

杂质离子对提钒转炉污泥浸出液中镓萃取过程界面乳化的影响机制

秦治峰^{1, 2, 3, 4}, 姜 洋^{2, 3, 4*}, 杜 明¹, 杨 珍^{2, 3, 4}, 刘 娟^{2, 3, 4}

(1. 天府金江实验室, 四川 攀枝花 617000; 2. 钒钛资源高质化利用四川省重点实验室, 四川 攀枝花 617000; 3. 攀钢集团研究院有限公司, 四川 成都 610000; 4. 成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司, 四川 成都 610300)

摘 要: 针对溶剂萃取镓过程中的界面乳化问题, 系统研究了 Fe^{3+} 、 Si^{4+} 、 Al^{3+} 等杂质离子的影响机制。结合因素试验与 FT-IR、SEM/EDS 等表征, 发现 Fe^{3+} 因共萃取进入有机相引发分相, 而 Si^{4+} 水解产物 SiO_2 在界面形成稳定的三维网状结构, 是乳化的关键因素。基于 Pickering 乳液理论, 计算表明 SiO_2 微粒在油-水界面具有最高的附着能, 界面稳定能力最强。研究为防控镓萃取乳化提供了理论依据与技术支撑。

关键词: 提钒转炉污泥; 镓; 溶剂萃取; 乳化

中图分类号: X757

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)04-0182-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.04.021

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Influence mechanism of impurity ions on interfacial emulsification during gallium extraction from vanadium extraction converter sludge leaching solution

QIN Zhifeng^{1, 2, 3, 4}, JIANG Yang^{2, 3, 4*}, DU Ming¹, YANG Zhen^{2, 3, 4}, LIU Juan^{2, 3, 4}

(1. Tianfu Jinjiang Laboratory, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2. Sichuan Provincial Key Laboratory for High-Value Utilization of Vanadium and Titanium Resources, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 3. Pangang Group Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610000, Sichuan, China; 4. Chengdu Advanced Metal Materials Industrial Technology Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610300, Sichuan, China)

Abstract: This study systematically investigates the influence mechanisms of impurity ions such as Fe^{3+} , Si^{4+} and Al^{3+} on interfacial emulsification in the solvent extraction of gallium. Through factorial experiments combined with characterization techniques such as FT-IR and SEM-EDS, it was found that Fe^{3+} induces phase separation due to co-extraction into the organic phase, while Si^{4+} hydrolysis products, specifically SiO_2 , form a stable three-dimensional network structure at the interface, which is identified as a key factor for emulsification. Based on Pickering emulsion theory, calculations reveal that SiO_2 particles exhibit the highest adhesion energy at the oil-water interface, demonstrating the strongest interfacial stabilization capability. This research provides theoretical insights and technical support for preventing and controlling emulsification during gallium extraction.

Key words: vanadium extraction converter sludge; gallium; solvent extraction; emulsification

收稿日期: 2026-01-19; 修回日期: 2026-03-27; 接受日期: 2026-04-01

作者简介: 秦治峰, 1995 年出生, 男, 河南焦作人, 博士, 主要研究方向为固废资源化利用, E-mail: qzfscu@126.com;

*通信作者: 姜洋, 1989 年出生, 女, 辽宁大连人, 博士, 主要研究方向为固废资源化利用, E-mail: jiangyang731@hotmail.com。

0 引言

镓作为重要的战略性金属,在高新技术和国防工业中具有关键作用,其全球供应目前主要依赖铝土矿的伴生回收^[1-2]。然而,随着铝土矿资源禀赋下降,亟需拓展新的镓资源来源^[3-5]。研究表明,攀西地区钒钛磁铁矿中富含镓,可作为潜在的替代资源,在钒钛磁铁矿的冶炼流程中,镓的迁移行为具有一定的规律性,主要富集在转炉提钒的烟尘和钒渣中,而在提钒工序中,镓富集在提钒尾渣中,但几种物料成分复杂,属高铁、高硅型共生矿,难以沿用传统的碱法提镓工艺,而宜采用酸法提取^[6-7]。酸法工艺虽能使镓与多种金属离子共同浸出,并通过溶剂萃取进行分离,但萃取过程中易出现乳化现象,影响分相与传质效率,制约镓的高效回收^[8-9]。

在酸性含镓溶液的萃取过程中,鲜有对溶剂萃取过程中所产生的乳化成因进行研究。国内外对乳化物的研究主要集中在铜、稀土等离子的分离过程中,乳化成因包括有机萃取剂、稀释剂、人为操作因素、溶液因素等^[10-13]。目前,从钒钛磁铁矿相关冶炼产品中回收有价金属离子的溶剂萃取过程中主要集中在优化萃取工艺,提高萃取效率,或增加改性剂改善萃取过程中出现的乳化现象,而对萃取过程中乳化物的形成和稳定机理缺乏研究^[14-17]。因此,研究酸性溶液中溶剂萃取镓过程中乳化物的形成和稳定机制对攀西地区镓资源综合利用是一个关键控制步骤!

针对高铁、高硅体系下乳化机理研究的不足,笔者系统研究了攀西钒钛磁铁矿提镓过程中溶剂萃取的乳化问题。通过单因素试验,解析了 Fe^{3+} 、 Si^{4+} 、 Al^{3+} 等离子对镓萃取行为及乳化率的影响规律;结合 FT-IR、SEM/EDS 等分析手段,对萃取后有机相与乳化物进行微观表征,揭示了杂质离子的迁移路径与乳化物的理化性质。进一步引入 Pickering 乳液理论,通过计算 SiO_2 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 等微粒在油-水界面的附着能,从能量角度阐释其稳定乳化的能力差异。研究旨在从理论层面揭示复杂体系中乳化的形成与稳定机制,填补特定体系研究的空白,推动镓资源的高效绿色提取,并为类似复杂体系的溶剂萃取工艺优化提供方法论借鉴。

1 试验部分

1.1 试验原料和仪器

试验原料包括提钒转炉污泥酸浸液、盐酸、氢氧化钠、磷酸三丁酯(TBP)、260[#]溶剂油、氯化铁、氯化铝、硅酸钠及去离子水。其中,提钒转炉污泥

取自攀钢铁水转炉提钒工序;除污泥外,其余化学试剂均购自国药集团化学试剂有限公司;去离子水由实验室纯水机制备。试验过程中使用的主要仪器包括电子天平(Mettler Toledo, 105 DU, 瑞士)、纯水机(四川优普超纯科技公司, UPL-II-20L)及循环水式真空泵(巩义市予华仪器有限责任公司, SHZ-D(III)型)。

1.2 试验流程

根据提钒转炉污泥浸出液的主要成分,分别配制含 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Si^{4+} 、 Ga^{3+} 的单一离子溶液,并按一定体积比将 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Si^{4+} 溶液分别与 Ga^{3+} 溶液混合,制得 $\text{Fe}^{3+}/\text{Ga}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}/\text{Ga}^{3+}$ 、 $\text{Si}^{4+}/\text{Ga}^{3+}$ 以及 $\text{Si}^{4+}/\text{Al}^{3+}/\text{Ga}^{3+}$ 等多元混合离子溶液。采用一定浓度的 TBP-260[#]溶剂油萃取剂进行萃取试验,萃取后乳化率按公式(1)计算^[11]。

$$\text{乳化率} = \frac{V_{\text{crud}}}{V_{\text{O}} + V_{\text{A}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, V_{crud} 为乳化物体积, V_{O} 为有机相体积, V_{A} 为水相体积,单位均为 mL。

1.3 样品表征

采用 X 射线衍射仪(Empyrean, 荷兰 PANalytical B.V. 公司)对乳化物进行晶体结构分析,利用扫描电子显微镜(JSM-7001F, 日本 JEOL 公司)观察其表面形貌,并通过傅里叶变换红外光谱(Cary 630, 安捷伦科技有限公司)表征乳化物的谱峰变化。

2 结果与讨论

2.1 乳化物的表征

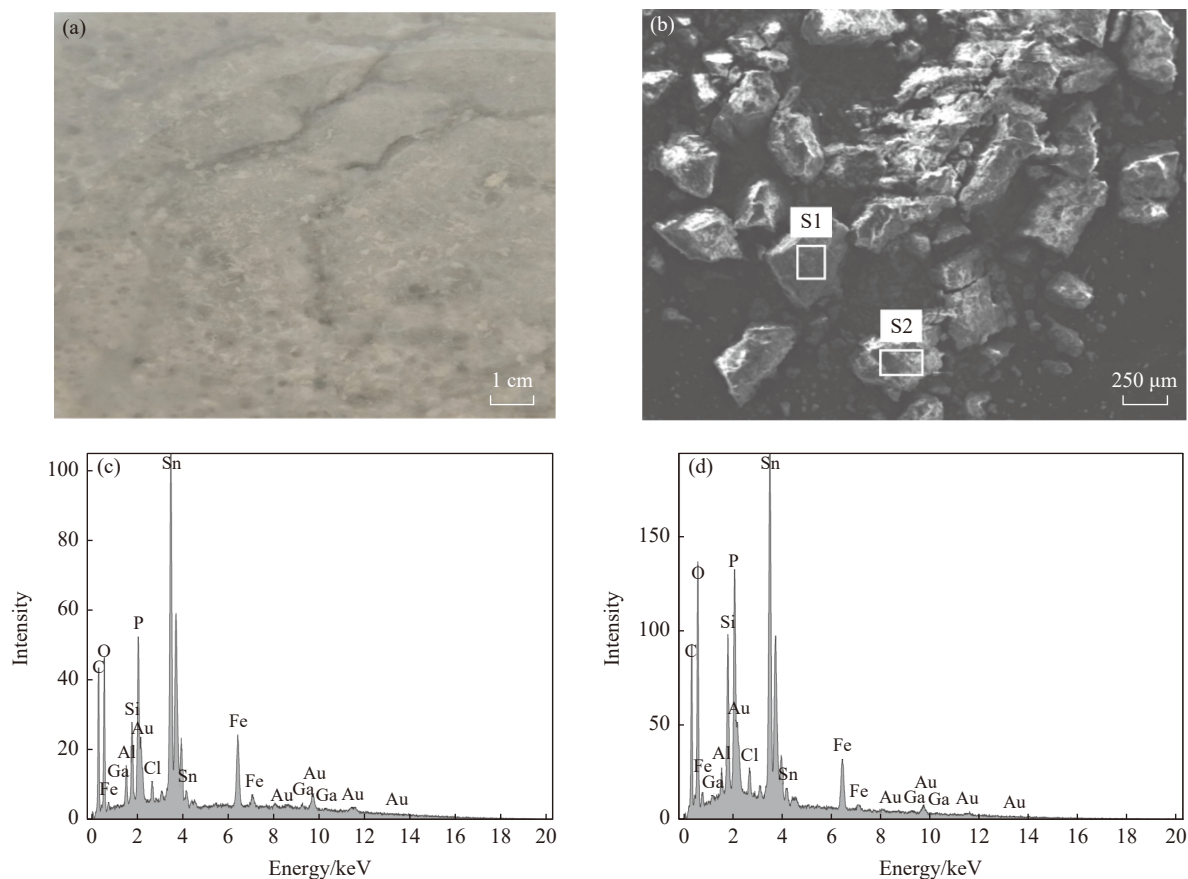
研究原料为提钒转炉污泥的酸性浸出液,溶液中的 Ga^{3+} 和 Al^{3+} 的浓度分别为51.78 mg/L 和56.35 mg/L, Fe^{3+} 、 Si^{4+} 和 Zn^{2+} 的浓度分别为63.30、0.50 g/L 和2.10 g/L。含镓溶液经过溶剂萃取后会出现图1(a)所示的有机乳化物,对有机乳化物进行打捞、乙醇清洗、烘干后进行 SEM-EDS 分析,结果分别如图1(b)~(d)和表1所示。SEM 和 EDS 打点分析可知,絮状有机物的形貌为颗粒状和块状,成分主要为 Fe、P、C、Si、Al、Sn、Au 等,其中 Fe、Sn、Al、Si 主要是从溶液中带入的,P、C、O 则是有机萃取剂的主要成分,Au 是拍电镜样品预处理引入的。图2为有机乳化物的 XRD 分析图,表明乳化物是无晶型的,结合 EDS 结果可知,乳化物的主要成分为 Fe、Si 和 Al。

2.2 杂质离子赋存状态

采用 6mol/L 盐酸溶液浸出提钒转炉污泥,根据浸出液中各金属离子的浓度,使用 Medusa 软件对溶液中 Fe^{3+} 、 Si^{4+} 、 Al^{3+} 的赋存形态进行了模拟

分析,结果如图 3 所示。 Fe^{3+} 的存在形式有 7 种,分别为 FeCl^{2+} 、 FeCl_3 、 FeCl_2^+ 、 $\text{Fe}_3(\text{OH})_4^{5+}$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ 。 Si^{4+} 的存在形式有 4 种,分别为 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 、 $\text{SiO}(\text{OH})_3^-$ 、 $\text{Si}_2\text{O}_2(\text{OH})_5^-$ 、 $\text{SiO}_2(\text{OH})_2^{2-}$ 。

Al^{3+} 的存在形式有 4 种,分别为 Al^{3+} 、 AlOH_2^+ 、 $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$ 和 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 。考虑到含镓浸出液的 pH 值,溶液中 Fe^{3+} 、 Si^{4+} 、 Al^{3+} 的赋存形态分别为 FeCl^{2+} 、 FeCl_3 、 FeCl_2^+ 、 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 和 Al^{3+} 。



(a)乳化物实物照片;(b)乳化物粉末 SEM 形貌及 EDS 分析选区;(c)图(b)中 S1 区域的 EDS 能谱图;(d)图(b)中 S2 区域的 EDS 能谱

图 1 乳化物的宏观和微观形貌以及 EDS 能谱分析

Fig. 1 Macro- and micro-morphology of the emulsion, along with EDS spectra analysis

表 1 乳化物打点成分分析

Table 1 Compositions analysis results of the emulsion by spot testing

Labels	C	O	Al	Si	P	Cl	Fe	Ga	Sn	Au
S1	20.97	21.54	1.22	2.20	4.40	0.64	7.78	1.12	36.62	3.51
S2	21.63	27.91	0.66	3.45	5.23	0.74	5.13	0.72	31.03	3.49

2.3 单一杂质离子对乳化的影响

图 4 系统研究了 Fe^{3+} 对 TBP 萃取 Ga^{3+} 过程中乳化行为的影响。图 4(a) 为在固定其他条件下,不同体积分数的 TBP 浓度体系中 Fe^{3+} 存在时的乳化率变化,当 TBP 浓度为 5% 时,溶剂萃取镓过程的乳化率为 2%,当 TBP 浓度为 25% 时,溶剂萃取镓过程的乳化率为 7%。图 4(b) 为在固定其他条件下,不同水相与油相比比例中 Fe^{3+} 存在时的乳化率变化,

当水相与油相体积比例 (A/O) 为 2 时,溶剂萃取镓过程的乳化率为 2.33%,当 A/O 为 10 时,溶剂萃取镓过程的乳化率为 0.64%。

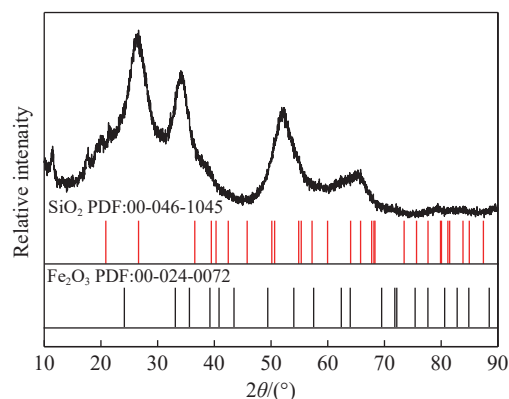


图 2 乳化物的 XRD 分析

Fig. 2 XRD pattern of the emulsion

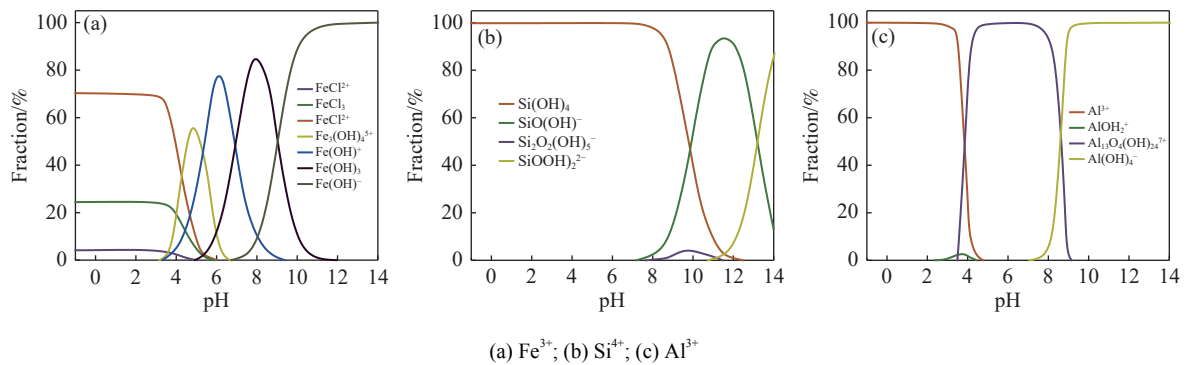


图 3 不同 pH 下金属杂质离子的赋存状态

Fig. 3 Occurrence states of metal impurity ions under different pH

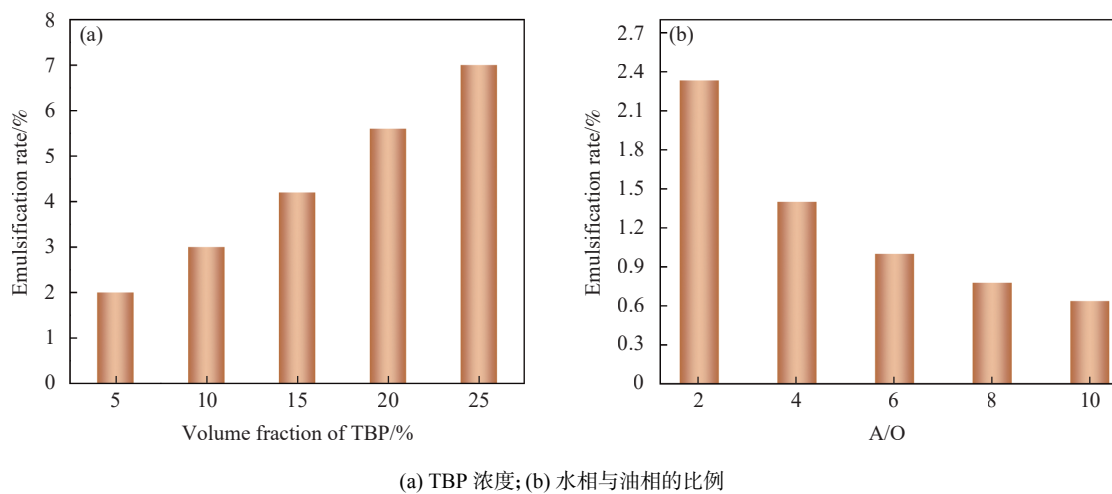
图 4 Fe^{3+} 对 TBP 萃取 Ga^{3+} 乳化率的影响Fig. 4 Effect of Fe^{3+} on the emulsion rate of Ga^{3+} extraction by TBP

图 5 反映了 Si^{4+} 对 Ga^{3+} 萃取行为及乳化现象的影响。由图 5(a) 可知, 当 TBP 体积分数为 5% 时,

溶剂萃取镓过程的乳化率为 0.8%, 当 TBP 体积分数为 25% 时, 溶剂萃取镓过程的乳化率为 4.2%。

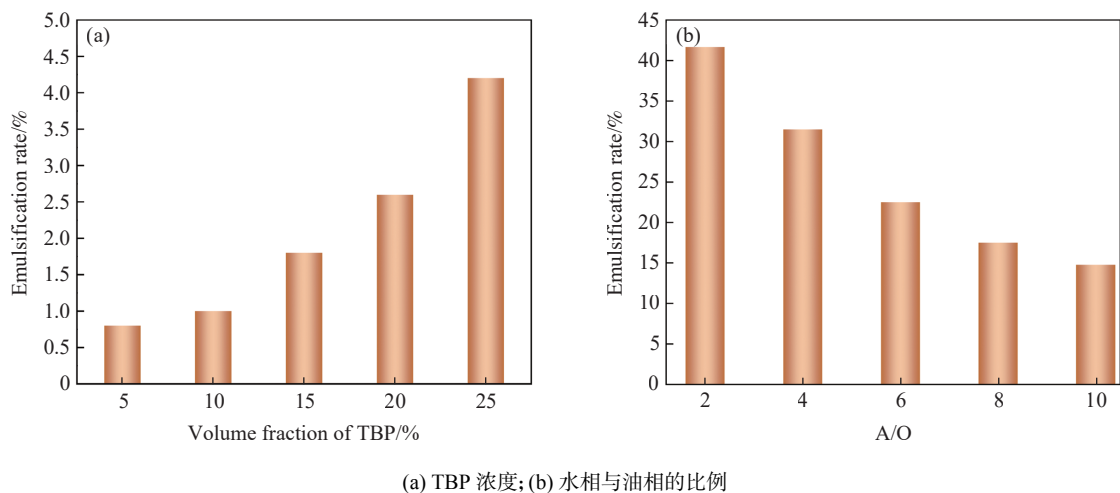
图 5 Si^{4+} 对 TBP 萃取 Ga^{3+} 乳化率的影响Fig. 5 Effect of Si^{4+} on the emulsion rate of Ga^{3+} extraction by TBP

图 5(b) 为在固定其他条件下, 不同水相与油相比例中 Si^{4+} 存在时的乳化率变化, 当 A/O 为 2 时, 溶剂萃取镓过程的乳化率为 41.67%, 当 A/O 为 10 时, 溶剂萃取

镓过程的乳化率为 14.77%, 表明硅离子存在条件下, 会极大增加乳化的概率, 原因可能是在萃取过程中形成的以二氧化硅胶体分散体系为连续相的 O/W

型界面乳化液,其胶体聚合物通过支链相互连接构建三维网状结构,同时附着于液滴表面或填充于液滴间隙的固体微粒可通过氢键与胶体支链结合,从而在液滴间形成增强斥力、抑制聚并的稳定屏障^[10]。

图6反映了 Al^{3+} 对 Ga^{3+} 萃取行为及乳化现象的影响。由图6(a)可知,当TBP体积分数为5%时,

溶剂萃取镓过程的乳化率为0.8%,当TBP体积分数为25%时,溶剂萃取镓过程的乳化率为4.2%。图6(b)为在固定其他条件下,不同水相与油相比例中 Al^{3+} 存在时的乳化率变化,当A/O为2时,溶剂萃取镓过程的乳化率为0.67%,当A/O为10时,溶剂萃取镓过程的乳化率为0.55%。

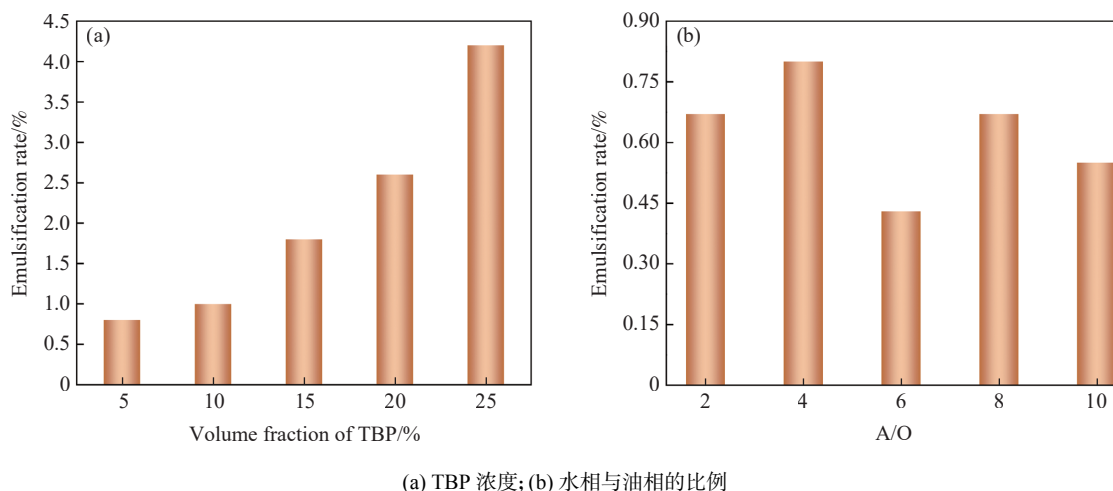


图6 Al^{3+} 对TBP萃取 Ga^{3+} 乳化率的影响

Fig. 6 Effect of Al^{3+} on the emulsion rate of Ga^{3+} extraction by TBP

2.4 协同离子对乳化的影响

为研究 Al^{3+} 与 Si^{4+} 共存对萃取乳化的影响,试验在含 Ga^{3+} 的盐酸溶液中同时加入两种离子,并考察TBP体积分数变化的影响(见图7)。结果表明,乳化率随TBP浓度变化无显著规律,在TBP体积分数为5%和25%时分别为8%和9%。与单一离子体系相比, Al^{3+} 与 Si^{4+} 共存时的乳化率介于二者之间,表明两者对乳化存在协同促进效应。

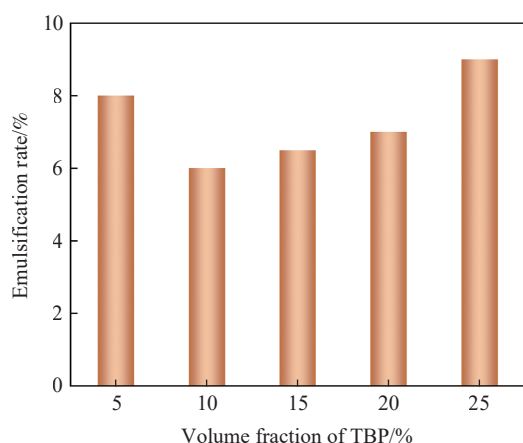


图7 Al^{3+} 和 Si^{4+} 同时存在对TBP萃取 Ga^{3+} 乳化率的影响

Fig. 7 Effect of coexistence of Al^{3+} and Si^{4+} on emulsion rate in TBP extraction of Ga^{3+}

2.5 有机相表征

为系统考察溶剂萃取镓过程中的乳化现象,对

萃取前后的有机相进行FT-IR表征,结果如图8所示。图8(a)展示了TBP及其Fe络合物的红外光谱特征。TBP在约 $1\,280\text{ cm}^{-1}$ 处具有 $\text{P}=\text{O}$ 伸缩振动峰,而与 Fe^{3+} 络合后(涵盖轻相与重相),该峰均发生明显红移。该现象为磷酸基($\text{P}=\text{O}$)直接参与 Fe^{3+} 配位,说明 $\text{P}=\text{O}$ 键的电子云密度及力常数因配位作用而降低。此外,位于约 $1\,030\text{ cm}^{-1}$ 的 $\text{P}-\text{O}-\text{C}$ 伸缩振动峰亦出现频移与形变,表明配位过程不仅作用于 $\text{P}=\text{O}$ 位点,还引起了TBP分子整体构象的改变。综上所述,TBP通过与 Fe^{3+} 间的 $\text{P}=\text{O}$ 化学配位络合,且轻相/重相的形成与该配位程度及络合物结构差异密切相关。从图8(b)中TBP-Si谱图可知,在 $3\,400\sim 3\,600\text{ cm}^{-1}$ 区间新出现了一个宽大的吸收峰,其归属于 $\text{O}-\text{H}$ 伸缩振动或 $\text{Si}-\text{OH}$ 特征振动。同时, $1\,300\sim 1\,000\text{ cm}^{-1}$ 区域内的谱峰亦发生了显著改变,表明 $\text{P}=\text{O}$ 基团同样介入了相互作用。这些光谱特征有别于物理混合,新生成羟基及 $\text{P}=\text{O}$ 峰的变化表明体系内可能发生水解反应,或形成了由 $\text{Si}-\text{O}-\text{H}$ 与TBP共同构成的氢键网络或配位结构。如图8(c)所示,与TBP相比,TBP-Al的 $\text{P}=\text{O}$ 伸缩振动峰(约 $1\,280\text{ cm}^{-1}$)波数降低,同时出现宽化和裂分,此为 Al^{3+} 与 $\text{P}=\text{O}$ 氧原子形成配位键的经典特征。相应地, $1\,000\sim 1\,100\text{ cm}^{-1}$ 区间峰形的复杂化及新裂分现象也印证了分子对称性因配位而降低。这说明TBP

亦可借助 P=O 与铝离子实现络合。但对比图 8(a), 两者在峰的位移幅度与裂分方式上存在差异, 据此

可推测 TBP 与 Fe^{3+} 和 Al^{3+} 所形成的络合物在空间几何构型上有所不同。

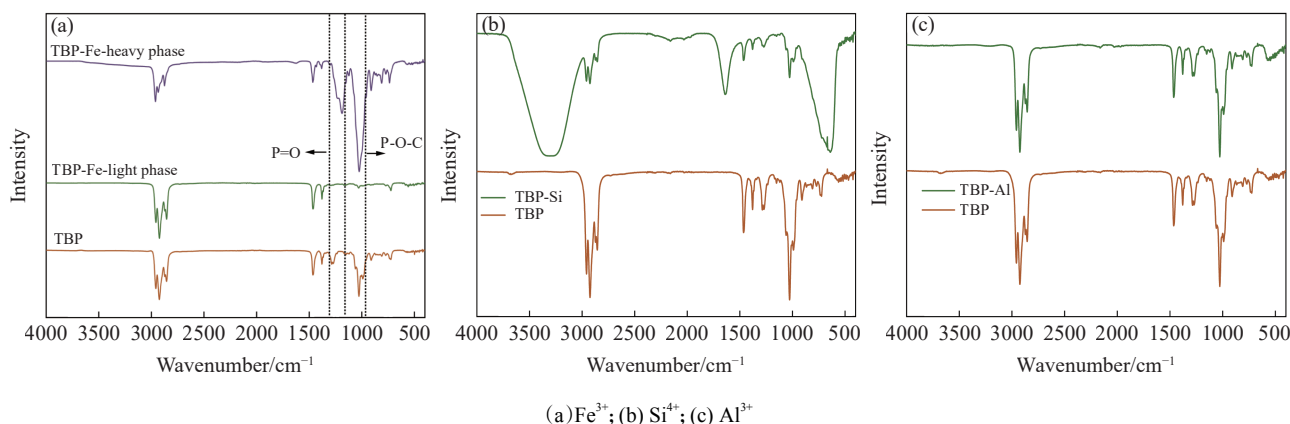


图 8 TBP 萃取各金属离子前后有机相 FT-IR 谱图

Fig. 8 FT-IR spectra of organic phases before and after metal ion extraction by TBP

2.6 吸附能及水解边界值

为量化萃取镓过程中的乳化关键成因, 项目组基于萃原液性质, 分别计算了固体微粒在油水界面的吸附能及其水解临界 pH 值。根据 Pickering 乳液理论, 固体微粒在油-水界面的附着能(ΔE)是决定其能否稳定乳液的关键参数。 ΔE 越大, 微粒在界面上吸附越牢固, 乳液体系越稳定。对于球形微粒从水相迁移至油-水界面的过程, 其附着能等于该微粒从界面处移至水相(或油相)内部所引起的系统界面能变化, 计算公式见式(2)。

$$\Delta E = \pi r^2 \gamma (1 - |\cos \theta|) \quad (2)$$

其中, r 为微粒半径 (nm); γ 为油-水界面处张力 (N/m); θ 为接触角 ($^\circ$)。

破坏该吸附所需的热能(来源于分子热运动, 即布朗运动的能量尺度)通常表示如式(3)所示。

$$E_{\text{thermal}} = k_B \times T \quad (3)$$

其中, k_B 是玻尔兹曼常数 (1.38×10^{-23} J/K), T 是绝对温度 (溶剂萃取常在常温下进行, 298 K), 则热能 $E_{\text{thermal}} = 1.38 \times 10^{-23} \times 298 \text{ J} \approx 4.11 \times 10^{-21} \text{ J}$ 。

假设单因素萃取镓过程中的乳化现象分别是由 SiO_2 球形微粒、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 球形微粒、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 球形微粒引起的, 油水界面处的张力 $\gamma = 0.025 \text{ N/m}$, 对应的微粒半径分别为 50、100、20 nm; 微粒表面分别被水相润湿, 各微粒对应的接触角 θ 分别为 80° 、 30° 、 25° ^[18-19]。带入上述公式(2) 计算可知, $\Delta E_{\text{SiO}_2} = 1.34 \times 10^{-16} \text{ J}$ 、 $\Delta E_{\text{Fe}(\text{OH})_3} = 1.41 \times 10^{-17} \text{ J}$ 、 $\Delta E_{\text{Al}(\text{OH})_3} = 2.78 \times 10^{-19} \text{ J}$ 。将三者的附着能与热能进行对比, $\Delta E_{\text{SiO}_2}/E_{\text{thermal}}$ 、 $\Delta E_{\text{Fe}(\text{OH})_3}/E_{\text{thermal}}$ 、 $\Delta E_{\text{Al}(\text{OH})_3}/E_{\text{thermal}}$ 值分别为 32 600、

3 430、67.6, 三者的比值均大于 10, 这表明纳米胶体在界面上的吸附是高度不可逆的, 大量的这种纳米颗粒可以有效地稳定乳液。如果颗粒聚集长大(r 增大), 附着能将呈平方级增长, 乳化会更为稳定。

在含镓溶液中, Fe^{3+} 和 Al^{3+} 因元素性质可能发生水解。为此, 项目组计算了二者产生氢氧化物沉淀的临界 pH 条件。若假设固体沉淀源于 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 形成, 并以溶液中 Fe^{3+} 浓度 1.37 mol/L 为依据, 可计算初始沉淀生成时的 $[\text{OH}^-]$ 及对应 pH。根据溶度积常数 $K_{\text{sp}}[\text{Fe}(\text{OH})_3] = 2.59 \times 10^{-39}$, 溶液恰好达到饱和时, $[\text{OH}^-] = 1.286 \times 10^{-13} \text{ mol/L}$, 对应 $\text{pOH} = 12.897$, $\text{pH} = 1.103$ 。因此, 对于 Fe^{3+} 浓度为 1.37 mol/L 的溶液, 当 $\text{pH} > 1.103$ 时, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 开始沉淀。类似地计算可得, 对于 Al^{3+} 浓度为 0.01853 mol/L 的溶液, 当 $\text{pH} > 3.616$ 时, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 开始沉淀。

3 结论

1) 在溶剂萃取镓的过程中, 界面乳化主要是由料液中的 Fe^{3+} 和 Si^{4+} 等杂质离子共同作用引发的。

2) Fe^{3+} 通过与萃取剂 TBP 形成配合物进入有机相, 因其溶解度问题导致有机相分相, 从而引发乳化;

3) Si^{4+} 则通过水解生成 SiO_2 胶体微粒, 该微粒能牢固吸附在油-水界面, 形成稳定的三维网状结构机械屏障, 是导致严重且稳定乳化的最关键因素。

4) 理论计算进一步证实, SiO_2 微粒在界面具有远高于其他水解产物的附着能, 使其乳化作用难以逆转。

参考文献

- [1] Zhao Zhuo, Li Xiaohang, Chai Yanquan, et al. Adsorption performances and mechanisms of amidoxime resin toward gallium (III) and vanadium(V) from Bayer liquor[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2016, 4(1): 53-59.
- [2] Lu Fanghai, Xiao Tangfu, Lin Jian, et al. Resources and extraction of gallium: A review[J]. Hydrometallurgy, 2017, 174: 105-115.
- [3] Hu Die, Ma Baozhong, Li Xiang, et al. Efficient separation and recovery of gallium and indium in spent CIGS materials[J]. Separation and Purification Technology, 2022, 282: 120087.
- [4] Dhiman S, Fuloria N, Ghosh A, et al. Gallium recovery from red mud: Integration of solvent extraction and siderophore assisted technologies[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 370: 122374.
- [5] Wang Gangan, Chen Chaoyi, Li Junqi, et al. A clean method for gallium recovery and the coproduction of silica-potassium compound fertilizer and zeolite F from brown corundum fly ash[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 461: 132625.
- [6] 刘佳媛. 攀枝花钒钛磁铁矿中镓的研究进展[J]. 现代矿业, 2019, 35(1): 102-105.
- Liu Jiayuan. Research progress of gallium in Panzhihua vanadium titanomagnetite ore[J]. Modern Mining, 2019, 35(1): 102-105.
- [7] 姜洋, 秦治峰, 王奎, 等. 提钒转炉污泥中镓和铁选择性分离研究[J]. 钢铁钒钛, 2025, 46(4): 88-94, 165.
- Jiang Yang, Qin Zhifeng, Wang Kui, et al. Study on the selective separation of gallium and iron from vanadium converter sludge[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2025, 46(4): 88-94, 165.
- [8] Guo Zhong, Qin Zhixing, Liu Sanping, et al. Solvent extraction of gallium and germanium using a novel hydroxamic acid extractant[J]. Minerals, 2024, 14(11): 1147.
- [9] 张伟. 新型羟肟酸萃取剂的合成及其萃取镓、锗性能研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2024.
- Zhang Wei. Synthesis of new hydroxamic acid extractant and extraction of gallium and germanium[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2024.
- [10] 刘晓荣. 铜溶剂萃取界面乳化机理及防治研究[D]. 长沙: 中南大学, 2001.
- Liu Xiaorong. Mechanism and prevention of interfacial emulsification in copper solvent extraction[D]. Changsha: Central South University, 2001.
- [11] 宁朋歌, 曹宏斌, 林晓, 等. 钒铬萃取分离过程中界面乳化物的形成行为[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(4): 773-778.
- Ning Pengge, Cao Hongbin, Lin Xiao, et al. Behavior of interfacial crud produced in extraction separation of vanadium and chromium[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(4): 773-778.
- [12] 周桂英, 阮仁满, 温建康, 等. 铜溶剂萃取过程界面乳化的原因分析[J]. 稀有金属, 2006, 30(6): 757-760.
- Zhou Guiying, Ruan Renman, Wen Jiankang, et al. Analysis of interfacial emulsification in solvent extraction of copper[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2006, 30(6): 757-760.
- [13] 谢营邦, 樊艳金, 张建飞, 等. 钛白废酸萃取提钪过程中的乳化及处理[J]. 有色金属 (冶炼部分), 2016(12): 48-50.
- Xie Yingbang, Fan Yanjin, Zhang Jianfei, et al. Emulsification and treatment during scandium extraction from titanium white waste acid[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2016(12): 48-50.
- [14] Wang Mingyu, Zhang Guiqing, Wang Xuewen, et al. Solvent extraction of vanadium from sulfuric acid solution[J]. Rare Metals, 2009, 28(3): 209-211.
- [15] 王扬, 王海良, 李培佑, 等. 用伯胺 7101 从钒渣浸出液中萃取钒[J]. 湿法冶金, 2014(2): 104-107.
- Wang Yang, Wang Hailiang, Li Peiyou, et al. Solvent extraction of vanadium from vanadium slag leaching solution using primary amine 7101[J]. Hydrometallurgy of China, 2014(2): 104-107.
- [16] 满露梅, 樊艳金, 黄家富, 等. 用溶剂萃取法从废酸液中分离钪、钛[J]. 湿法冶金, 2016, 35(3): 231-234.
- Man Lumei, Fan Yanjin, Huang Jiafu, et al. Separation of scandium, titanium from waste acidic solution by solvent extraction[J]. Hydrometallurgy of China, 2016, 35(3): 231-234.
- [17] 马雪阳, 梁斌, 吕莉, 等. 从钛白废酸中萃取回收钛[J]. 钢铁钒钛, 2016, 37(4): 62-68.
- Ma Xueyang, Liang Bin, Lü Li, et al. Recovery of titanium by solvent extraction from waste sulfuric acid discharged in titanium dioxide production[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2016, 37(4): 62-68.
- [18] Sadeh P, Najafipour I, Gholami M. Adsorption kinetics of halloysite nanotube and modified halloysite at the Palm oil-water interface and Pickering emulsion stabilized by halloysite nanotube and modified halloysite nanotube[J]. Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019(577): 231-239.
- [19] Huang Zhiwei, Keddie J L. Free energy modelling of a spherical nanoparticle at an oil/water interface[J]. Soft Matter, 2025, 21(26): 5188-5193.