

引文格式:李倩婷,刘杰,张家起,等. Span 80 在 P507-煤油萃取稀土体系中抑制乳化机制研究[J]. 中国有色冶金, 2026, 55(4): 75-88.

Li Qianting, Liu Jie, Zhang Jiaqi, et al. Mechanism of emulsification inhibition of Span 80 in P507-kerosene extraction rare earth system[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2026, 55(4): 75-88.

Span 80 在 P507-煤油萃取稀土体系中抑制乳化机制研究

李倩婷, 刘 杰, 张家起, 高 丽, 王志荣, 武桂芝, 唐沂珍

(青岛理工大学环境与市政工程学院, 山东 青岛 266000)

[摘 要] 采用液-液溶剂萃取直接分离浸出液中低浓度稀土离子时,有机相不仅溶解损失大,且易发生乳化,进而导致大量含油废水的产生。本研究在 P507-煤油萃取体系中加入表面活性剂 Span 80 作为界面稳定剂,系统分析了水相 Er^{3+} 浓度、杂质离子 ($\text{Mg}^{2+}/\text{Al}^{3+}$) 浓度、操作温度及有机相循环使用次数等条件对 Er^{3+} 的萃取性能和萃余液油含量的影响。结果表明,在最优条件下, Er^{3+} 的萃取率达到 99.77%,萃余液中油含量低至 1.14 mg/L。有机相循环使用三次后,萃取率仍高于 98%,说明该稳定剂显著提高了有机相的可重复性与稳定性。通过 AFM、FTIR 及 DFT 分析发现, Span 80 能够优化界面分子排列并增强界面膜强度,从而有效抑制乳化并减少有机相损失。升高 Er^{3+} 浓度或引入适量盐析剂 Mg^{2+} 均可降低萃余液中含油量,而 Al^{3+} 因水解生成多核羟基络合物会破坏界面,导致萃取率下降和油含量升高。

[关键词] P507; Span 80; 稀土离子 Er^{3+} ; 萃取效率; 油含量; 界面张力

[中图分类号] TF845; TF804.2 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2026)04-0075-14

DOI: 10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2026.04.008

0 引言

稀土因具有优越的理化性能而被广泛应用于石油化工、陶瓷玻璃、航空航天等众多领域^[1,2]。特别是近年来,随着高科技的快速发展,对稀土产品的需求量越来越大,且对纯度的要求也越来越高,进而对稀土的分离纯化技术提出更高的要求。我国存在大量的稀土尾矿或者贫矿,浸出液中稀土的浓度一般介于 50 ~ 1 000 mg/L,且杂质镁与铝离子的浓度介于 0 ~ 40 mg/L。针对此种复杂溶液中低浓

度稀土元素的提取,采用传统沉淀法分离时,需要加入过量沉淀剂,造成生产成本低、选择性较低,且残留的沉淀剂会污染环境^[3]。在工业生产中,溶剂萃取法因选择性强、易工业化放大而成为分离与纯化稀土的主要方法之一^[4,5]。萃取分离稀土时常用的萃取剂主要包括酸性 P507、P204 和 C272 等^[6,7]。若能够采用溶剂萃取法直接从这种复杂浸出液中直接提取低浓度稀土,可有效降低生产成本,提高富集产品的纯度。然而,在提取过程中常因有机相的溶解、乳化等问题造成有机萃取剂损失,并产生大量的含油废水,对生态环境造成威胁^[8,9]。因此,亟待寻求一种能够在萃取分离稀土过程中减少乳化并降低有机相溶解损失的新方法。

研究表明,在制备乳液液膜过程中,常通过添加表面活性剂以提升液膜的界面稳定性,从而抑制液膜流损和乳化现象^[10]。Span 80 为聚氧乙烯司盘 ($\text{C}_{24}\text{H}_{44}\text{O}_6$),作为一种非离子油溶性表面活性剂,其凭借优异的界面活性,被广泛应用于提升有机液膜

[收稿日期] 2026-02-10 [修订日期] 2026-04-15

[录用日期] 2026-04-16 [出版日期] 2026-08-01

[第一作者] 李倩婷(2000—),女,硕士研究生,主要研究方向为重金属污染废水处理与资源化。

[通信作者] 刘杰(1980—),女,博士研究生,教授,主要研究方向为重金属污染废水处理与资源化。

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(52174336);山东省自然科学基金资助项目(ZR2026MS0784)。

在萃取操作中的稳定性^[11]。Shokri等^[12]以Span 80为表面活性剂、废植物油为外相、盐酸为内相构建乳状液膜体系,用于萃取甲基紫2B(MV)染料。随着Span 80浓度由1%(质量分数)提高至3%(质量分数),乳液稳定时间从74 min延长至116 min,但当其浓度进一步增加,稳定时间则开始缩短。当Span 80用量超过3%(质量分数),会发生膨胀,导致乳液破碎率上升和耐久性下降。相反,在其浓度(质量分数)不足3%的情况下,由于Span 80的含量不足,难以充分包围膜相中的内相液滴,导致乳状液膜的破损率高和稳定性低。Noah等^[13]利用乳状液膜处理含铬工业废水,考察了均化速率及Span 80含量等因素对乳液稳定性和铬萃取行为的影响。实验发现,随着Span 80含量从1%(质量浓度)增至3%(质量浓度)时,所形成的水包油乳状液滴的粒径减小,破损率从20%降至10%,从而增强了有机液膜的稳定性。该现象可归因于Span 80分子在内相与膜相界面处分布更密集,强化了界面吸附并提高液膜稳定性。León等^[14]使用Span 80作为表面活性剂、HCl为内相、苯甲酰丙酮为载体、煤油为溶剂配制乳状液膜,用于去除水中 Cu^{2+} 。实验表明,随膜相中表面活性剂的含量从 5 kg/m^3 升至 50 kg/m^3 , Cu^{2+} 的渗透率、通量及去除率均呈现上升趋势。然而,当其浓度继续增加,乳液黏度上升,使得液滴尺寸增大,有效传质面积减少,同时液膜增厚,且传质阻力上升,进而导致 Cu^{2+} 的跨膜传输速率降低。由上可知,在有机提取剂中添加适量的表面活性剂既可以提高界面稳定性,又不会影响提取效率。Liu等^[15]将一定量的Span 80添加到P507煤油体系中,考察Span 80含量、P507浓度、皂化度、有机相稀土预载量等因素对 Er^{3+} 萃取效果和萃余液含油量的影响。结果表明,当水相中 Er^{3+} 浓度为 0.5 g/L ,pH值为3,P507的皂化度为10%,相比 $V(\text{O}):V(\text{A})$ 为1:2,有机相中Span 80的添加量为6%时, Er^{3+} 的萃取效率仍可达到99%以上,萃余液中油含量为 13.9 mg/L 。张秋露等^[16]以P507作为萃取剂、煤油充当稀释剂,并添加表面活性剂Span 80为调控剂,用于稀土元素 Er^{3+} 的萃取。该研究系统考察搅拌速率、水相pH及水油比例等因素对 Er^{3+} 的萃取效率及萃余液油含量的影响,并借助响应面法对操作条件进行了优化。实验结果显示,在 $V(\text{O}):V(\text{A})$ 为1:4、搅拌速率 130 r/min 、pH为3.5、反应时间 5 min 的条件下,萃取效率达到

95.42%,萃余液含油量为 1.68 mg/L ,且模型预测值与实际测量结果吻合良好。由此可知,有机相中添加适量的Span 80能有效减少有机相溶解损失,防止乳化现象发生,调控作用明显。然而,采用P507-Span 80有机体系萃取稀土时,水相中稀土离子浓度、杂质离子含量(如 Mg^{2+} 、 Al^{3+})、操作温度及有机相的重复利用次数等因素变化对稀土离子萃取行为的影响尚未可知,仍需进一步深入研究并阐明其微观作用机制。

本研究采用Span 80作为界面稳定剂,P507为萃取剂,煤油为稀释剂构建有机萃取体系,以具有光学和磁学特性的典型重稀土 Er^{3+} 为研究对象,系统探究了水相中稀土 Er^{3+} 、杂质离子(如 Mg^{2+} 、 Al^{3+})、操作温度、有机相的循环使用次数等因素变化对 Er^{3+} 萃取行为的影响,并通过AFM、FTIR和DFT分析手段剖析了微观影响机制,为绿色高效提取稀土提供理论依据。

1 试验部分

1.1 试剂与材料

有机萃取剂P507购自上海莱雅仕化工有限公司,Span 80购自国药集团化学试剂有限公司,稀释剂为磺化煤油,购自科瑞达化工有限公司。氢氧化钠(NaOH,分析纯)购自上海麦克林生化科技有限公司。氧化钪(Er_2O_3 ,分析纯)购自赣州顺源稀土材料有限公司。浓盐酸(HCl,工业级)、无水氯化铝(AlCl_3 ,分析纯)、氯化镁($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$,分析纯)均购自国药集团化学试剂有限公司,试验过程中所使用的水均为实验室自制的去离子水。

1.2 萃取实验

1)有机相配制。首先,将适量 10 mol/L NaOH溶液缓慢滴加至 0.5 mol/L P507-煤油溶液中,并在 80 r/min 的条件下搅拌,得到皂化度10%的P507-煤油溶液。然后,再加入适量的Span 80-煤油溶液,充分搅拌,得到P507-Span 80-煤油有机溶液,其中Span 80含量为6%。

2)水相配制。首先称取适量 Er_2O_3 溶于浓盐酸中,随后置于电炉加热至沸腾,待形成糊状物后采用去离子水定容,调节pH至3,制得指定浓度的钪离子水溶液;另称取一定量氯化镁或无水氯化铝固体,以去离子水溶解并定容,再使用盐酸将pH调整至3,配制为指定浓度的 $\text{Mg}^{2+}/\text{Al}^{3+}$ 溶液,备用。

3) 萃取。在室温下,取 20 mL 水相料液与上述配置好的 10 mL P507-Span 80-煤油有机溶液于 50 mL 烧杯中,置于磁力搅拌器上以 120 r/min 搅拌 40 min。在特定时间点(0、5、10、15、20、25、30 和 40 min)取一定体积的萃余液,离心后测定铈的浓度。另取一定量的萃余液,以 4 000 r/min 转速离心后,测定其中的含油量。

4) 反萃取。取 20 mL 浓度为 5 mol/L 的盐酸溶液与负载稀土铈的 10 mL P507-Span 80-煤油有机溶液于 50 mL 烧杯中,置于磁力搅拌器上以 120 r/min 搅拌 30 min,静置 20 min,分出有机相待用。

1.3 分析与计算方法

1.3.1 萃取率

萃余液中 Er^{3+} 、 Mg^{2+} 和 Al^{3+} 的浓度由 ICP-7200 电感耦合等离子体发射光谱仪(赛默飞世尔科技公司)测得。

稀土中 Er^{3+} 萃取率 $E(\%)$ 的计算公式见式(1)。

$$E = \frac{c_0 - c_t}{c_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: E 为目标离子萃取率,%; c_t 为萃余液中的目标离子质量浓度,mg/L; c_0 为水相中初始目标离子质量浓度,mg/L。

1.3.2 油含量

萃取后,取 8 mL 离心后的下清液于分液漏斗中,加入 10 mL 四氯乙烯进行萃取,振荡 4 min 后,静置 5 min,取下层含油液相至比色管中,以四氯乙烯作为空白对照,通过红外测油仪(KLBG-125,吉光科技有限责任公司)测定萃余液中油的含量。考虑试验误差,将重复 3 次的平均值作为最终结果。

1.3.3 皂化度

皂化度是指 P507 中有机酸(—P—OH)被碱(通常是氨水或氢氧化钠)中和转化成铵盐或钠盐形式(—P—ONH_4 或 —P—ONa)的百分比。采用两步滴定法测定皂化度。具体步骤为:准确称取约 1~2 g P507 皂化液样品于 250 mL 锥形瓶中。加入 20~30 mL 无水乙醇,轻轻摇动使样品完全溶解。加入 3~4 滴酚酞指示剂,溶液应呈红色。用盐酸标准溶液(浓度 c_{HCl})滴定至红色恰好消失,记录消耗的盐酸体积 V_1 mL。准确称取另一份同一质量的 P507 皂化液样品于 250 mL 锥形瓶中。用移液管准确加入一定体积的盐酸标准溶液(c_{HCl}),记录体积为 V_{add} mL,加入量应确保足够过量。加入 20~30 mL 无

水乙醇,充分摇动,此时溶液应无色(因酸过量)。酸解反应充分进行后加入 3~4 滴酚酞指示剂。用已标定的氢氧化钠标准溶液(浓度 c_{NaOH})滴定至溶液出现微红色,并保持 30 s 不褪色。记录消耗的氢氧化钠体积 V_2 mL。

P507 皂化度的计算公式见式(2)。

$$\text{皂化度}(\%) = \frac{(c_{\text{HCl}} \cdot V_{\text{add}} - c_{\text{NaOH}} \cdot V_2) - (c_{\text{HCl}} \cdot V_1)}{(c_{\text{HCl}} \cdot V_{\text{add}} - c_{\text{NaOH}} \cdot V_2)} \cdot 100\% \quad (2)$$

式中: c_{HCl} 为盐酸标准溶液浓度, mol/L; V_{add} 为第二次实验中加入的盐酸体积, L; c_{NaOH} 为氢氧化钠标准溶液浓度, mol/L; V_2 为第二次滴定消耗的 NaOH 体积, L; V_1 为第一次滴定消耗的 HCl 体积, L。

1.3.4 动态界面张力

动态界面张力由表面张力计(Force Tension K100, Germany Kruss)测定。具体为:取 20 mL 待测有机相于烧杯中,将 Wilhelmy 铂金板缓慢垂直浸入待测有机相中,界面张力作用于铂金板所产生的力值变化由仪器天平实时测量,精确计算出样品的表界面张力等关键数据。

1.3.5 AFM 分析

有机相三维形貌由原子力显微镜(AFM, BY3000, 广州市本原纳米仪器有限公司)表征。基于力敏探针与样品表面的相互作用原理,采用 AFM 通过监测微悬臂梁的偏转来重构纳米尺度的表面拓扑结构,压电扫描器确保了探针在三维方向上的精确移动,从而实现对表面特性的分析。

2 结果与讨论

2.1 水相中 Er^{3+} 浓度的影响

水相中稀土离子浓度的变化对萃取行为具有显著影响。在相比 $V(\text{O}):V(\text{A})=1:2$ 、搅拌强度 140 r/min 的条件下,改变水相中稀土 Er^{3+} 的浓度(50、200、500、800 和 1 000 mg/L),探究以 P507-Span 80-煤油体系萃取 Er^{3+} 时,水相中 Er^{3+} 浓度变化对萃取效率和萃余液中油含量的影响规律,具体结果如图 1 所示。

如图 1(a)所示,随着水相中 Er^{3+} 浓度升高,萃取效率逐渐降低。当原水相中 Er^{3+} 浓度低于 200 mg/L,萃取反应 5 min 时,萃取率可达 99% 以上;当 Er^{3+} 浓度增至 500 mg/L 时,需延长至 30 min 方可达到同等萃取水平;而当 Er^{3+} 浓度达到 1 000 mg/L 时,反应

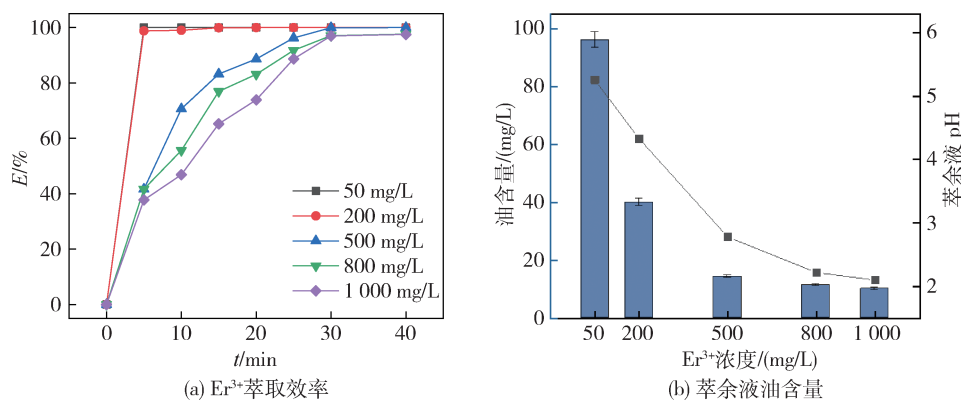


图1 Er^{3+} 浓度对 Er^{3+} 萃取效率和萃余液油含量的影响

Fig. 1 Effect of Er^{3+} concentration on extraction efficiency of Er and oil content in raffinates

40 min的萃取率仅为97.55%,接近有机相最大萃取负荷。实验结果说明P507-Span 80有机相对稀土元素展现出良好的萃取能力。由图1(b)可以看出,随着水相中 Er^{3+} 浓度不断提高,萃余液内油含量总体呈现下降趋势。当初始浓度为50 mg/L时,油含量为95.97 mg/L;当 Er^{3+} 浓度提高至500 mg/L,油含量进一步降至13.94 mg/L;且继续增加离子浓度,萃余液油含量仍持续降低^[17]。在水相中 Er^{3+} 浓度为500 mg/L和1000 mg/L时,不添加Span 80,其他条件相同,萃余液油含量分别为38.62 mg/L和35.41 mg/L。由此可知,添加Span 80在一定程度上可以防止有机相的溶解。

此外,由图1(b)可知,萃余液中pH随水相中 Er^{3+} 浓度的增加而减小。分析其原因,在萃取过程

中,当水相中 Er^{3+} 浓度较低时,主要是 Er^{3+} 与 Na^+ 发生离子交换反应;而在 Er^{3+} 浓度较高的情况下,除了与有机相中的 Na^+ 发生交换外, Er^{3+} 还会与有机相中的 H^+ 进行交换,使部分 H^+ 进入水相,导致水相pH出现下降。较低pH值对萃取剂的溶解有抑制作用,可有效降低萃余液中的油含量。

由试验结果可知,萃余液油含量随萃取反应的时间延长而呈现逐渐上升的趋势。已有研究表明,通过缩短相接触时间可以有效地防止乳化现象和第三相的产生^[18]。因此,在保持萃取效率的基础上,适当缩短油水两相混合时间成为控制萃余液油相含量的有效策略。基于此,本研究进一步探讨了水相 Er^{3+} 浓度处于50~400 mg/L时,萃取时间对萃取效率与萃余液油含量的影响规律,具体见图2与图3。

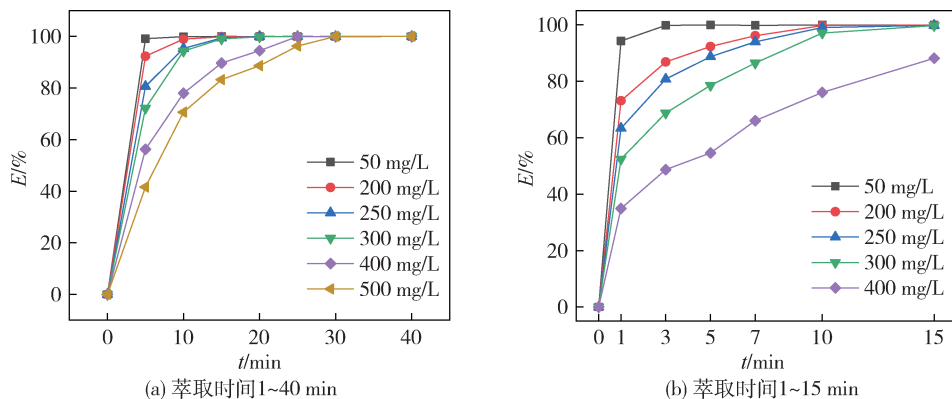
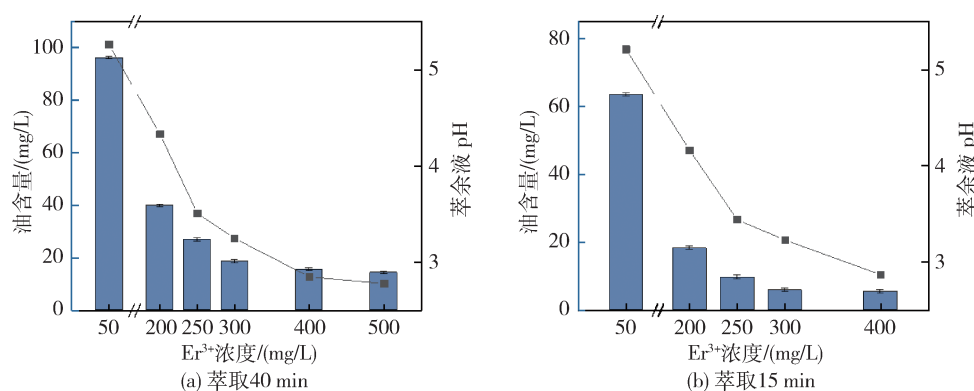


图2 萃取时间对铈萃取效率的影响

Fig. 2 Effect of extraction time on extraction efficiency of Er

根据图2所示, Er^{3+} 萃取率随时间的延长而逐渐提高。具体来看,在 Er^{3+} 浓度低于200 mg/L时,在10 min内萃取反应趋于平衡,萃取效率可超过97%。

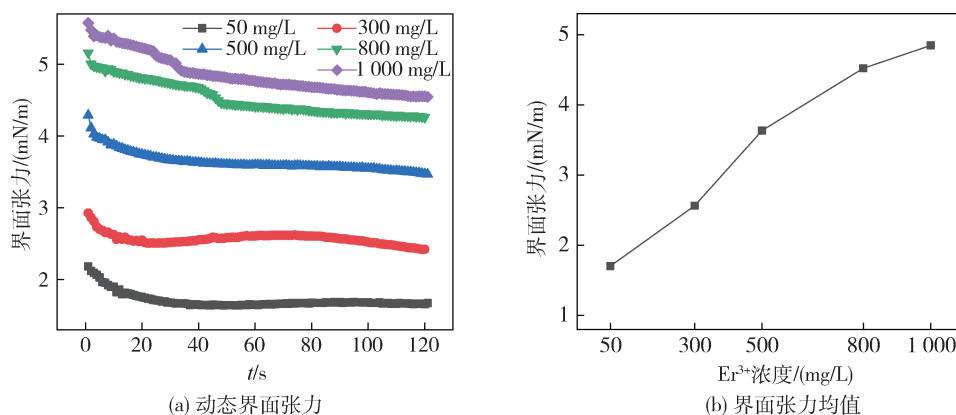
而当离子浓度增加到300 mg/L或以上时,体系在15 min内仍可达到萃取平衡,此时的萃取效率保持在99%以上。

图3 Er^{3+} 浓度对萃余液中油含量与pH的影响Fig. 3 Effect of Er^{3+} concentration on oil content and pH in raffinate

根据图3所示,增加 Er^{3+} 浓度可明显降低萃余液中油含量,同时减少萃取时间也能进一步促进该趋势。由图3(a)可见,萃取40 min时, Er^{3+} 浓度从50 mg/L升高至400 mg/L,油含量由95.97 mg/L减少到14.78 mg/L。而图3(b)则表明,萃取15 min时,在同等浓度变化范围内,油含量下降更为显著。特别是在50~300 mg/L区间内,其数值从63.53 mg/L减少

到5.89 mg/L。需指出的是,即便 Er^{3+} 浓度达到或超过400 mg/L,油含量依然持续降低,进一步说明水相中 Er^{3+} 浓度对萃余液中油含量具有显著抑制作用。

为了探究P507-Span 80-煤油体系在萃取 Er^{3+} 过程中抑制乳化的微观机制,考察水相中 Er^{3+} 浓度变化对界面张力的影响规律,结果如图4所示。

图4 Er^{3+} 浓度对油水界面张力的影响Fig. 4 Effect of Er^{3+} concentration on oil-water interfacial tension

由图4可知,随着水相 Er^{3+} 浓度的升高,有机相萃合物含量随之升高,有机相的界面张力也随之增大。在溶液体系中,若溶剂与溶质之间的界面张力增大,则溶质分子较难被溶剂分子包围,溶解度降低,使得萃余液中油含量降低。此外,水相酸度在萃取过程中持续升高,进一步限制了萃取剂及其萃合物在水中的溶解,有效降低了萃余液中的油含量。因此,为了保证萃取效果和降低有机溶液损失,选择后续试验条件为:水相 Er^{3+} 浓度300 mg/L,萃取时间15 min。

2.2 水相中 Mg^{2+} 浓度的影响

无论是传统的铵盐浸出还是新兴的镁盐浸出,浸出液中均有镁离子伴随稀土离子进入浸出液。因此,稀土萃取分离过程中往往需要考虑 Mg^{2+} 对稀土分离效果的影响。本节通过调节水相中 Mg^{2+} 的浓度(0、10、20和40 mg/L),探究P507-Span 80-煤油体系萃取稀土 Er^{3+} 时,杂质 Mg^{2+} 浓度变化对 Er^{3+} 萃取效率和萃余液中油含量的影响规律,结果见图5。

如图5(a)所示,水相中杂质 Mg^{2+} 浓度升高时, Er^{3+} 萃取率先上升后下降。 Mg^{2+} 作为二价金属离子,

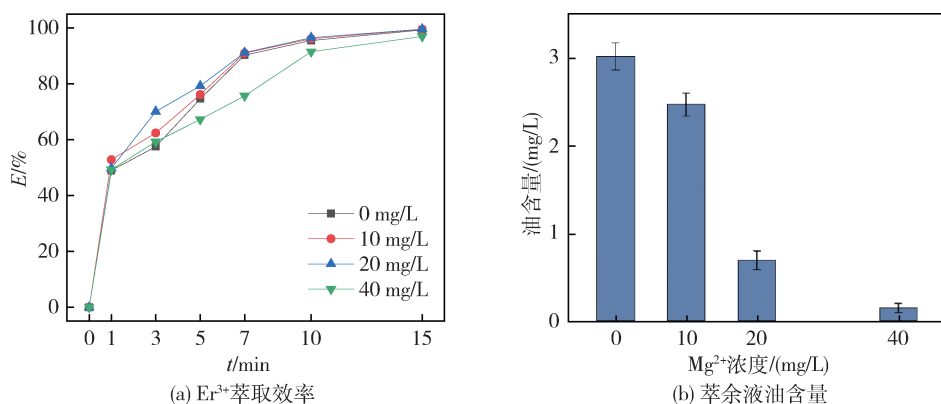


图5 Mg^{2+} 浓度对 Er^{3+} 萃取效率和萃余液中油含量的影响

Fig. 5 Effect of Mg^{2+} concentration on extraction efficiency of Er and oil content in raffinates

与三价稀土离子相比,电荷低,离子半径大,离子电位小,键合能力最弱,P507对三价稀土离子的萃取能力大于 Mg^{2+} ,稀土离子会被优先萃取。此外,已有研究指出,向水相中加入适量 Mg^{2+} 能够明显提高稀土离子的萃取效率,这主要是因为 Mg^{2+} 作为强电解质,具有较强的水合能力,引入水相后, Mg^{2+} 会通过强水合作用与稀土 Er^{3+} 竞争并消耗大量的自由水分子,进而有效破坏稀土 Er^{3+} 的水化层,推动稀土 Er^{3+} 向界面迁移并与萃取剂结合,强化传质,提高萃取效率^[19-21]。然而,继续增加 Mg^{2+} 浓度,过量 Mg^{2+} 占据了有机界面的活性点位,减少了 Er^{3+} 与界面活性点位的接触概率,导致萃取效率降低,该变化趋势与隋娜等^[22]的研究结论一致。

由图5(b)所示,随着水相中杂质 Mg^{2+} 含量的增

加,萃余液中油含量整体呈下降趋势。随着 Mg^{2+} 浓度从0 mg/L增加至40 mg/L,萃余液中油含量从3.17 mg/L显著下降至0.049 mg/L。这一现象表明 Mg^{2+} 的引入显著抑制了有机相的溶解损失。其机理可归因于:在萃取过程中,皂化后的P507在水相中易形成胶团或微乳状液,此过程是其发生流失的主要机制。然而由于 Mg^{2+} 属于强电解质,可发挥“盐析”作用,其通过水化作用消耗自由水分子,破坏P507的胶团或微乳状液结构,阻碍其胶团的形成,释放出P507分子,使皂化后的P507在水相中溶解度下降^[23]。因此,添加适量的 Mg^{2+} 有助于提升稀土离子的萃取效率,且同时降低有机相的溶解损失。

本节继续探究了有机相中 Mg^{2+} 浓度变化对动态界面张力的影响规律,结果如图6所示。

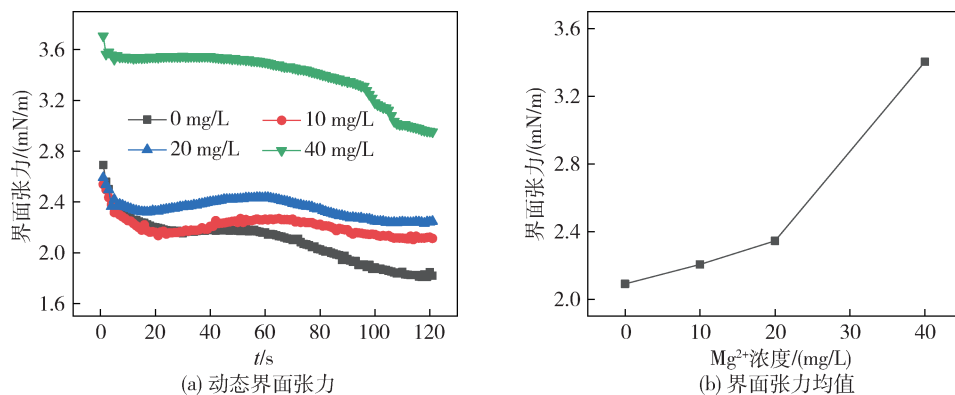


图6 Mg^{2+} 浓度对油水界面张力的影响

Fig. 6 Effect of Mg^{2+} concentration on oil-water interfacial tension

图6结果表明, Mg^{2+} 浓度对油-水界面张力具有显著影响。从图6(a)可以看出,在0~40 mg/L范围内,界面张力均随时间推移呈下降趋势,但不同浓

度条件下变化特征存在明显差异。在油-水界面处,动态界面张力均随时间延长而降低。在较低浓度(0~20 mg/L)下,界面张力先迅速下降,随后短暂

上升,约60 s后再度下降,最终在120 s左右趋于平衡。而当 Mg^{2+} 浓度达到40 mg/L时,动态界面张力初始阶段下降较缓慢,随后迅速降低。由图6(b)可以看出,水相中引入 Mg^{2+} 使油-水界面张力增大,且该张力随 Mg^{2+} 浓度提高呈先缓后急的上升趋势,界面张力增加有助于减少有机相溶解损失。这可能是因为 Mg^{2+} 作为强电解质,引入水相中破坏了钇离子的水化层,推动钇离子向界面迁移^[24]。然而,当 Mg^{2+}

浓度进一步升高时,过量的 Mg^{2+} 在界面处富集,对界面张力产生影响。

2.3 水相中 Al^{3+} 浓度的影响

在稀土浸出过程中, Al^{3+} 会与稀土元素一起浸出,通过调控水相中 Al^{3+} 的浓度,探究P507-Span 80-煤油体系萃取稀土 Er^{3+} 时,杂质 Al^{3+} 浓度变化对 Er^{3+} 萃取效率和萃余液中油含量的影响,结果见图7。

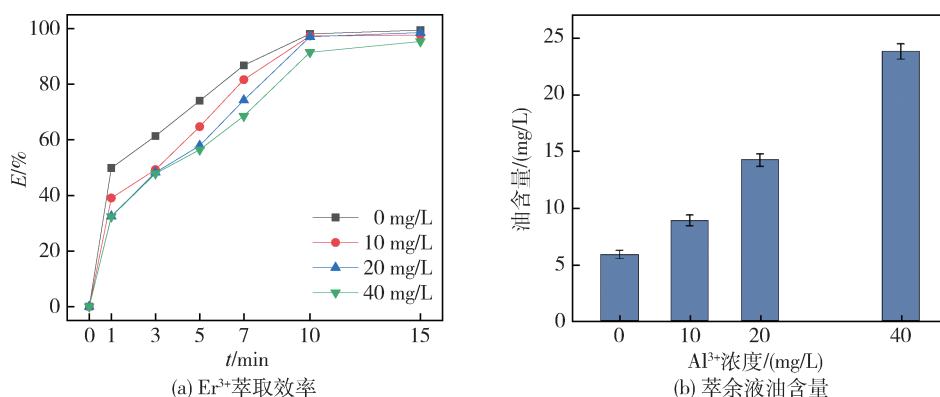


图7 Al^{3+} 对 Er^{3+} 萃取效率和萃余液中油含量的影响

Fig. 7 Effect of Al^{3+} on extraction efficiency of Er^{3+} and oil content in raffinate

根据图7(a)所示,在萃取反应的前10 min内, Er^{3+} 萃取率先快速升高,随后逐渐趋于平衡。然而,随着水相中 Al^{3+} 浓度从0 mg/L增至40 mg/L,相同时刻下 Er^{3+} 萃取效率显著下降。其主要机理可解释为:P507分子与稀土 Er^{3+} 在界面区域的结合过程受多重因素调控。除共存盐离子的盐析效应外,盐离子的界面竞争吸附同样起到关键作用^[25]。与水合作用较强的阳离子相比,水合能力较弱的阳离子更容易吸附在疏水界面,显示较高的界面亲和力^[26]。 Al^{3+} 由于半径较小且水合性较弱,优先吸附在疏水界面并与P507磷酸基团结合,占据 Er^{3+} 萃取位点;同时, Al^{3+} 的负载使有机相的黏度增大,降低了两相分散传质效率,最终在竞争吸附和物性劣化的双重作用下降低了 Er^{3+} 的萃取效率^[27, 28]。由图7(b)可知,当水相中 Al^{3+} 浓度升高(0~40 mg/L)时,萃余液中油含量由5.849 mg/L上升至23.804 mg/L。潜美丽等^[29]在理论上计算了 Al^{3+} 的碱滴定曲线,由计算结果可知,在pH为3~4范围内,水相中 Al^{3+} 可以水解生成 $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$ 、 $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$ 等多核羟基络合物。而这些多核羟基络合物可与P507结合形成大分子萃合物,破坏油-水界面稳定性,使有机相液滴破碎

并分散至水相中,从而导致油含量增加并加剧乳化现象^[30-32]。

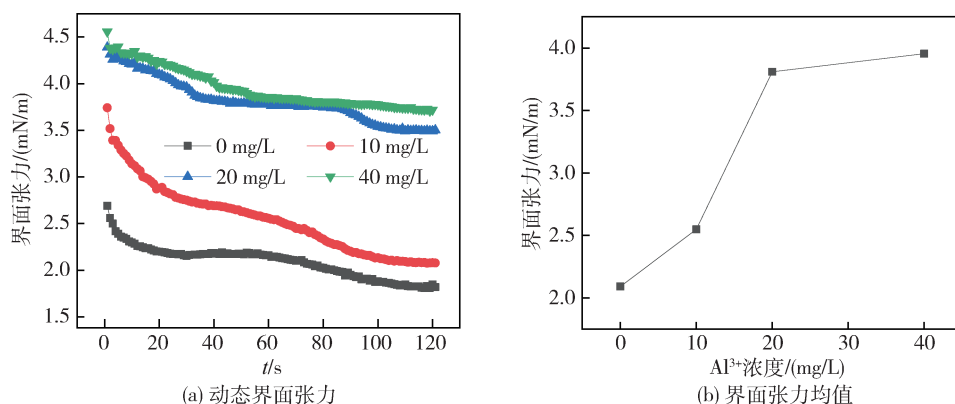
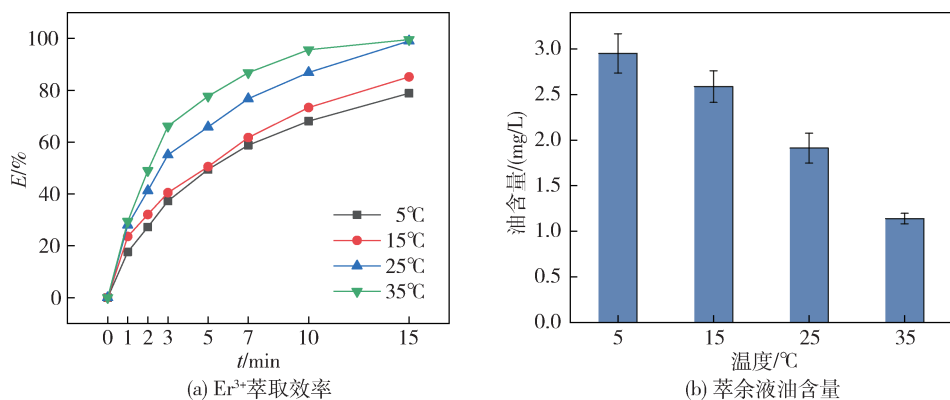
将P507-Span 80-煤油体系与含 Er^{3+} 和 Al^{3+} 的水溶液接触萃取(其中 Er^{3+} 浓度为300 mg/L),考察 Al^{3+} 浓度变化对有机相动态界面张力的影响,结果见图8。

如图8(a)所示,动态界面张力随时间推移持续下降,最终达到稳定状态。图8(b)表明,在溶液中加入 Al^{3+} 会引起油-水界面张力升高,且随着 Al^{3+} 浓度增加呈现先迅速上升后逐渐缓慢增加的变化特征。这是因为,在萃取过程中, Al^{3+} 水解生成 $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$ 、 $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$ 等多核羟基络合物,其与P507结合形成大分子萃合物,破坏油水界面稳定性,促使有机相液滴破碎并分散至水相,进而导致油含量增加并加剧乳化现象。

2.4 温度对有机相萃取钇的影响

探究P507-Span 80-煤油体系萃取稀土时温度变化(5℃、15℃、25℃和35℃)对 Er^{3+} 的萃取效率及萃余液中油含量的影响,结果见图9。

如图9(a)所示,在相同反应时间, Er^{3+} 的萃取效率随温度上升而增加。反应开始后的15 min内,萃

图8 Al^{3+} 浓度对油水界面张力的影响Fig. 8 Effect of Al^{3+} concentration on oil-water interfacial tension图9 温度对 Er^{3+} 萃取效率和萃余液中油含量的影响Fig. 9 Effect of temperature on extraction efficiency of Er^{3+} and oil content in raffinates

取率均迅速提高。具体而言,反应至 15 min,温度为 5°C 和 15°C 时, Er^{3+} 的萃取率分别为 77.98% 和 84.93%;而温度为 25°C 和 35°C 时,萃取效率分别提高至 98.92% 和 99.77%。由此可知,提高反应温度能够显著增强萃取体系的传质过程,进而有效提升 Er^{3+} 的萃取效果。

由图 9(b) 可知,反应温度升高会引起萃余液中油含量的持续下降。在 5°C 条件下,油含量为 2.95 mg/L;温度升至 15°C 时,该值降至 2.59 mg/L;当温度达到 25°C 与 35°C 时,油含量进一步下降至 1.91 mg/L 和 1.14 mg/L。已有研究指出,低温条件下萃取体系易发生相分离困难及乳化现象,而提高温度可显著降低乳液黏度^[33]。因此,通过保持较高操作温度、采用低黏度稀释剂以及优化循环有机相组成,可有效降低有机相黏度,避免第三相的生成^[34]。

2.5 有机相重复利用次数的影响

有机相的再生效果与循环利用次数对稀土 Er^{3+}

的萃取过程具有重要影响。将第一次萃取后的 Span 80-P507 有机相进行反萃取,然后水洗、皂化后重新使用,分别循环 1、2、3 次,探究 P507-Span 80-煤油体系萃取稀土 Er^{3+} 时,有机相循环使用次数对 Er^{3+} 萃取效率及萃余液油含量的影响规律。有机相的三次反萃取率见表 1,循环使用萃取效率与油含量见图 10。

表1 有机相的反萃取效率

Table 1 The reverse extraction efficiency of the organic phase

反萃时间	反萃取次数/次		
	1	2	3
15 min	97.93%	97.52%	96.93%

由表 1 可知,有机相循环使用时,其中萃取的稀土 Er^{3+} 仍可被高效反萃取,这说明反萃取没有破坏 P507-Span 80-煤油体系的相结构,理化性质稳定。

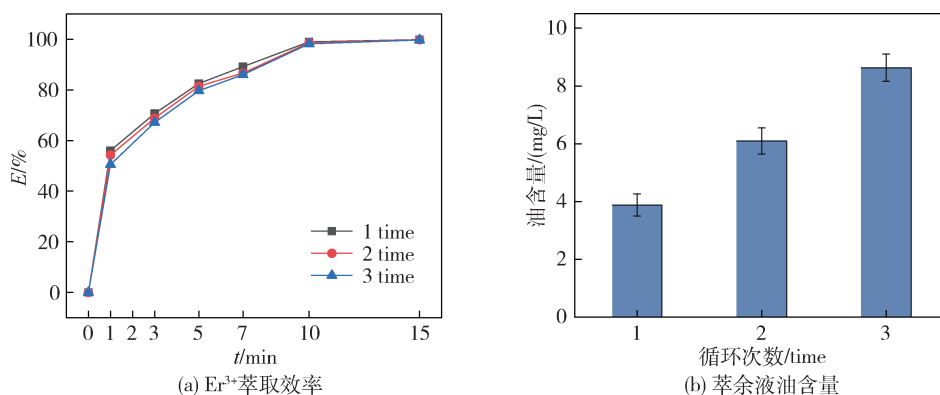


图10 有机相循环使用次数对 Er^{3+} 萃取效率和萃余液油含量的影响

Fig. 10 Effect of the organic phase recycling times on extraction efficiency of Er^{3+} and oil content in raffinates

由图10(a)可知,萃取率随时间变化呈现先快速升高后缓慢的增长趋势,最终达到平衡。在相同反应时间,随着有机相循环使用次数增加,萃取率基本保持一致,稀土 Er^{3+} 的三次萃取效率均达到98%以上,这表明循环使用有机相结构稳定。从图10(b)可以看出,随着有机相重复使用次数增多,萃余液油含量逐渐上升,从初始的3.88 mg/L增至8.63 mg/L,但总体仍处于较低范围,其可能原因在于,P507-

Span 80-煤油体系在多次使用后,其中的Span 80在水中有微量溶解,从而导致萃余液油含量上升。

2.6 微观表征分析

2.6.1 AFM表征

为了研究P507-Span 80-煤油体系在萃取金属离子过程中有机相界面结构的微观变化,利用原子力显微镜(AFM)对负载不同金属离子的有机相进行三维形貌表征,具体结果如图11所示。

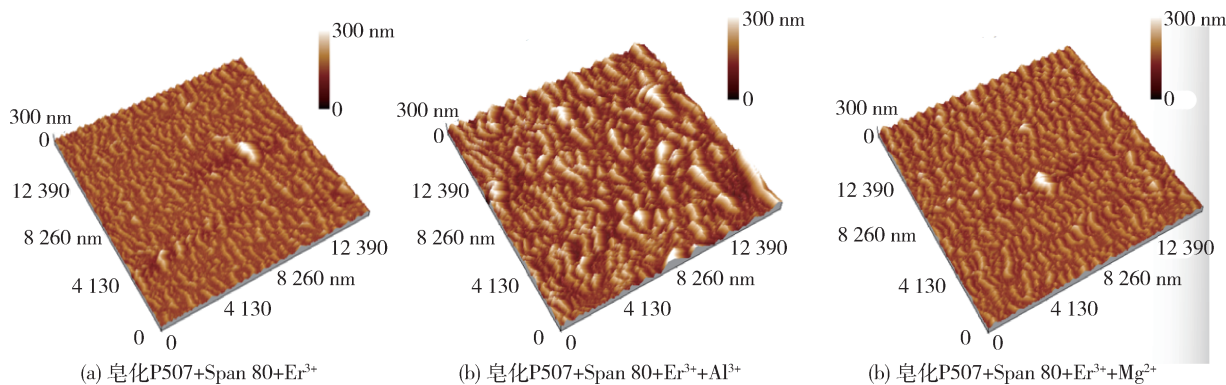


图11 P507-Span 80-煤油体系萃取不同金属离子后有机相的AFM图

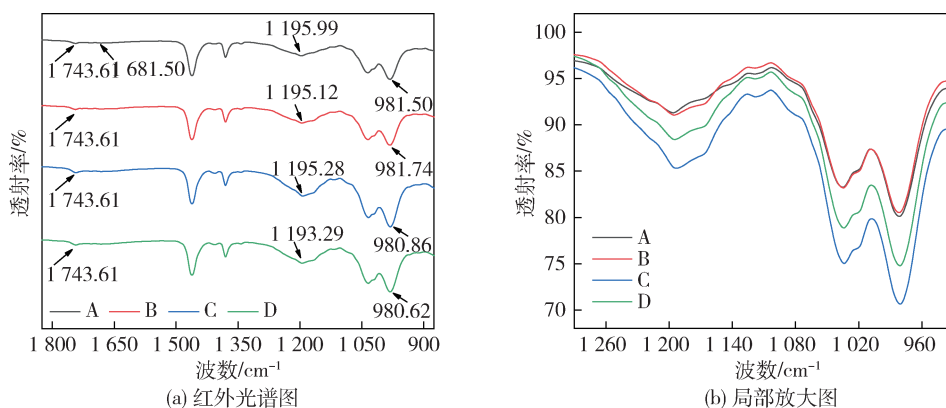
Fig. 11 AFM images of the organic phase in the P507-Span 80-kerosene system after extraction of different metal ions

由图11可知,P507-Span 80-煤油有机体系萃取 Er^{3+} 后,可观察到密集且排列有序的隆起形态,同时有机相表面局部厚度有所增加。P507-Span 80-煤油溶液有机相中负载 Er^{3+} 与 Al^{3+} 后,云母片上分子形态较为杂乱,且高低起伏,说明 Al^{3+} 的负载削弱了 Er^{3+} 的去水化作用,P507分子与水解的 Al^{3+} 结合,导致界面结构紊乱、稳定性下降,有机分子受力失稳,易产生乳化与溶解损失。P507-Span 80-煤油溶液有机相中负载 Mg^{2+} 和 Er^{3+} 后,与只负载 Er^{3+} 相比变化

不大,排列更加规整,表明 Mg^{2+} 的加入未削弱 Er^{3+} 的去水化作用,反而促进二聚体解离,使界面P507分子排布更紧密,表面隆起区厚度增大,从而界面稳定性增强,并有效减弱乳化与溶解损失。

2.6.2 FTIR表征

为进一步阐明负载稀土 Er^{3+} 、杂质 Al^{3+} 及 Mg^{2+} 对有机相微观结构的影响,本研究在完成萃取试验后,对含金属离子的有机相进行了傅里叶变换红外光谱(FTIR)表征,其结果见图12及表2。



A 为 Span 80-皂化 P507-正己烷; B 为 Span 80-皂化 P507- Er^{3+} -正己烷;
C 为 Span 80-皂化 P507- Er^{3+} - Al^{3+} -正己烷; D 为 Span 80-皂化 P507- Er^{3+} - Mg^{2+} -正己烷

图 12 不同有机相的红外光谱图与局部放大图

Fig. 12 FT-IR spectra of different organic phases and corresponding magnified views

表 2 红外光谱部分特征峰

Table 2 partial infrared spectrum characteristic peaks

特征峰/ cm^{-1}	无金属离子负载	负载 Er^{3+}	负载 $\text{Er}^{3+}+\text{Al}^{3+}$	负载 $\text{Er}^{3+}+\text{Mg}^{2+}$
P=O	1 195.99	1 195.12	1 195.28	1 193.29
P—O—H	981.50	981.74	980.86	980.62
	1 681.50	—	—	—

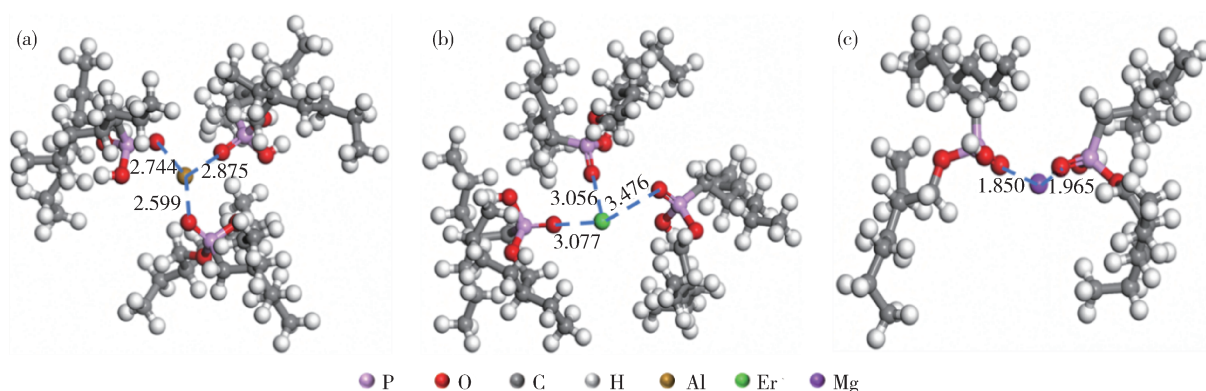
由图 12 可以看出, P—O 基团与 Er^{3+} 配位后, 其吸收峰从 $1\,195.99\,\text{cm}^{-1}$ 处向低波数移动, 表明 Er^{3+} 与 P—O 发生了配位, 导致电子云密度降低, 键能降低, 振动频率下降, 导致该特征峰发生红移。此外, 杂质离子也会与 P—O 及磷羟基发生作用。当有机相负载 Al^{3+} 时, P—O 吸收峰波数升高, 说明 Al^{3+} 与 P—O 形成的键能强于 Er^{3+} , 抑制有机相对铈的萃取^[35]。而在负载 Mg^{2+} 时, P—O 吸收峰波数下降, 表明有机相与 Er^{3+} 的键合比 Mg^{2+} 更强, 因此 Mg^{2+} 对铈萃取过程的干扰较小。这一键合强度顺序 ($\text{Al}^{3+} > \text{Er}^{3+} > \text{Mg}^{2+}$) 与它们的离子电位顺序高度一致。 Al^{3+} 具有最高的电荷和较小的离子半径, 因而离子电位最大, 与 P—O 基团中氧原子的电子云相互作用最强, 导致键合最强, 特征峰蓝移最显著; 而 Mg^{2+} 电荷低, 离子半径大, 离子电位最小, 因而键合最弱。无负载金属离子的有机相光谱中在 $1\,681.50\,\text{cm}^{-1}$ 处的特征吸收峰为氢键二聚体峰, 有机相负载金属离子后, 观察到该处的峰强度均显著降低并近乎消失, 表明稀土 Er^{3+} 的去水化作用取代了磷羟基中的氢, 减少了二聚体间氢键数量, 促进了稀土皂萃合物的形成, 致使该峰逐渐消失。此外, 在 $980\,\text{cm}^{-1}$ 处的特征吸收峰为 P—

O—H 的弯曲振动峰, 在负载 Er^{3+} 后该吸收峰的强度显著下降, 说明该基团中部分氢原子被取代, 有新基团生成。上述结果为深入理解不同金属离子与有机磷化合物之间的相互作用提供了理论依据。

2.6.3 DFT 分析

为更好验证上述实验结论, 运用 Materials Studio 软件, 采用其中的 Forcite 模块, 力场选用 COMPASS II, 对 P507 与 Al^{3+} 、 Er^{3+} 和 Mg^{2+} 之间的键合能力进行计算分析, 具体结果见图 13 和表 3。由图 13 和表 3 可知, P507 与 Al^{3+} 、 Er^{3+} 及 Mg^{2+} 之间的键合长度分别为 $2.74\,\text{\AA}$ 、 $3.20\,\text{\AA}$ 和 $1.91\,\text{\AA}$ 。P507 与 Al^{3+} 、 Er^{3+} 和 Mg^{2+} 的结合能分别为 -281.675 、 -269.408 、 $-253.514\,\text{kcal/mol}$ 。由以上结果可知, P507 与 Al^{3+} 、 Er^{3+} 和 Mg^{2+} 的亲合顺序为 $\text{Al}^{3+} > \text{Er}^{3+} > \text{Mg}^{2+}$ 。优先吸附 Al^{3+} , 导致 Er^{3+} 的萃取效率下降。

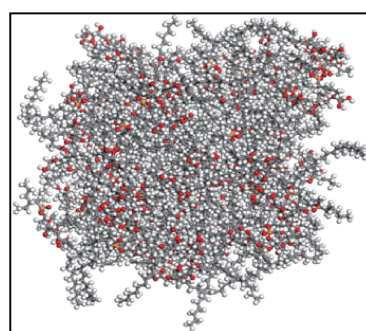
为了查明 Span 80 抑制乳化的机理, 将 50 个 Span 80 分子和 50 个 P507 分子放在设定体系中, 利用 Materials Studio 软件进行分子动力学模拟, 结果见图 14。图 14(a) 为设计模型, 即在溶液体系中放置 50 个 Span 80 和 50 个 P507 分子。图 14(b) 与 (c) 分别为设定体系中 Span 80—P507、P507—P507 和

图 13 P507 与 Al^{3+} (a)、 Er^{3+} (b) 和 Mg^{2+} (c) 结合的 DFT 分析Fig. 13 DFT analysis of the binding of P507 with Al^{3+} (a), Er^{3+} (b), and Mg^{2+} (c)表 3 P507 与 Al^{3+} 、 Er^{3+} 和 Mg^{2+} 的结合能Table 3 Binding energies of P507 with Al^{3+} , Er^{3+} , and Mg^{2+}

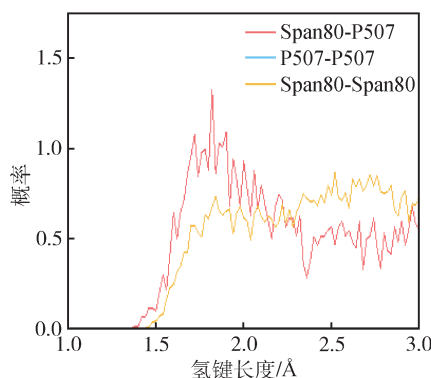
萃取剂	金属离子		
	Al^{3+}	Er^{3+}	Mg^{2+}
P507	-281.675	-269.408	-253.514

Span 80-Span 80 之间存在的氢键长度和氢键数量。由结果可知, Span 80 分子与 P507 分子在 50 ps 内平

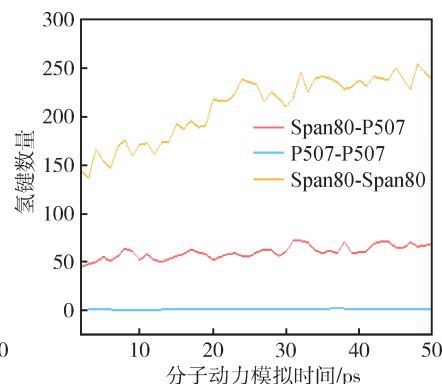
均形成 60 条氢键, 最短氢键长度 1.38 Å, 最长氢键长度 3.10 Å, 出现概率最大的氢键长度为 1.82 Å。Span 80 与 Span 80 在 50 ps 内平均形成 210 条氢键, 最短氢键长度 1.43 Å, 最长氢键长度 3.10 Å, 出现概率的最大氢键长度为 2.52 Å。正是由于 Span 80 分子与 P507 分子、Span 80 分子与 Span 80 分子之间形成了大量的氢键, 从而使得生成的反胶束或聚集体更稳定, 具有抵抗界面形变的能力, 进一步增强了界面的稳定性, 减少了乳化损失和溶解损失。



(a) P507 和 Span 80 的结构设定动力学拟合



(b) 溶液体系中分子的氢键键长统计与概率分布函数



(c) 溶液体系中分子的氢键数量

图 14 P507 与 Span 80 相互作用的 DFT 分析

Fig. 14 DFT analysis of the Interaction between P507 and Span 80

3 结论

针对液-液溶剂萃取低浓度稀土离子时存在的有机相溶解损失大、易乳化等问题, 本研究在 P507-煤油萃取体系中加入表面活性剂 Span 80 作为界面稳定剂, 系统分析水相 Er^{3+} 浓度、杂质离子 ($\text{Mg}^{2+}/\text{Al}^{3+}$) 浓度、操作温度及有机相循环使用次数等对 Er^{3+} 萃取性能和萃余液油含量的影响, 并根据微观

表征分析探究了 Span 80 在萃取体系中的作用机理, 得到以下主要结论。

1) 水相 Er^{3+} 浓度升高可降低油含量但萃取率略有下降。浓度由 50 mg/L 升至 1 000 mg/L 时, 因有机相负荷限制, 萃取率最低仍达 97.55%; 但高浓度 Er^{3+} 使水相 pH 降低、界面张力增大, 抑制萃取剂水解溶解, 油含量从 95.97 mg/L 显著降至约 14 mg/L。

2) 杂质离子 Mg^{2+} 与 Al^{3+} 对萃取体系影响截然

相反。适量 Mg^{2+} (0~40 mg/L) 发挥盐析效应, 破坏 Er^{3+} 水化层并抑制 P507 胶团形成, 使油含量降至 0.049 mg/L; 水解生成多核羟基络合物破坏界面稳定性, 导致萃取率下降、油含量升至 23.80 mg/L。

3) 适当升高温度有利于提升萃取率并抑制有机相流失。温度由 5℃ 升至 35℃ 时, 萃取率从 77.98% 提升至 99.77%, 油含量由 2.95 mg/L 降至 1.14 mg/L。升温可降低有机相黏度、加速传质, 同时有效避免低温条件下易发的相分离困难与乳化问题。

4) P507-Span 80-煤油体系具有优良的可重复使用性。有机相经 3 次反萃-再生-循环使用后, 萃取率仍稳定在 98% 以上, 反萃率维持在 96.93%~97.93%, 表明体系化学结构稳定。油含量虽因 Span 80 微量溶解从 3.88 mg/L 略升至 8.63 mg/L, 但整体仍处于较低水平, 具备工业循环应用潜力。

5) 通过 AFM、FTIR 及 DFT 分析发现, Span 80 能够优化界面分子排列并增强界面膜强度, 从而有效抑制乳化并减少有机相损失; 分子动力学模拟证实, Span 80 与 P507 之间及 Span 80 分子之间分别形成约 60 条和 210 条氢键, 密集氢键网络是抑制乳化、减少有机相损失的根本原因。

[参考文献]

- [1] Xue H Y, Lyu G Z, Wang L, et al. Review of rare earth extraction and product preparation technologies and new thinking for clean utilization [J]. *Minerals Engineering*, 2024, 215: 108796.
- [2] Lai Y B, Li J, Zhu S T, et al. Recovery of rare earths, lithium, and fluorine from rare earth molten salt electrolytic slag by mineral phase reconstruction combined with vacuum distillation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 310: 123105.
- [3] Chen Z Y, Li Z, Chen J, et al. Recent advances in selective separation technologies of rare earth elements: a review [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(1): 107104.
- [4] Salehi H, Maroufi S, Nekouei R K, et al. Solvent extraction systems for selective isolation of light rare earth elements with high selectivity for Sm and La [J]. *Rare Metals*, 2025, 44(3): 2071-2084.
- [5] Mohammed D, Mohanty S K, Allen M J, et al. From ash to oxides: Recovery of rare-earth elements as a step towards valorization of coal fly ash waste [J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 314: 123532.
- [6] Mory T, Gong A J, Wang Y W, et al. Research progress of rare earth separation methods and technologies [J]. *Journal of Rare Earths*, 2023, 41(2): 182-189.
- [7] 冯宗玉, 王猛, 赵龙胜, 等. 稀土元素萃取分离提纯技术发展现状与展望 [J]. *中国稀土学报*, 2021, 39(03): 469-478.
Feng Zongyu, Wang Meng, Zhao Longsheng, et al. Development status and prospect of rare earth element extraction, separation and purification technology [J]. *Chinese Journal of Rare Earths*, 2021, 39(3): 469-478.
- [8] Liu J, Jia M H, Song C Q, et al. Controllable enhancement of mass transfer kinetics related with the thickness of organic thin-layer liquid membrane on surface of gas bubble [J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2022, 172: 108775.
- [9] Liu J, Zhao Y X, Wang Z R, et al. Review on micro-mechanism of forming emulsification during rare earth extraction by acidic extractants [J]. *Journal of Rare Earths*, 2025, 43(1): 9-20.
- [10] 杨光, 王瑞娟, 张建强, 等. 阳离子双子表面活性剂凝聚相萃取分离甲基橙的研究 [J]. *轻工学报*, 2022, 37(2): 102-109.
Yang Guang, Wang Ruijuan, Zhang Jianqiang, et al. Study on the separation of methyl orange by cationic gemini surfactant coacervate extraction [J]. *Journal of Light Industry*, 2022, 37(2): 102-109.
- [11] Hussein M A, Mohammed A A, Atiya M A. Application of emulsion and Pickering emulsion liquid membrane technique for wastewater treatment: an overview [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(36): 36184-36204.
- [12] Shokri A, Daraei P, Zereskhi S. Water decolorization using waste cooking oil: An optimized green emulsion liquid membrane by RSM [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 33: 101021.
- [13] Norul F M N, Norela J, Norasikin O, et al. Development of stable green emulsion liquid membrane process via liquid-liquid extraction to treat real chromium from rinse electroplating wastewater [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2018, 66: 231-241.
- [14] León L, León G, Senent J, et al. Optimization of Copper Removal from Aqueous Solutions Using Emulsion Liquid Membranes with Benzoylacetone as a Carrier [J]. *Metals*, 2017, 7(1): 19.
- [15] Liu J, Zhang X, Zhang N, et al. Preventing emulsification during rare earths solvent extraction by the addition of Span 80 to enhance the interfacial stability of the P507 oil droplets [J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 354 (P2): 128755.
- [16] 张秋露, 刘杰, 王志荣, 等. Span 80-P507 体系萃取稀土防止乳化试验研究 [J]. *湿法冶金*, 2025, 44(3): 388-397.
Zhang Qiulu, Liu Jie, Wang Zhirong, et al. Experimental study on the extraction of rare earths by Span 80-P507 system to prevent emulsification [J]. *Hydrometallurgy*, 2025, 44(3): 388-397.

- [17] Su W R, Chen J, Jing Y. Aqueous Partition Mechanism of Organophosphorus Extractants in Rare Earths Extraction [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2016, 55(30): 8424-8431.
- [18] Sun X X, Liu Z N, Yang W M, et al. Solvent extraction of molybdenum (VI) from spent hydroprocessing catalyst [J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2019, 38(5): 13169.
- [19] Taichi S. The extraction of uranyl nitrate by tributyl phosphate in the presence of some nitrate salting-out agents[J]. Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry, 1960, 16(1-2): 156-158.
- [20] 欧家才, 张天锡, 黄李金鸿, 等. 轻稀土离子水合物 $\text{Re}^{3+}(\text{H}_2\text{O})_n$ ($n=1\sim 12$, $\text{Re}=\text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}$) 的 DFT 研究[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(1): 206-217.
Ou Jiakai, Zhang Tianxi, Huang Lijinhong, et al. DFT study of light rare earth ionic hydrate $\text{Re}^{3+}(\text{H}_2\text{O})_n$ ($n=1\sim 12$, $\text{Re}=\text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}$). [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(1): 206-217.
- [21] Yizhak M. ChemInform Abstract: Effect of Ions on the Structure of Water: Structure Making and Breaking [J]. ChemInform, 2009, 40(22).
- [22] 隋娜, 苗书凯, 崔凯辉, 等. 非平衡态萃取分离相邻重稀土 Er 和 Tm [J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(1): 149-159.
Sui Na, Miao Shukai, Cui Kaihui, et al. Non-equilibrium extraction separated adjacent heavy rare earths Er and Tm [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(1): 149-159.
- [23] 王笃金, 吴瑾光, 李彦, 等. 萃取剂流失机理的研究——I. 皂化酸性有机磷酸酯类萃取剂从有机相向水相的转移及其在水相的聚集状态[J]. 中国科学(B辑 化学 生命科学 地学), 1995(5): 449-453.
Wang Dujin, Wu Jingguang, Li Yan. Study on the mechanism of extractant loss——I. transfer of saponified acidic organophosphate extractants from the organic phase to the aqueous phase and its aggregation state in the aqueous phase [J]. Science in China (Series B, Chemistry, Life Sciences, Earth Science), 1995(5): 449-453.
- [24] Hidayah N N, Abidin Z S. The evolution of mineral processing in extraction of rare earth elements using liquid-liquid extraction: A review [J]. Minerals Engineering, 2018, 121: 146-157.
- [25] Zhao X X, Cui K H, Huang K. Enhanced interfacial salt effect on extraction and separation of Er(III) from Mg(II), Al(III), Fe(III) sulfate aqueous solutions using bubble-supported organic liquid membrane [J]. Separation and Purification Technology, 2022, 285: 120344.
- [26] 李通, 崔凯辉, 隋娜, 等. 基于共存阳离子竞争吸附的稀土萃取过程界面盐效应[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(12): 4201-4213.
Li Tong, Cui Kaihui, Sui Na, et al. Interfacial salt effect in rare earth extraction process based on coexisting cation competitive adsorption [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(12): 4201-4213.
- [27] Gao S Y, Zeng Z Y, GAO Y, et al. Separation of aluminum from rare earth by solvent extraction with 4-octyloxybenzoic acid [J]. Journal of Rare Earths, 2023, 41(2): 290-299.
- [28] Balinski A, Kelly N, Helbig T, et al. Separation of aluminum and iron from lanthanum—A Comparative Study of Solvent Extraction and Hydrolysis-Precipitation [J]. Minerals, 2020, 10(6): 556.
- [29] 潜美丽. 铝对P507体系萃取稀土元素的影响[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
Qian Meili. Effect of aluminum on rare earth extraction in P507 system[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.
- [30] 谢跃生. 铝盐水解、聚合行为分析[J]. 广西师院学报(自然科学版), 1994(1): 32-37.
Xie Yuesheng. Analysis of aluminum salt hydrolysis and polymerization behavior [J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 1994(1): 32-37.
- [31] Phillips L B, Casey H W, Karlsson M. Bonding and reactivity at oxide mineral surfaces from model aqueous complexes [J]. Nature, 2000, 404(6776): 379-382.
- [32] 张晓峰. 铁、铝、硅对P227萃取稀土过程的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017.
Zhang Xiaofeng. Effects of iron, aluminum and silicon on the extraction process of rare earths from P227 [D]. Guiyang: Guizhou University, 2017.
- [33] Mahbooneh N, Ali K, Mansoor S. Pertraction of vanadium (V) from dilute acidic media by an emulsion liquid membrane containing a commercial extractant[J]. Chemical Engineering & Technology, 2022, 45(4): 572-584.
- [34] 蓝桥发. P507-N235萃取分离稀土工艺研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2014.
Lan Qiaofa. P507-N235 extraction and separation process of rare earths [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2014.
- [35] 马驰远. 复杂铵盐浸出液中杂质离子对稀土萃取行为的影响研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2020.
Ma Chiyuan. The effect of impurity ions in complex ammonium salt leachate on the extraction behavior of rare earths [D]. Wuhan: Wuhan University of Engineering, 2020.

Mechanism of emulsification inhibition of Span 80 in P507-kerosene extraction rare earth system

Li Qianting, Liu Jie, Zhang Jiaqi, Gao Li, Wang Zhirong, Wu Guizhi, Tang Yizhen

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266000, China)

Abstract: When using liquid-liquid solvent extraction to directly separate low-concentration rare earth ions from leachate, there are problems such as high organic phase dissolution loss and easy emulsification, resulting in a large amount of oily wastewater. In this study, the surfactant Span 80 was added as an interfacial stabilizer in the P507-kerosene extraction system, and the effects of aqueous Er^{3+} concentration, impurity ion ($\text{Mg}^{2+}/\text{Al}^{3+}$) concentration, operating temperature, and the number of organic phase recycling times on Er^{3+} extraction performance and oil content in the raffinate were systematically analyzed. The results show that under optimal conditions, the Er^{3+} extraction rate reached 99.77%, and the oil content in the raffinate was as low as 1.14 mg/L. After three cycles of organic phase reuse, the extraction rate was still above 98%, indicating that this stabilizer significantly improves the reusability and stability of the organic phase. AFM, FTIR and DFT analyses revealed that Span 80 can optimize the molecular arrangement at the interface and enhance the interfacial film strength, thereby effectively suppressing emulsification and reducing organic phase loss. Increasing the Er^{3+} concentration or introducing an appropriate amount of salting-out agent Mg^{2+} can reduce the oil content in the raffinate, whereas Al^{3+} , due to hydrolysis to form polynuclear hydroxy complexes, can destroy the interface, resulting in decreased extraction rate and increased oil content.

Key words: P507; Span 80; rare earth ions Er^{3+} ; extraction efficiency; oil content; interfacial tension

神火股份上半年预计净利润48亿元同比增长152.04%

近日,河南神火煤电股份有限公司(以下简称“神火股份”)发布公告,预计2026年上半年归属于上市公司股东的净利润为48亿元,同比增长152.04%;扣除非经常性损益后的净利润为48.06亿元,同比增长139.10%,公司盈利能力大幅增强。

公告称,报告期内,受电解铝、煤炭产品售价同比上涨、主要原材料氧化铝价格同比下降等因素影响,该公司盈利能力大幅增强,保持了强劲且稳健的发展势头。

亮眼成绩的背后,是该公司深耕主业、提质增效的扎实成效。下一步,神火股份将持续优化产业布局,深挖内部创效潜能,不断巩固核心竞争优势,以优异业绩回馈广大投资者与社会各界的信任与支持。

(资料来源:中国有色金属报)