

冶炼工艺

引文格式:王露瑶,张一敏,薛楠楠,等.离心萃取分离钒页岩酸浸液中钒铁的研究[J].中国有色冶金,2024,53(4):41-47.
WANG Luyao, ZHANG Yimin, XUE Nannan, et al. Study on separation of vanadium and iron from black shale acid leaching solution by centrifugal extraction[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024, 53(4): 41-47.

离心萃取分离钒页岩酸浸液中钒铁的研究

王露瑶^{1,2,3}, 张一敏^{1,2,3,4}, 薛楠楠^{1,2,3}, 胡鹏程^{1,2,3}, 陈亚宝¹

1. 武汉科技大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081;
2. 国家环境保护矿冶资源利用与污染控制重点实验室, 湖北 武汉 430081;
3. 战略钒资源利用省部共建协同创新中心, 湖北 武汉 430081;
4. 湖北省页岩钒资源高效清洁利用工程技术研究中心, 湖北 武汉 430081)

[摘要] 离心萃取法是通过高速转动提高两相间的传质,并利用离心力场来实现两相快速分离的萃取方法。为提高萃取剂对钒(V)的萃取效率,强化V(IV)与Fe(II)的分离效果,本研究将离心萃取法应用于钒页岩酸浸液中钒的净化富集工艺。结果表明,在萃原液初始pH值2.0、有机相组成15 vol.% P204 + 85 vol.% 磺化煤油、相比(O/A)1:4、萃取时间4 min、萃取温度45 °C、转速1400 r/min的离心萃取条件下,V萃取率为87.67%。与常规萃取相比,离心萃取使V/Fe分离系数由41.78提升至127,钒的萃取饱和容量由52.63 g/L提升至70.45 g/L,表明离心萃取可有效强化钒铁分离效果,并提高钒的萃取饱和容量。

[关键词] 钒页岩酸浸液; 离心萃取; 常规萃取; 钒; V/Fe分离

[中图分类号] TF841.3 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2024)04-0041-07

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2024.04.005

0 引言

钒在航空航天、医药、全钒液流电池储能和国防工业等领域有着重要作用,是一种重要的金属资源^[1-2]。其中,钒页岩作为一种低品位多金属共生矿,是一种重要的含钒资源,储量丰富。在我国,钒页岩中的钒储量占总钒储量的87%^[3]。

目前,对于钒页岩提钒工艺所得的含钒浸出液主要采用溶剂萃取和离子交换两种工艺实现钒与杂质的分离富集。其中,溶剂萃取法具有稳定性强、富集比高、操作方便、易实现大规模连续化生产等优点,较为广泛用于钒页岩提钒的工业生产中^[4-5]。在含钒浸出液的工业萃取工艺中常选择二(2-乙基己基)磷酸酯(P204)作为萃取剂,达到钒的富集且与杂质分离的目的^[6-7]。但是,P204对Fe(III)与V(V)的选择性较差,因此,为了避免Fe(III)的共萃,通常采用添加过量还原剂的方式,使Fe(III)还原成Fe(II),降低Fe的萃取率^[8]。

为提高有价元素的萃取率,有学者将离心力场引入到萃取工艺中。在离心萃取工艺中可通过转筒的高速转动并利用液体间表面剪切力使两相混合传质,随着转筒的转速增大,层流涡逐渐过渡成为湍流

[收稿日期] 2024-01-26

[第一作者] 王露瑶(1993—),女,湖北荆门人,博士,研究方向为湿法冶金。

[通信作者] 张一敏(1954—),男,河南许昌人,教授,博士研究生导师,研究方向为湿法冶金。

[基金项目] 国家重点研发计划项目(2020YFC1909700);湖北省科技创新人才及服务专项项目(2022EJD002)。

泰勒漩涡,相邻旋涡界面出现交叉,两相传质系数提高,二次流返混加强,提高萃取效率^[9-10]。同时,在离心力的作用下两相快速分开,密度较大的水相被甩至转筒壁面,密度较小的有机相则位于转筒的中心处,从而分离两相^[10]。因此,离心萃取工艺具有萃取时间短、萃取饱和容量高、快速分相等优点,被广泛应用于生物制药、石油提炼、金属提纯、污水处理等领域^[10-12]。郭利等^[10]利用离心萃取工艺从地下卤水中回收硼,萃取剂饱和容量可达 72.59 g/L,相较于传统的萃取工艺提升了 40.41%。师苏城等^[13]研究了 CML-M 型离心萃取机对含钒溶液中钒的萃取效果,结果表明,以 P507 为萃取剂,在离心萃取机转速 2 800 r/min、相比 O/A = 2/1 的条件下,经过五级逆流萃取,钒萃取率可达 99.5% 以上。离心萃取具有萃取效率高、有机相损失少、分相快等优点,对提高萃取剂的饱和容量及选择性具有一定的效果,因此本研究将离心萃取工艺应用于钒页岩酸浸液净化富集工艺流程之中。

本文以钒页岩酸浸液作为研究对象,基于 P204-磺化煤油体系,采用离心萃取工艺,开展了萃原液初始 pH 值、有机相组成、相比(O/A)、萃取温度、转速等主要工艺参数对钒、铁萃取率的影响研究,根据 V、Fe 萃取率和饱和容量的差异比较离心萃取与常规萃取的效果。

1 试验介绍

1.1 试验原料和试剂

试验过程中所用水相为湖北省安陆市某钒页岩矿床的硫酸浸出液。酸浸液经调 pH 值、还原预处理后得到萃取工艺中所需的萃原液,其主要元素组成如表 1 所示。试验过程中所用药剂规格均为分析纯。

表 1 萃原液的主要元素组成和浓度

Table 1 The main element composition and concentration of the extraction solution g/L

| 元素 | V | Fe | Al | Ca | K | Mg | Na |
|----|------|------|------|------|-----|------|------|
| 浓度 | 1.54 | 3.32 | 3.87 | 0.59 | 1.5 | 2.38 | 2.70 |

1.2 试验方法

试验过程中,所用离心萃取设备结构如图 1 所示。在离心萃取过程中,设置蠕动泵流量为 20 mL/min,主要考察萃原液初始 pH 值、转速、反应温度和相比等参数对钒、铁萃取效果的影响。萃原液

与萃取剂按照一定的相比分别从重相、轻相进料口进入,通过转筒高速旋转 4 min 后,完成混合分离。分离得到的萃余液和负载有机相分别从重相出口及轻相出口流出,并测定萃余液中 V、Fe 的含量,计算 V、Fe 的萃取率。萃原液 pH 值、相比等参数与常规萃取相同,反萃通过磁力搅拌器进行。

萃取率 $E_V(E_{Fe})$ 、V/Fe 分离系数 β 分别用式(1)、(2)进行计算。

$$E_V(E_{Fe}) = \frac{W_{原} - W_{余}}{W_{原}} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{D_V}{D_{Fe}} = \frac{[\sum V]_O [\sum Fe]_A}{[\sum V]_A [\sum Fe]_O} \quad (2)$$

式中: $W_{原}$ 和 $W_{余}$ 分别表示酸浸液和萃余液中的 V (IV) 离子或 Fe 离子总量, mol; D_V 、 D_{Fe} 分别表示钒和铁的分配系数; $[\sum V]_O$ 、 $[\sum V]_A$ 分别表示钒在有机相(O)、水相(A)中的总浓度, g/L; $[\sum Fe]_O$ 、 $[\sum Fe]_A$ 分别表示铁在有机相(O)、水相(A)中的总浓度, g/L。

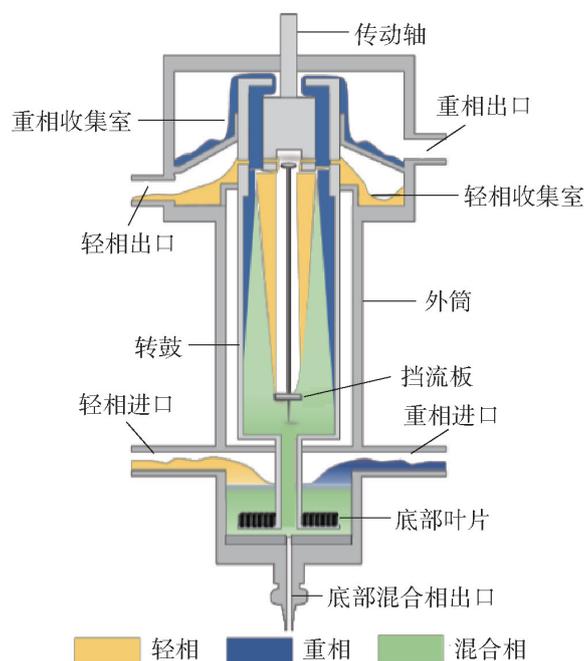
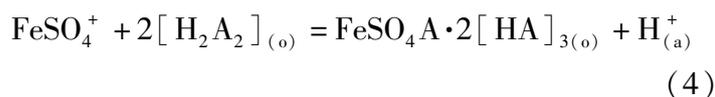


图 1 离心萃取设备结构图

Fig. 1 Centrifugal extraction structure

萃取过程发生的反应如式(3)和(4)所示^[14-15]。反应式中, H_2A_2 表示 P204 萃取剂; 右下角(a)、(o)分别表示水相、有机相。



2 结果与讨论

2.1 有机相的组成及 P204 用量对 V 萃取率的影响

在萃原液初始 pH 值 2.0、萃取温度 45 °C、相比 (O/A = 1:4)、萃取时间 4 min、转速 1 400 r/min 的条件下,考察相调节剂的添加对钒萃取效果的影响。三种不同的有机相体积比组成为:(I) 15% P204 + 5% 仲辛醇 + 80% 磺化煤油;(II) 15% P204 + 5% TBP + 80% 磺化煤油;(III) 15% P204 + 85% 磺化煤油。试验结果如图 2(a) 所示。

由图 2(a) 可知,选用离心萃取工艺时,体系 II、III 对钒的萃取效果一致,萃取率均为 87.67%,即是否添加相调节剂 TBP,对钒的萃取率没有影响。但是,在添加仲辛醇的体系 I 中,V 萃取率为 86%,略低于未添加仲辛醇的体系 III 对钒的萃取率。离心萃取过程中,滚筒的高速转动能使流体能产生稳定的轴向运动,传质效果较强,能将两相充分混合,无

需通过相调节剂的添加改善萃取体系的黏度。在常规萃取工艺中,未添加相调节剂的有机体系 III 中 V 萃取率仅为 83.25%。因此,选择离心萃取工艺,可以改善两相间的传质,提高钒的萃取效率。

在不添加相调节剂的 P204 + 磺化煤油有机相组成中进一步考察 P204 用量对钒萃取率的影响,试验结果如图 2(b) 所示。由图 2(b) 可知,V 的萃取率随着有机相中 P204 用量增加而增加。在离心萃取工艺中,当 P204 的体积比用量由 15% 增加至 40% 时,V 萃取率由 87% 提升至 93.84%。同时,在 P204 用量相同的条件下,常规萃取工艺所得的 V 萃取率始终低于离心萃取工艺中的 V 萃取率。但是,当有机相中 P204 浓度过高时,有机相的黏度增大会降低液液传质效果减弱,同时,易将其他杂质离子共萃进入负载有机相,影响钒产品的纯度。因此,综合考虑选择 15% P204 + 85% 磺化煤油作为离心萃取的有机相。后续可通过增多级数来提高萃取率,并

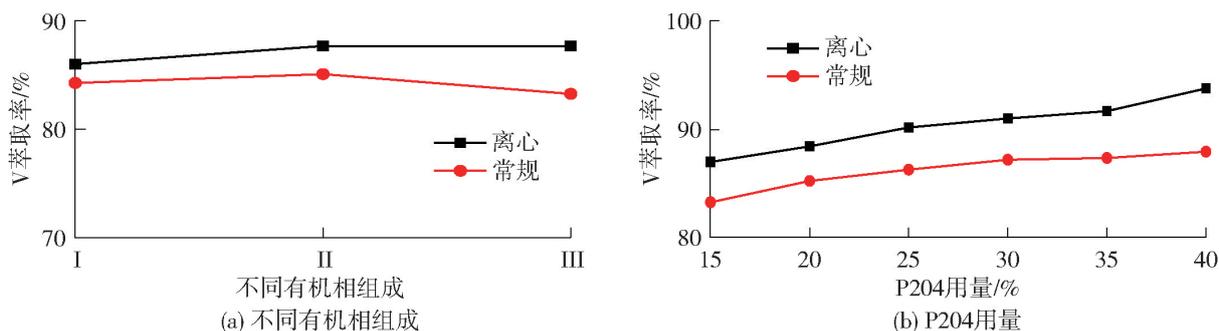


图 2 不同有机相组成及 P204 用量对 V 萃取率的影响

Fig. 2 Effect of composition of different organic phases and dosage of P204 on V extraction

达到降低成本的目的。

2.2 转速对钒铁萃取率的影响

在萃原液初始 pH 值 2.0、有机相体积比组成

15% P204 + 85% 磺化煤油、萃取温度 45 °C、O/A 1:4、萃取时间 4 min 的条件下,考察转速对 V、Fe 萃取率及分离系数的影响,试验结果见图 3。

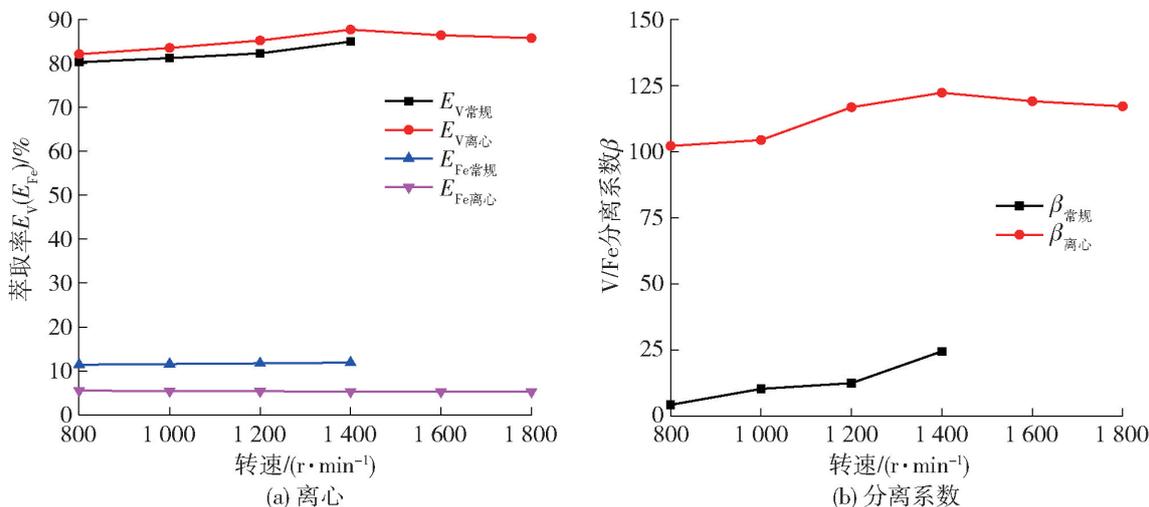


图 3 转速对 V、Fe 萃取的影响

Fig. 3 Effect of the rotating speed on the V and Fe extraction

当转速大于 1 400 r/min 时,常规萃取运行不稳定,因此,常规萃取工艺中仅考虑转速不高于 1 400 r/min 的常规萃取效果。由图 3 可知,在常规萃取工艺中,随着转速升高,V 萃取率呈缓慢上升趋势。同时,萃取过程中,部分 Fe(II) 会再次与氧气发生氧化反应,氧化为 Fe(III),Fe 被萃取进入负载有机相中;然而,转速增加对 Fe 萃取率的影响不明显。在转速为 1 400 r/min 时,V、Fe 萃取率分别为 84.93%、11.9%,此时,钒铁分离效果最佳。

但是,在相同转速条件下,离心萃取工艺所得 V 萃取率高于常规萃取工艺中 V 萃取率,V 与 Fe 分离系数也高于常规萃取工艺中 V、Fe 分离系数,表明

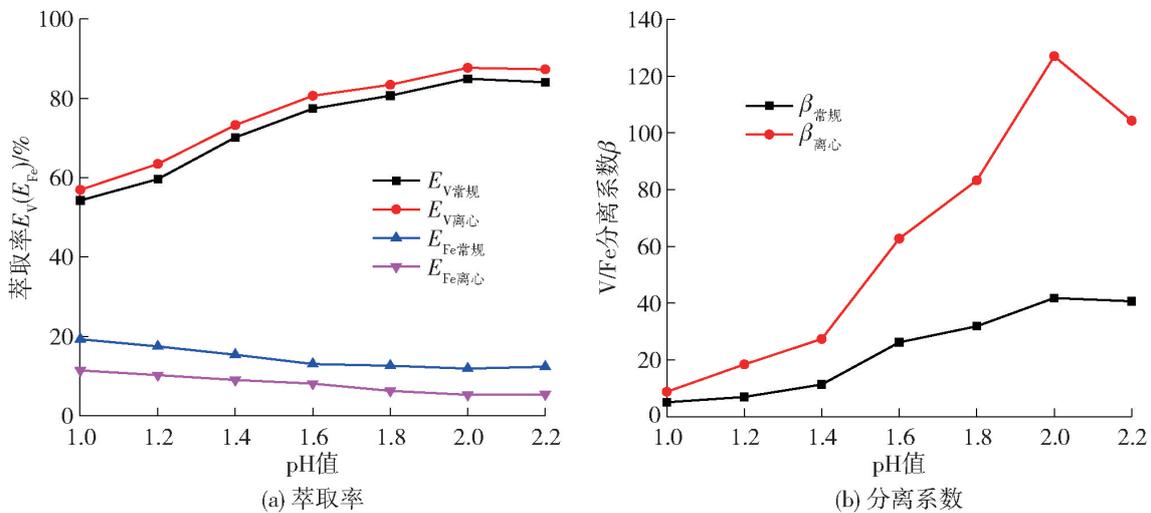


图 4 pH 值对 V、Fe 萃取的影响

Fig. 4 Effect of the pH on the V and Fe extraction

由图 4 可知,随着萃原液初始 pH 值的增大,V 萃取率呈现出先增大后减小的趋势,Fe 萃取率呈先减小后增大的趋势。同时,在萃原液初始 pH 值相同的条件下,离心萃取工艺中所得的 V 萃取率高于常规萃取工艺中 V 萃取率,而 Fe 萃取率低于常规萃取工艺中 Fe 萃取率。萃取过程中,P204 萃取剂分子中的 H^+ 与金属阳离子间发生阳离子反应,随着萃取反应的进行,水相中 H^+ 浓度增加,溶液的 pH 值降低,金属阳离子的萃取反应受到抑制^[16]。因此,在萃原液初始 pH 值为 1.0 ~ 2.0 时,随着 pH 值的增大,溶液中初始 H^+ 浓度降低,有利于萃取反应正向进行,提高 V、Fe 萃取率。但是,继续增大萃原液初始 pH 值时,部分金属离子会水解生成沉淀,导致有机相乳化,使得 V 萃取率降低。当萃原液初始 pH 值为 2.0 时,常规萃取与离心萃取中 V 萃取率达到最大值,分别为 84.93%、87.67%;Fe 萃

在离心萃取工艺中,V 与 Fe 有更好的分离效果。但是,在离心萃取中,随着转速增大,V、Fe 萃取率呈现先增加后减小的趋势,这是由于随着转速的增大,泰勒涡流逐渐趋向规则化,流场中出现轴向传质。因此,为保证萃取率和分相性能,后续离心萃取工艺与常规萃取工艺均选择转速为 1 400 r/min。

2.3 萃原液初始 pH 值对钒铁萃取率的影响

在有机相体积比组成 15% P204 + 85% 磺化煤油、温度 45 °C、O/A 1:4、萃取时间 4 min、转速 1 400 r/min 的条件下,考察萃原液初始 pH 值对 V、Fe 萃取率及分离系数的影响,结果如图 4 所示。

取率为最小值,分别是 11.9%、5.3%;V/Fe 分离效果最佳,分离系数分别为 41.78、127。因此,后续研究中选择萃原液初始 pH 值为 2.0。

2.4 相对对钒铁萃取率的影响

在萃原液初始 pH 值 2.0、有机相体积比组成 15% P204 + 85% 磺化煤油、温度 45 °C、萃取时间 4 min、转速 1 400 r/min 的条件下,考察相比(O/A)对 V、Fe 萃取率及分离系数的影响,结果见图 5。

由图 5 可知,相比相同时,采用离心萃取工艺时,V 萃取率更高。但是,无论是在离心萃取工艺中,还是常规萃取工艺中,V、Fe 分离系数均随着相比的增大,呈现先增大后减小的趋势。当相比为 1:4 时,V、Fe 分离系数均达到最大值,钒铁分离效果最佳。同时,在离心萃取工艺中,当相比为 1:4 时,V 萃取率为 87.67%,继续增大相比,对 V 萃取率的增加影响不大。由于过高相比导致萃取剂的利用率

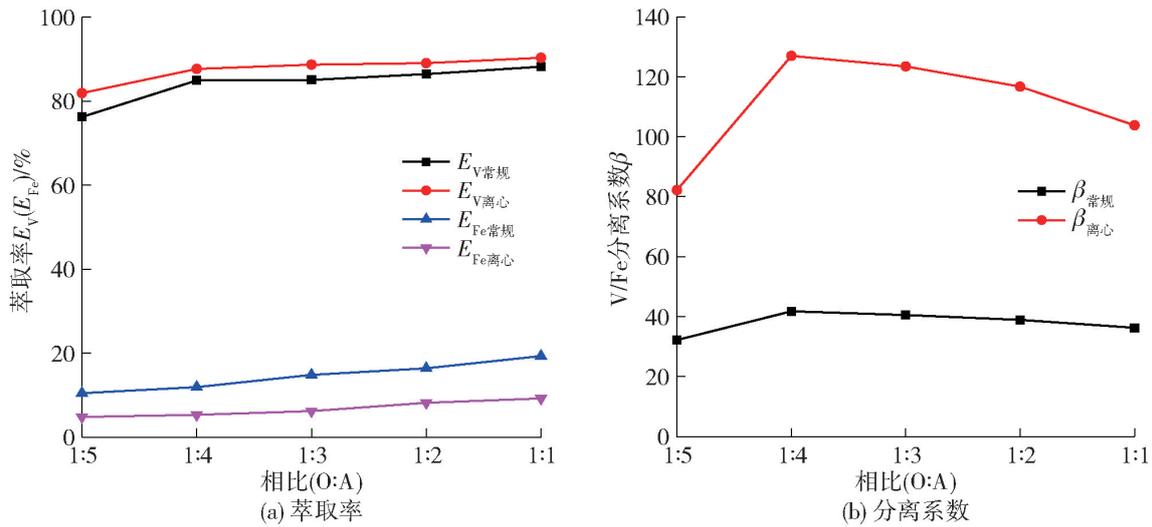


图5 相对对 V、Fe 萃取的影响

Fig. 5 Effect of the phase ratio on the V and Fe extraction

低,且 V 富集比降低,因此,在后续研究中选择相比为 1:4。

2.5 温度对钒铁萃取率的影响

在萃原液初始 pH 值 2.0、有机相体积比组成 15% P204 + 85% 磺化煤油、O/A 1:4、萃取时间 4 min、转速 1 400 r/min 的条件下,考察温度对 V、Fe 萃取率及分离系数的影响,结果如图 6 所示。

由图 6 可知,无论是在离心萃取还是常规萃取中,V 萃取率及 V、Fe 分离系数均随温度升高呈现出先增大后减小的趋势。当萃取温度为 45 °C 时,离心萃取和常规萃取工艺中 V 萃取率和 V、Fe 分离系数均达到最大值,此时,V、Fe 分离系数分别为 127、41.78。升高温度有利于两相间传质,提高 V 萃取率;但是进一步升高萃取温度时,溶液中 Fe^{2+} 被氧化成 Fe^{3+} , Fe^{3+} 优先与 P204 反应,导致 V 萃取率下降,而 Fe 萃取率升高;同时,随着温度升高,也易造成有机相在高温挥发,导致有机相损失。因此,本研

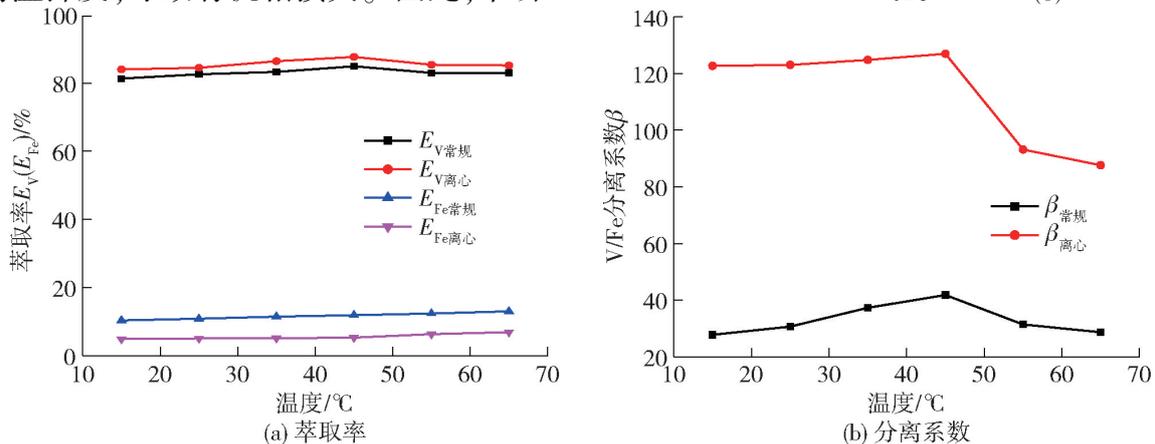


图6 温度对 V、Fe 萃取的影响

Fig. 6 Effect of temperature on the V and Fe extraction

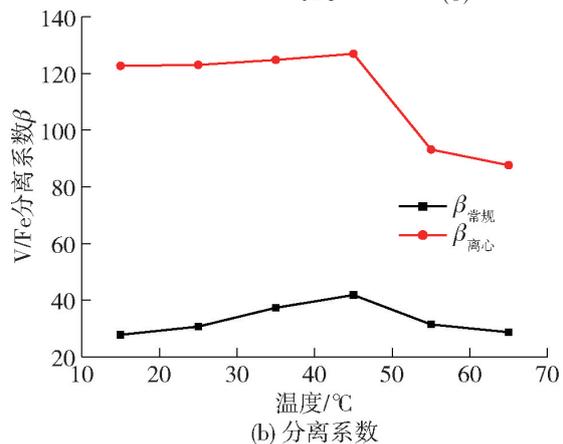
究中,适宜的萃取温度为 45 °C。

由上述研究可知,最佳萃取工艺参数为萃原液液初始 pH 值 2.0、有机相体积比组成 15% P204 + 85% 磺化煤油、萃取温度 45 °C、相比(O/A) 1:4、萃取时间 4 min、转速 1 400 r/min。

2.6 萃取工艺对 V 萃取饱和容量的影响

由上述工艺研究可知,相同试验条件下,同常规萃取工艺相比,离心萃取工艺具有更高的 V 萃取率和更好的 V、Fe 分离效果。因此,在上述最佳工艺参数下,对比了常规萃取、离心萃取工艺中的有机相对钒的饱和萃取容量(M),计算方法如公式(5)所示。即,取一定量的有机相不断与新鲜萃原液进行萃取反应,直到所得萃余液中的钒离子浓度不再发生变化则停止实验。对每一级的萃余液取 2 mL 进行滴定,萃取结果如图 7 所示。

$$M = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{(C_0 - C_i) V_{(a)}}{V_{(o)}} \quad (5)$$



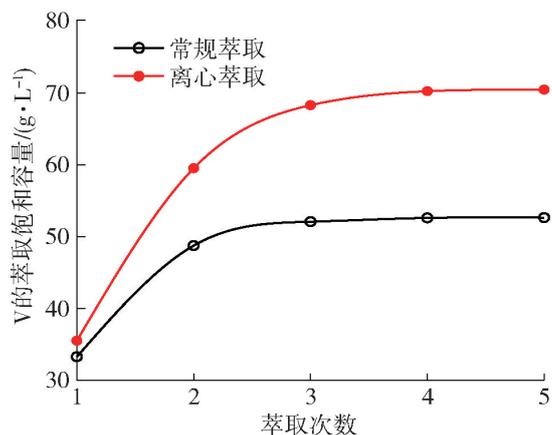


图7 不同萃取工艺对V萃取饱和容量的影响

Fig.7 Effect of different flow fields on the extraction saturation capacity of V

式中： i 表示萃取次数； C_0 表示萃原液中的初始钒浓

度，g/L； C_i 表示第*i*次萃取后萃余液中的剩余钒浓度，g/L； $V_{(a)}$ 和 $V_{(o)}$ 分别表示萃原液和有机相的体积，L。

由图7和表2可知，离心萃取工艺中，萃取剂对V的萃取容量为70.45 g/L，而常规萃取工艺中，萃取剂对V的萃取容量仅为52.63 g/L。离心萃取工艺中，由于转子的高速旋转使得转子内部中心产生柱状的真空气穴，气体在环隙上部分区域，而两相混合液在环隙下部分区域^[9, 17]，降低了Fe(II)被氧化成Fe(III)的氧化率，使得Fe萃取率降低。同时，由于在离心萃取工艺中，V萃取率提高，V(IV)优先占据了更多的P204反应位点，这也可导致Fe萃取率降低。因此，同常规工艺相比，离心萃取工艺中Fe萃取率低，V与Fe的分离效果更好。

表2 萃原液在不同萃取工艺中的萃取效果

Table 2 Extraction effect of extraction solution in different flow fields

| 萃取工艺 | 温度/℃ | 有机相组成 | 相比 (O/A) | pH值 | 时间/ min | V萃取容量/ (g·L ⁻¹) | V/Fe 分离系数 | 一级V萃 取率/% | 一级Fe萃 取率/% |
|------|------|---------------------|-------------|-----|------------|--------------------------------|--------------|--------------|---------------|
| 离心萃取 | 45 | 15% P204 + 85% 磺化煤油 | 4:1 | 2.0 | 4 | 70.45 | 127 | 87.67 | 5.3 |
| 常规萃取 | 45 | 15% P204 + 85% 磺化煤油 | 4:1 | 2.0 | 4 | 52.63 | 41.78 | 84.93 | 11.9 |

3 结论

本文研究了离心萃取工艺对钒页岩酸浸还原液中钒的萃取效果，并比较了常规萃取与离心萃取工艺分离钒铁的效果，确立了离心萃取的最佳萃取参数。试验结果表明，在较高转速下，离心萃取对强化两相传质效果有着显著效果。

1) 同常规萃取相比，离心萃取强化了传质，钒萃取饱和容量由52.63 g/L提升至70.45 g/L。同时，在离心萃取工艺中，Fe萃取率由11.9%降低至5.3%，V/Fe分离系数由41.78提升至127。采用离心萃取工艺处理钒页岩酸浸液不仅能提高钒的萃取容量，提高P204萃取剂的使用效率，还能强化钒铁分离效果。

2) 在萃原液初始pH值2.0、有机相体积比组成15% P204 + 85% 磺化煤油、萃取温度45℃、相比(O/A)1:4、萃取时间4 min、转速1400 r/min的条件下，采用离心萃取工艺时，V萃取率可达87.67%。在相同参数条件下，采用磁力搅拌进行常规萃取时，钒萃取率为84.93%。与常规萃取工艺相比，离心萃取工艺能获得更高的V萃取率。

[参考文献]

[1] 周冰晶, 李兰杰, 祁健, 等. 钒的应用研究[J]. 陕西冶金,

2022(9): 58-59.

ZHOU Bingjing, LI Lanjie, QI Jian, et al. Study on the application of vanadium[J]. Shanxi Metallurgy, 2022(9): 58-59.

[2] 陈亚西, 王向阳, 张旭, 等. 高纯五氧化二钒应用及制备概况[J]. 安徽化工, 2022, 48(5): 1-5.

CHEN Yaxi, WANG Xiangyang, ZHANG Xu, et al. Application and preparation development of high-purity vanadium pentoxide[J]. Anhui Chemical Industry, 2022, 48(5): 1-5.

[3] LI W, MA C, GONG W, et al. Clean production technology for effective recovery of vanadium from shale: Interaction between activators and vanadium-loaded minerals[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 315: 128170.

[4] 何野, 黄晶, 张一敏, 等. Mextral 984H从页岩提钒浸出液中萃取V(V)的研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(10): 33-38.

HE Ye, HUANG Jing, ZHANG Yimin, et al. Extraction of vanadium(V) from shale leaching solution with Mextral 984H[J]. Nonferrous Metals (Extractive metallurgy), 2019(10): 33-38.

[5] TAVAKOLI M R, DREISINGER D B. Separation of vanadium from iron by solvent extraction using acidic and neutral organophosphorus extractants[J]. Hydrometallurgy, 2014, 141: 17-23.

[6] MA Y, WANG X, WANG M, et al. Separation of V(IV) and Fe(III) from the acid leach solution of stone coal by D2EHPA/TBP[J]. Hydrometallurgy, 2015, 153: 38-45.

[7] LI X, DENG Z, WEI C, et al. Solvent extraction of vanadium from a stone coal acidic leach solution using D2EHPA/TBP: Continuous testing[J]. Hydrometallurgy, 2015, 154: 40-46.

- [8] 彭科波,高利坤,饶兵,等. 钒资源现状及有机磷类萃取剂萃钒的研究进展[J]. 工程科学学报, 2021, 43(5): 603-611.
PENG Kebo, GAO Likun, RAO Bing, et al. Current status of vanadium resources and research progress on vanadium extraction with organic phosphorus extractants [J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(5): 603-611.
- [9] 苏以刚. 环隙式离心萃取器结构参数对萃取效率的影响[D]. 天津: 天津大学, 2021.
SU Yigang. Effect of geometrical parameters on extraction efficiency of the annular centrifugal contactor [D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [10] 郭利. 地下卤水中硼的离心萃取提取工艺[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
GUO Li. Extraction of boron using centrifugal extraction technique from underground brine [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [11] 程海梅, 资双飞, 高学兰, 等. 离心萃取油莎豆油脱酸的工艺[J]. 食品工业, 2020, 41(9): 76-80.
CHENG Haimei, ZI Shuangfei, GAO Xuelan, et al. Deacidification technology of crude cyperus esculentus oil by centrifugal extraction [J]. Food Industry, 2020, 41(9): 76-80.
- [12] 朱碧肖, 陈崔龙, 张德友. 离心式溶剂萃取新技术及在有色行业的应用[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(8): 39-44.
ZHU Bixiao, CHEN Cuilong, ZHANG Deyou. New technology of centrifugal solvent extraction and Its application in nonferrous industry [J]. Nonferrous Metals (Extractive metallurgy), 2022(8): 39-44.
- [13] 师苏城, 高艳芳, 李瑞琛, 等. 新型离心萃取机在钒萃取中的应用[J]. 安徽化工, 2022, 48(4): 76-78.
SHI Sucheng, GAO Yanfang, LI Ruichen, et al. Application of a new centrifugal extractor in vanadium extraction [J]. Anhui Chemical Industry, 2022, 48(4): 76-78.
- [14] SHI Q, ZHANG Y, HUANG J, et al. Synergistic solvent extraction of vanadium from leaching solution of stone coal using D2EHPA and PC88A [J]. Separation and Purification Technology, 2017, 181: 1-7.
- [15] 贾蓝波, 王玲, 郭紫璇, 等. 含钒溶液萃取分离富集钒的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(11): 3489-3504.
JIA Lanbo, WANG Ling, GUO Zixuan, et al. Research progress on separation and enrichment of vanadium from vanadium-containing solution by extraction [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(11): 3489-3504.
- [16] 康立武, 胡江平, 李强. 用 P204 从废钒催化剂中萃取钒[J]. 有色金属(冶炼部分). 2016(1): 46-48.
KANG Liwu, HU Jiangping, LI Qiang. Solvent extraction of vanadium from waste vanadium catalyst with P204 [J]. Nonferrous Metals (Extractive metallurgy), 2016(1): 46-48.
- [17] 段五华, 王澄谦, 郑强. 离心萃取器混合区内三相流的 CFD-PBM 模拟[J]. 流体机械, 2021, 49(11): 25-32.
DUAN Wuhua, WANG Chengqian, ZHENG Qiang. CFD-PBM simulation of three-phase flow in the mixing zone of a centrifugal contactor [J]. Fluid Machinery, 2021, 49(11): 25-32.

Study on separation of vanadium and iron from black shale acid leaching solution by centrifugal extraction

WANG Luyao^{1,2,3}, ZHANG Yimin^{1,2,3,4}, XUE Nannan^{1,2,3}, HU Pengcheng^{1,2,3}, CHEN Yabao¹

(1. School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;

2. State Environmental Protection Key Laboratory of Mineral Metallurgical Resources Utilization and Pollution Control, Wuhan 430081, China;

3. Collaborative Innovation Center of Strategic Vanadium Resources Utilization, Wuhan 430081, China;

4. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center of High Efficient Cleaning Utilization for Shale Vanadium Resource, Wuhan 430081, China)

Abstract: Centrifugal extraction method is an extraction method that enhances mass transfer between two phases through high-speed rotation and utilizes centrifugal force field to achieve two phase separation quickly. To improve the vanadium extraction efficiency and the separation factor of vanadium (V) and iron, the centrifugal extraction method was applied to the study of vanadium purification and enrichment process from black shale acid leaching solution. Under centrifugal extraction conditions with an initial pH value of 2.0, organic phase composition of 15 vol. % P204 + 85 vol. % sulfonated kerosene, phase ratio (O/A) of 1:4, extraction time of 4 min, extraction temperature of 45 °C, and stirring speed of 1 400 r/min, the V extraction efficiency was 87.67%. Compared with the conventional extraction, the separation factor of V/Fe increased from 41.78 to 127, and the extraction saturation capacity of vanadium increased from 52.63 g/L to 70.45 g/L, indicating that centrifugal extraction method can effectively enhance the separation effect of vanadium and iron, and improve the extraction saturation capacity of vanadium.

Key words: black shale acid leaching solution; centrifugal extraction; conventional extraction; vanadium; V/Fe separation