好,进一步判定赤泥中钒、钇的硫酸浸出过程符合液固区域反应模型<sup>[12]</sup>。

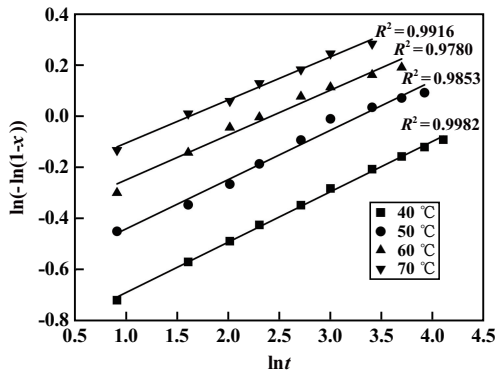


图10 钒的浸出动力学拟合曲线

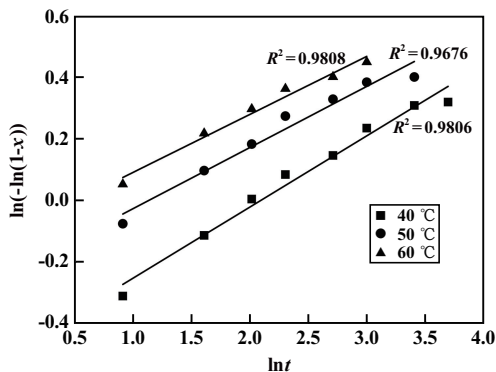


图11 钇的浸出动力学拟合曲线

表4列出了钒和钇拟合曲线的相关参数,可以看出钒、钇拟合曲线 $n$ 值均小于0.3,初步判断为扩散控制<sup>[12]</sup>。

根据图10和图11,以 $\ln k$ 对 $1/(T \times 10^{-3})$ 作图,得到钒、钇浸出的 Arrhenius 拟合曲线,见图12和图13。由图12和图13计算可知,钒、钇浸出过程的表现反应

活化能分别为 18.50 kJ/mol、16.74 kJ/mol,进一步证明浸出过程受扩散控制,浸出活化能较低,说明反应越容易进行。

表4 不同拟合曲线相关参数

温度/°C	多相固区域反应模型			
	Sc		Y	
	相关系数 $R^2$	$n$ 值	相关系数 $R^2$	$n$ 值
40	0.998 2	0.197 6	0.980 6	0.231 3
50	0.985 3	0.193 4	0.967 6	0.198 7
60	0.978 0	0.175 9	0.980 8	0.188 6
70	0.991 6	0.169 0	—	—

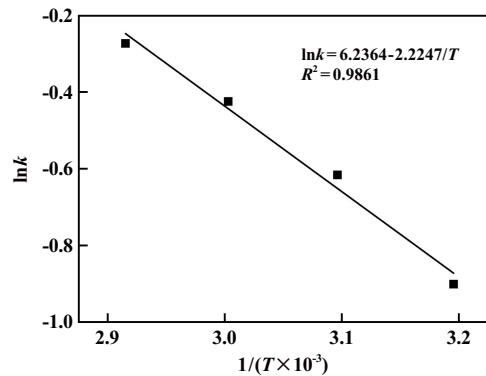


图12 钒浸出的 Arrhenius 拟合曲线

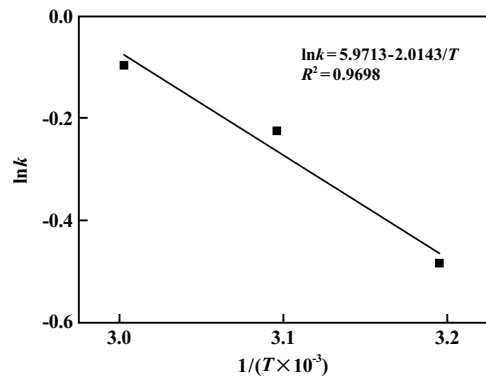


图13 钇浸出的 Arrhenius 拟合曲线

### 3 结 论

1) 赤泥一段磷酸浸出,脱碱和脱硅效果较好,K、Na和Si浸出率分别为75.62%、87.82%和80.25%;Sc、Y在酸浸渣中含量分别提高了50.00%和54.37%。

2) 二段硫酸酸浸适宜条件为:硫酸浓度2.5 mol/L,液固比7:1,反应温度70 °C,反应时间45 min,钒和钇平均浸出率分别为74.49%和80.02%。

3) Sc、Y的硫酸浸出过程均符合多相液固区域反应模型,浸出反应受扩散控制,浸出过程的活化能分别为18.50 kJ/mol和16.74 kJ/mol。

(下转第119页)



(a) 振动前; (b) 振动后

图7 振动前后铁-碳微电解材料的形貌

由图6可知,采用振动后,连续稳定运行90 d,除砷效果理想且稳定,除砷率达到99.99%,水中砷含量0.033~0.036 mg/L。由图7可以看出,振动后,铁-碳微电解材料表面的膜全部被去除,脱膜效果理想。实验结果证明,采用振动的方法可有效解决铁-碳微电解材料钝化失效的问题。

### 3 结 论

1) 铁-碳微电解材料处理铜冶炼含砷废水时,生成的 $\text{FeAsO}_4$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 等氧化物沉积在铁-碳微电解材料表面,使铁-碳微电解材料钝化失效,导致除砷效率差。采用振动的方法可有效解决铁-碳微电解材料钝化失效问题。

2) 在进水pH值2.0、空气鼓入量5 L/min、接触时间2 min、固液比2.5:1、振动频率每4 h振动2 min条件下,连续稳定处理90 d,除砷率达到99.99%,

水中砷含量0.033~0.036 mg/L,除砷效果理想且稳定。

3) 采用铁-碳微电解法可有效去除铜冶炼含砷废水中的砷,为处理铜冶炼含砷废水提供了新的思路。

### 参考文献:

- [1] 胡 亮. 复杂成分铜冶炼废水处理工艺的优化改进与实践[J]. 硫酸工业, 2021(4):32-34.
- [2] 李新征,徐晓军,张 谨,等. 曝气微电解—絮凝法处理铜冶炼废水中的砷[J]. 工业水处理, 2011,31(5):31-34.
- [3] 何智颖,袁君帆,花 超,等. 从含砷废水中除砷工艺研究进展[J]. 湿法冶金, 2023,42(4):330-334.
- [4] 王 勇,赵攀峰,郑雅杰,等. 洗选冶炼烟气产生的含砷酸性废水的利用及处理[J]. 矿冶工程, 2008(3):60-63.
- [5] 范荣桂,邵秋平,高海娟. 吸附法处理废水中砷的研究现状及进展[J]. 工业水处理, 2013,33(4):10-12.
- [6] 司艳晓,徐孝轩,胡家硕. 电化学氧化—絮凝系统协同去除水中砷的研究[J]. 中国给水排水, 2021,37(17):50-56.
- [7] 杨冬荣,陈 迁,段铭诚. 电絮凝法处理含砷污水技术研究进展[J]. 电镀与饰, 2023,45(1):62-70.
- [8] 刘恒嵩,彭玉玲,林 森,等. 砷在碱性废水中的存在形式及处理工艺[J]. 科技与企业, 2014(18):173-174.
- [9] 陈小凤,周新涛,罗中秋,等. 化学沉淀法固化/稳定化除砷研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2015,34(12):3510-3516.
- [10] 邹亚辰,贾小宁,冉 浪,等. 零价铁类芬顿法处理含低浓度重金属离子有机废水[J]. 化学反应工程与工艺, 2021,37(2):167-174.

引用本文: 李学鹏,王 娟,常 军,等. 铁-碳微电解法处理铜冶炼含砷废水的实验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(3):116-119.

(上接第115页)

### 参考文献:

- [1] 李家林,陈 雯,刘小银,等. 某赤泥预富集-闪速磁化焙烧扩大连续试验研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(6):82-85.
- [2] 李海兰,张 杰,吴 林,等. 赤泥中的稀土资源:分布、赋存和提取[J]. 矿物学报, 2021,41(增刊1):578-592.
- [3] 宁凌峰,何德文,陈 伟,等. 赤泥中硫酸选择性浸出铁、钨及动力学研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(3):81-84.
- [4] 李 望,朱晓波. 酸浸提取赤泥中钨的研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016(5):36-38.
- [5] 胡广艳. 赤泥酸浸过程中硅胶形成的研究[J]. 世界有色金属, 2020(22):231-232.
- [6] DENG B, LI G, LUO J, et al. Enrichment of  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  and  $\text{TiO}_2$  from bauxite ore residues[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017,331:71-80.
- [7] 卢远桓,黄 魁,单馨可,等. 用草酸从赤泥中浸出钨、钼试验研究[J]. 湿法冶金, 2022,41(6):513-517.
- [8] 谢武明,张 宁,李 俊,等. 盐酸浸出提取赤泥中铝和铁的工艺条件优化[J]. 环境工程学报, 2017,11(10):5677-5682.
- [9] 高昭伟,曹成超,李耀山,等. 高钙型低品位铜矿酸性浸出动力学研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):170-173.
- [10] CHEN X, GUO F, CHEN Q, et al. Leaching tungsten and rare earth elements from scheelite through  $\text{H}_2\text{SO}_4$ - $\text{H}_3\text{PO}_4$  mixed acid decomposition[J]. Minerals Engineering, 2020,156:106526.
- [11] 朱晓波,李 望,管学茂. 赤泥循环酸浸提钨实验及动力学研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2015,43(3):9-12.
- [12] 韩其勇. 冶金过程动力学[M]. 北京:冶金工业出版社, 1983.

引用本文: 黄 魁,丁 艳,唐启彬,等. 拜耳法赤泥中钨、钼浸出行为及动力学研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(3):111-115.