

P204 萃取硫酸体系中 V(IV) 的性能研究

冯雪茹¹, 吕国志², 张廷安², 赵秋月²

(1. 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 四川 成都 610041; 2. 东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要:以钛白废酸无焙烧直接加压酸浸提钒新技术中得到的浸出液为研究对象。配制硫酸体系中的 V(IV) 溶液, 进行萃取单因素试验以研究 P204 对 V(IV) 的萃取性能。通过考察水相初始 pH 值、萃取剂 P204 用量、萃取相比 (O/A)、振荡时间等因素对萃取的影响, 得到不同浓度 V(IV) 溶液的适宜萃取条件, 并初步探究了萃取剂 P204 对 V(IV) 的萃取饱和容量和萃取机理。结果表明: 萃取物 V(IV) 溶液的浓度影响水相初始 pH 值和萃取剂 P204 用量的选择, 但对振荡时间和萃取相比 (O/A) 无影响; P204 对硫酸体系中 V(IV) 的萃取性能优良, 萃取速度快, 饱和容量大; 对于 1、10、30 g/L 的 V(IV) 溶液, 在适宜萃取条件下, 单级萃取率分别为 90.36%、90.27%、61.37%。

关键词: V(IV); 硫酸体系; 萃取; P204; 饱和容量

中图分类号: TF841.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)06-0001-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.06.001

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



与作者互动
听语音
聊科研

Study on the extraction performance of V(IV) by P204 in sulfuric acid system

Feng Xueru¹, Lv Guozhi², Zhang Ting², Zhao Qiuyue²

(1. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: The leaching solution was taken as the research object which was obtained from the new process for vanadium production by acid leaching with titanium white waste acid under the pressure without roasting. V(IV) solution in sulfuric acid system was prepared to study on the extraction performance of V(IV) by P204 using single factor tests. The effects of initial pH value of aqueous phase, amount of extractant P204, extraction ratio (O/A) and the shaking time on the extraction were investigated to obtain the optimum extraction conditions of different concentrations of V(IV) solution. The saturation capacity of P204 and extraction mechanism of V(IV) were preliminarily studied. The results show that the concentration of V(IV) solution affects the initial pH value of aqueous phase and the amount of extractant P204, but has no effect on the shaking time and extraction ratio (O/A). P204 has an excellent extraction performance, fast extraction speed and large saturation capacity for V(IV) in sulfuric acid system. For the V(IV) solutions of 1, 10 g/L and 30 g/L, the single-stage extraction rates are 90.36%, 90.27% and 61.37%, respectively, under the suitable extraction conditions.

Key words: V(IV), sulfuric acid system, extraction, P204, saturation capacity

收稿日期: 2022-09-12

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2012AA062303); 地质调查项目 (DD20189501)。

作者简介: 冯雪茹, 1990 年出生, 女, 四川德阳人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事冶金及材料研究, E-mail: 517234837@qq.com。

0 引言

钒是重要的战略金属,广泛应用于钢铁行业、航空合金领域、新能源电池、化工催化剂以及医药治疗研究等^[1-6]。我国的钒资源十分丰富。其中,钒渣是提钒的主要原料之一,目前其工艺以焙烧-浸出为主,其存在环境不友好,成本较高、杂质含量高等问题^[7-8]。

我国钛白的主要生产方法为硫酸法。据统计,每生产 1 t 钛白粉会排出 20% 的废酸 8~10 t,中国钛白行业年产废硫酸达到 2000 余万吨,直接排放将造成严重的环境污染,并且当前处理废酸的浓缩提纯技术和中和排放技术都存在着处理成本偏高的问题^[9-11]。

本课题组提出了钛白废酸无焙烧直接加压酸浸提钒新技术。该项技术通过使用钛白废酸直接加压浸出钒渣,提取钒及其他有价元素,为钒渣提钒的高效绿色应用和钛白废酸的综合利用提出了新的技术路径^[12]。通过前期研究可知,该浸出工艺下得到的浸出液中钒主要以 V(IV) 为主,含量从几克每升到十几克每升。为了深入研究浸出液后期净化过程中 V(IV) 的被萃取行为,笔者通过配制硫酸体系下的 V(IV) 溶液,系统地对比分析 P204 对 1、10、30 g/L 的 V(IV) 的萃取性能,初步探究萃取剂 P204 对 V(IV) 的萃取饱和容量和萃取机理,为钛白废酸无焙烧直接加压酸浸提钒浸出液中钒的萃取分离提供理论支持。

1 研究方法

1.1 主要试剂及设备

试剂: VOSO₄(分析纯)、二(2-乙基己基)磷酸酯(P204)、自制磺化煤油、H₂SO₄(分析纯)、氨水(分析纯)。

主要设备: SHA-C 恒温水浴振荡器、PHSJ-3F 精密酸度计、Prodigy XP 型全谱直读发射光谱仪。

1.2 试验方法

分别配制硫酸体系中 1、10、30 g/L 的 V(IV) 水溶液作为水相。以 P204 为萃取剂,自制磺化煤油为稀释剂,按照一定体积比混合制成有机相。按一定萃取相比(O/A,其中O表示有机相,A表示水相,后文含义相同)将有机相与水相混合加入 125 mL 的梨型分液漏斗中,置于 SHA-C 恒温水浴

振荡器中振荡萃取。考察水相初始 pH 值、萃取剂 P204 用量、萃取相比(O/A)、振荡时间对不同浓度的 V(IV) 的萃取性能的影响。萃余液中 V(IV) 含量由 Prodigy XP 型 ICP 测得。

V(IV) 的萃取率计算公式为:

$$\rho_A = \frac{C_{A_i} - C_{A_j}}{C_{A_i}} \times 100\%$$

式中 ρ_A —有机相中离子萃取率, %;

C_{A_j} —ICP 测水相余液中离子浓度, g/L;

C_{A_i} —ICP 测萃取原液的离子浓度, g/L。

2 结果与讨论

2.1 水相初始 pH 值的影响

试验条件:有机相组成为 25% P204+75% 磺化煤油,萃取相比(O/A)1:1,振荡时间 60 min,考察不同的水相初始 pH 值对 V(IV) 的萃取率的影响,其中水相体积为 20 mL,有机相体积为 20 mL,结果如图 1 所示。

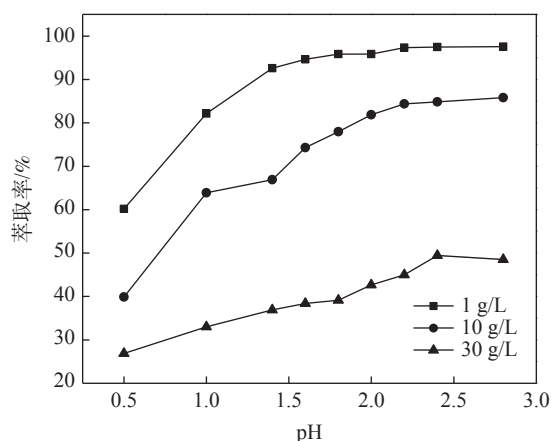


图 1 水相初始 pH 值对不同浓度 V(IV) 萃取率的影响
Fig. 1 Effect of initial pH of aqueous phase on the extraction rates of V(IV) with different concentrations

从图 1 可知,随着水相初始 pH 值从 0.5 增大到 2.8,不同浓度含钒溶液的 V(IV) 萃取率均呈现出先增加后趋于稳定的规律。这是因为 P204 萃取 V(IV) 的过程是阳离子交换的过程, V(IV) 离子与 P204 中的 H⁺ 交换,形成中性配合物进入有机相, P204 中的 H⁺ 被置换出进入水相。根据化学反应平衡移动原理知,若水相的 pH 值越低, H⁺ 浓度越大,使萃取反应受阻。因此,增大水相的初始 pH 值,使界面离解产生的酸根越多,有利于平衡向右移动。且从图 1 可以看出,随着水相中 V(IV) 初始浓度的增大,萃取平衡向水相初始 pH 值增大的方向移动,

说明 P204 对低浓度的 V(IV) 的萃取能力更强。因此,萃取过程水相的初始 pH 值应根据萃取原液中 V(IV) 的浓度进行调整。1 g/L 的 V(IV) 溶液可取初始 pH 值为 1.6; 10 g/L 的 V(IV) 溶液可取初始 pH 值为 2.2; 30 g/L 的 V(IV) 可取初始 pH 值为 2.4。

2.2 P204 用量的影响

试验条件: 水相初始 pH=2.0, 萃取相比 (O/A) 1:1, 振荡时间 60 min, 考察不同的 P204 的用量对 V(IV) 的萃取率的影响, 其中水相体积为 20 mL, 有机相体积为 20 mL, 结果如图 2 所示。

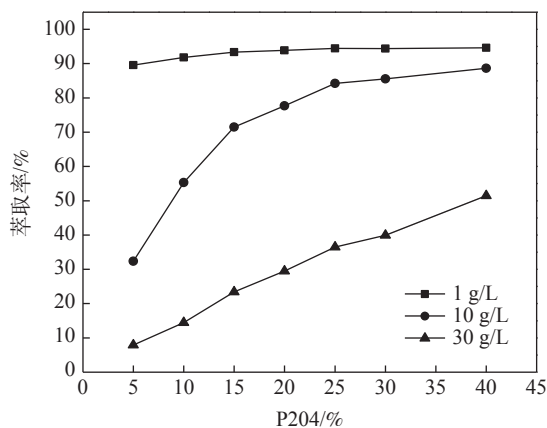


图 2 P204 的用量对不同浓度 V(IV) 萃取率的影响

Fig. 2 Effect of the dosage of P204 on the extraction rates of V(IV) with different concentrations

由图 2 可知, 萃取剂 P204 用量的变化对不同浓度下 V(IV) 的萃取性能影响差异较大。同一 P204 用量下, V(IV) 浓度越高, 萃取率越低。随 P204 用量的增加, V(IV) 的浓度越高, V(IV) 的萃取率受 P204 用量的影响越大。当水相 V(IV) 浓度为 30 g/L 时, P204 用量由 5% 提高到 40%, V(IV) 的萃取率呈近似直线增长, 但 P204 用量过高, 会影响水相分层速度。当 P204 用量为 40% 时, 出现了水油两相分层较慢的现象。因此, V(IV) 浓度较高时, 并不能仅通过增大 P204 的用量来提高 V(IV) 的萃取富集效果。P204 浓度过高不仅会提高成本, 还会使有机相粘度增大, 影响分层速度, 甚至出现无法分层的现象。因此, 萃取 1 g/L 的 V(IV) 溶液只需要 5% 的 P204 用量就能保证较高萃取率; 对于 10 g/L 的 V(IV) 溶液, P204 用量为 25% 较为适宜; 对于 30 g/L 的 V(IV) 溶液, P204 用量为 30% 较为适宜。

2.3 萃取相比 (O/A) 的影响

试验条件: 有机相组成为 25% P204+75% 磺化煤油, 水相初始 pH=2.0, 振荡时间 60 min, 考察不同

的萃取相比 (O/A) 对 V(IV) 的萃取率的影响, 结果如图 3 所示。

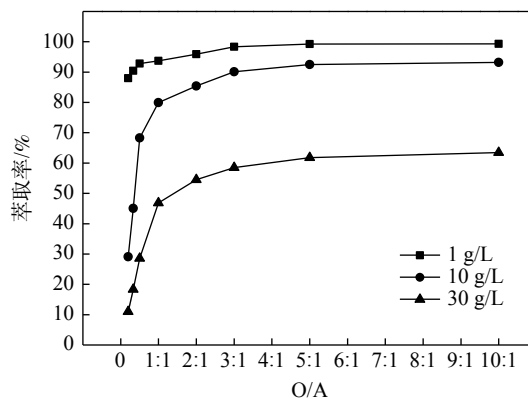


图 3 萃取相比对不同浓度 V(IV) 萃取率的影响

Fig. 3 Effect of extraction ratio (O/A) on the extraction rates of V(IV) with different concentrations

从图 3 可知, 随着萃取相比 (O/A) 的增大, 不同浓度 V(IV) 的萃取率均先增加再趋于稳定。这是因为增大相比 (O/A) 会有效增加有机相中 P204 含量, 减少水相中的 V(IV) 含量, 从而提高 P204 对萃取 V(IV) 的萃取能力。从图 3 中可看出, 在反应平衡前, 水相中 V(IV) 溶液浓度越高, 对 P204 萃取 V(IV) 的萃取率影响越大, 但萃取相比 (O/A) 的增加对萃取反应的平衡基本无影响。当萃取相比 (O/A) 为 3:1 时, P204 对不同浓度 V(IV) 的萃取均能达到平衡。为了避免萃取剂的浪费, 1 g/L 的 V(IV) 溶液选择萃取相比 (O/A) 为 1:2 较为合适, 10、30 g/L 的 V(IV) 溶液选择萃取相比 (O/A) 为 3:1 较为合适。

2.4 振荡时间的影响

试验条件: 萃取相比 (O/A) 1:1, 水相初始 pH=2.0, 有机相组成为 25%P204+75% 磺化煤油, 考察不同的振荡时间对 V(IV) 的萃取率的影响, 其中水相体积为 20 mL, 有机相体积为 20 mL, 结果如图 4 所示。由图 4 可知, 随着振荡时间从 2 min 增加到 60 min, P204 对不同浓度的 V(IV) 溶液的萃取率均呈现先迅速增大后趋于稳定的趋势; 无论水相中 V(IV) 浓度大小, 当振荡时间为 6 min 时, 均能达到最高的萃取率。这说明萃取剂 P204 与水相中的 V(IV) 接触形成配合物的速度较快, 萃取能力强; 萃取剂 P204 对 V(IV) 的萃取平衡时间不受初始水相中 V(IV) 的浓度影响。因此, 选择振荡时间为 6 min。

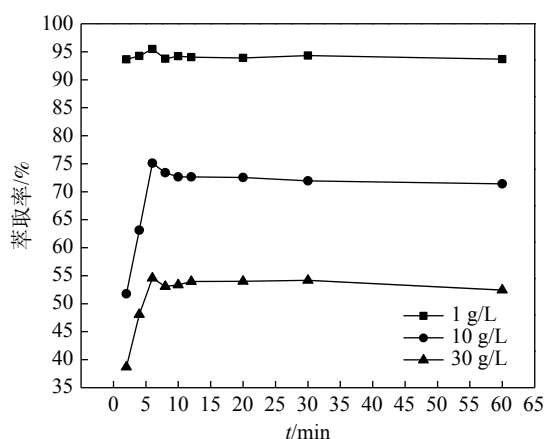


图4 振荡时间对不同浓度 V(IV) 萃取率的影响

Fig. 4 Effect of shaking time on the extraction rates of V(IV) with different concentrations

2.5 综合条件试验

当水相 V(IV) 的浓度为 1 g/L 时, 适宜萃取条件为: 有机相组成为 5% P204+95% 磺化煤油, 萃取相比 (O/A) 1 : 2, 振荡时间 6 min, 水相初始 pH 值 1.6, 该条件下 V(IV) 的单级萃取率为 90.36%。

当水相 V(IV) 的浓度为 10 g/L 时, 适宜萃取条件为: 有机相组成为 25% P204+75% 磺化煤油, 萃取相比 (O/A) 3 : 1, 振荡时间 6 min, 水相初始 pH 值 2.2, 该条件下 V(IV) 的单级萃取率为 90.27%。

当水相 V(IV) 的浓度为 30 g/L 时, 适宜萃取条件为: 有机相组成为 30% P204+70% 磺化煤油, 萃取相比 (O/A) 3 : 1, 振荡时间 6 min, 水相初始 pH 值 2.4, 该条件下 V(IV) 的单级萃取率为 61.37%。

2.6 P204 萃取 V(IV) 的饱和容量

采用系列相比法测定 P204 萃取 V(IV) 的饱和容量。在不同萃取相比 (O/A) 下进行萃取试验, 试验条件为: 水相 V(IV) 的浓度为 10 g/L, 有机相组成为 25%P204+75% 磺化煤油, 水相初始 pH 值为 2, 两相接触时间 60 min。结果如表 1 所示。绘制该试验条件下的萃取平衡等温线, 结果如图 5 所示。

表 1 系列相比法测定结果

Table 1 Analysis results of series phases ratio method

相比(O/A)	有机相V(IV)浓度/(g·L ⁻¹)
10 : 1	0.89
5 : 1	1.75
3 : 1	2.85
2 : 1	4.07
1 : 1	7.66
1 : 2	13.24
1 : 3	15.66
1 : 5	16.37
1 : 10	16.33

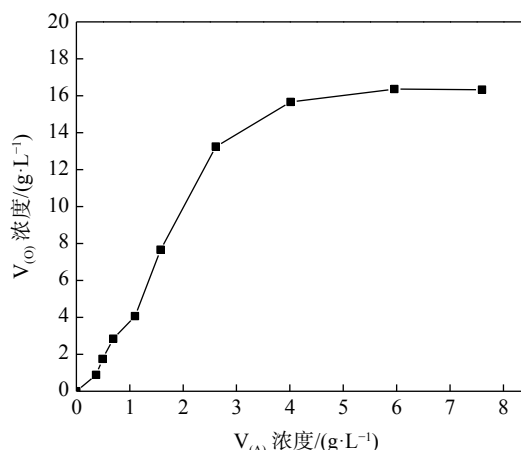


图 5 萃取平衡等温线

Fig. 5 Extraction equilibrium isotherms

由表 1 结合图 5 可知, 随着萃取相比 (O/A) 的降低, 水相剩余 V(IV) 浓度不断增高, 而有机相中的 V(IV) 浓度迅速增高后趋于稳定。当萃取相比 (O/A) 为 1 : 5 时, 有机相中 V(IV) 的浓度为 16.37 g/L, 已达到饱和。P204 对 V(IV) 的萃取饱和容量较大, 性能优良。

2.7 萃取机理初探

V(IV) 在酸性水溶液中主要以 VO²⁺ 的形式存在^[13-14]。P204 在非极性溶剂中主要以二聚体形式存在, 其作为萃取剂, 萃取过程是 P204 的 H⁺ 与被萃取物的阳离子进行交换的过程, 萃取机制属于阳离子交换机制^[15]。根据前人研究^[16] 可知, P204 萃取 V(IV) 的萃取反应式分为两种:

一是水相在低 pH 时:

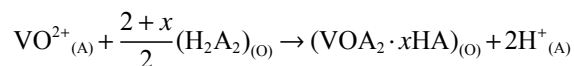


二是水相在高 pH 时:



式中, H₂A₂ 表示 P204 的二聚体 (后文含义相同)。

在试验条件为: 水相 V(IV) 的浓度为 10 g/L, 有机相组成为 25%P204+75% 磺化煤油, 水浴温度 25℃, 水相初始 pH 值为 2, 萃取相比 (O/A) 1 : 1, 两相接触时间 60 min 时, P204 对 V(IV) 的反应通式可以假设为:



该反应的平衡常数可表示为:

$$K = \frac{[(\text{VOA}_2 \cdot x\text{HA})_{(O)}] \cdot [\text{H}^+_{(A)}]^2}{[\text{VO}^{2+}_{(A)}] \cdot [(\text{H}_2\text{A}_2)_{(O)}]^{\frac{2+x}{2}}} \quad (3)$$

萃取分配比可表示为:

$$D = \frac{[(VOA_2 \cdot xHA)_{(O)}]}{[VO^{2+}_{(A)}]} \quad (4)$$

将 (2) 式代入 (1) 式, 取对数得:

$$\lg D = \lg K + 2\text{pH} + \frac{2+x}{2} \lg[(H_2A_2)_{(O)}]$$

以 $\lg D - 2\text{pH}$ 对 $\lg[(H_2A_2)_{(O)}]$ 作图, 如图 6 所示。通过拟合直线得到斜率, 即 $\frac{2+x}{2} = 1.49$, x 约为 1; 截距, 即萃取平衡常数 $\lg K = -3.12$ 。

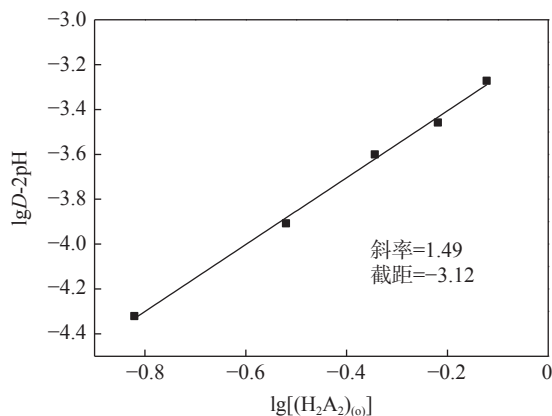
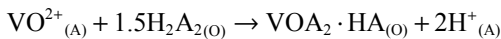


图 6 $\lg(H_2A_2)$ 与 $\lg D - 2\text{pH}$ 的关系

Fig. 6 Relationship between $\lg(H_2A_2)$ and $\lg D - 2\text{pH}$

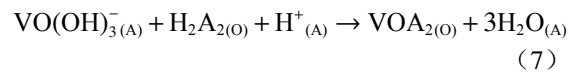
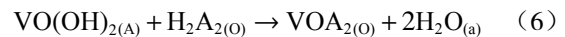
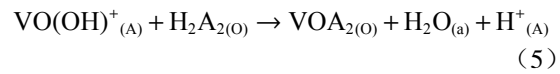
可知平衡反应中 [P204] : [V(IV)] 接近 3 : 1, 该结果与系列相比法试验测定的 [P204] : [V(IV)] = 3.09 : 1 近似一致, 证明了结果的可靠性。推算平衡反应式为:



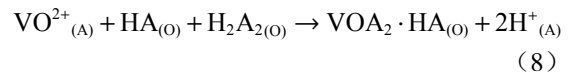
以上推算的平衡反应式和前人研究结果有所不同。结合文献^[17-18]研究结果, 通过理论分析, 推测本文试验条件下的萃取反应可能受水相中 V(IV) 浓度、水相初始 pH 值和萃取剂 P204 的用量等因素的交互关系的影响, 使得 V(IV) 的水解反应和 P204 在反应中的结合形式更加多样化, 从而导致萃取过程更加复杂化。具体体现在以下两方面:

一是在本文试验条件下, V(IV) 的浓度较高, 水相初始 pH 值较大, 促进了 V(IV) 的水解反应。在 (1) 式的基础上, V(IV) 的水解产物进一步与 P204

结合, 可能存在 (5)、(6)、(7) 式此类反应, 降低了 P204 和 V(IV) 的结合比例。



二是 P204 在非极性溶剂中主要以二聚体形式存在, 但水相初始 pH 值和 V(IV) 的浓度会影响 P204 在反应中的结合形式。除发生 (1) 式反应外, 可能还存在 (8)、(9) 式反应中的一种或两种, 降低了 P204 和 V(IV) 的结合比例。



本试验条件下萃取剂的反应形式、萃合物的组成和萃取反应机理须结合红外光谱测定和数学建模等进一步深入分析。该部分研究工作有待进一步开展。

3 结论

1) 随着被萃取物 V(IV) 溶液的浓度增大, 萃取反应达到平衡时的水相初始 pH 值和萃取剂 P204 的用量增大, 而振荡时间和萃取相比 (O/A) 相同。

2) P204 对硫酸体系中 V(IV) 的萃取性能优良, 萃取速度快, 饱和容量大; 对低浓度的 V(IV) 溶液的萃取能力优于高浓度的 V(IV) 溶液。在试验得到的适宜条件下, P204 萃取 1 g/L 的 V(IV) 溶液, 单级萃取率为 90.36%; P204 萃取 10 g/L 的 V(IV) 溶液, 单级萃取率为 90.27%; P204 萃取 30 g/L 的 V(IV) 溶液, 单级萃取率为 61.37%。

3) 当萃取反应达到平衡时, P204 与 V(IV) 结合比例为 3 : 1。水相中 V(IV) 的浓度和水相初始 pH 值或会影响 V(IV) 的水解反应和 P204 在反应中的结合形式, 从而导致萃取反应机制复杂化。萃取机理的深入分析将是进一步研究工作的方向。

参考文献

- [1] Huang Xiaohui, Zuo Xiurong, Liu Fengqin, *et al.* Research progress and application status of superplasticity of Ti6Al4V alloy[J]. Materials Research and Application, 2010, 4(1): 23-26.
(黄晓辉, 左秀荣, 刘凤芹, 等. Ti6Al4V 合金超塑性的研究进展及应用现状[J]. 材料研究与应用, 2010, 4(1): 23-26.)
- [2] Feng Jingxiang, Luo Yuqing, Cao Lixiang. Preparation and properties of a new vanadium based anode alloy for automotive

- batteries[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2021, 42(3): 94–98.
(冯竞祥, 罗瑜清, 曹立祥. 新型钒基新能源汽车电池负极合金的制备与性能研究[J]. *钢铁钒钛*, 2021, 42(3): 94–98.)
- [3] Zhang Jia, Li Qian, Han Yani. Application of vanadium catalyst in sulfuric acid production[J]. *Guangdong Chemical*, 2020, 47(17): 63–64.
(张甲, 李倩, 韩雅妮. 钒催化剂在硫酸生产中的应用[J]. *广东化工*, 2020, 47(17): 63–64.)
- [4] 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.
(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.)
- [5] Moskalyk R R, Aifantazi A M. Processing of vanadium: A review[J]. *Minerals Engineering*, 2003, 16(9): 793–805.
- [6] Xu Zhengzheng, Liang Jinglong, Li Hui, *et al.* Research status and prospects of vanadium recovery in vanadium containing wastes[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020, (3): 8–13.
(徐正震, 梁精龙, 李慧, 等. 含钒废弃物中钒的回收研究现状及展望[J]. *矿产综合利用*, 2020, (3): 8–13.)
- [7] Chen Shurui, Yang Shaoli, Ma Lan. Research status of vanadium extraction from steel slag containing vanadium[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2019, 39(3): 69–74.
(陈书锐, 杨绍利, 马兰. 含钒钢渣提钒研究现状[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(3): 69–74.)
- [8] Yang Shouzhi. *Vanadium metallurgy*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010: 22–42.
(杨守志. *钒冶金*[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 22–42.)
- [9] Gao Guangyan, Gao Likun, Rao Bing, *et al.* Current situation of resource utilization of waste acid from titanium dioxide production[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2021, 42(5): 99–108.
(高广言, 高利坤, 饶兵, 等. 硫酸法钛白废酸资源化利用现状及展望[J]. *钢铁钒钛*, 2021, 42(5): 99–108.)
- [10] Yang Haizhou, Qin Lingling, Chen Gang. Research progress for recovery and comprehensive utilization of waste acid from titanium dioxide production[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2018, 45(16): 118–119.
(杨海舟, 秦玲玲, 陈钢. 钛白废酸回收及综合利用研究进展[J]. *广东化工*, 2018, 45(16): 118–119.)
- [11] Yu Yaojie. Comprehensive utilization of waste acid from titanium dioxide production by sulfuric acid process[J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2019, (5): 145–146.
(于耀杰. 硫酸法钛白粉生产副产品废酸的综合利用[J]. *化工设计通讯*, 2019, (5): 145–146.)
- [12] Zhang Ting'an, Mou Wangzhong, Dou Zhihe, *et al.* A hydrometallurgical method for extracting vanadium from converter slag containing vanadium and titanium: China, CN101967563A[P]. 2011-02-09.
(张延安, 牟望重, 豆志河, 等. 一种利用含钒钛转炉渣的湿法提钒方法: 中国, CN101967563A[P]. 2011-02-09.)
- [13] Yu Bin, Sun Zhaohui, Xian Yong, *et al.* Study on extraction separation of non-roasting acid leachate of vanadium slag[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2014, 35(5): 1–6.
(余彬, 孙朝晖, 鲜勇, 等. 钒渣无焙烧酸浸液萃取分离试验研究[J]. *钢铁钒钛*, 2014, 35(5): 1–6.)
- [14] Zhang Ting'an, Mou Wangzhong, Dou Zhihe, *et al.* Potential-pH diagrams for V-Fe-H₂O system during oxygen pressure acid leaching of vanadium-bearing converter slags[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(11): 2936–2945.
(张延安, 牟望重, 豆志河, 等. 转炉钒渣氧压酸浸过程V-Fe-H₂O系的电位—pH图[J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(11): 2936–2945.)
- [15] Li Wang, Zhang Yimin, Liu Tao, *et al.* Comparison of ion exchange and solvent extraction in recovering vanadium from sulfuric leach solutions of stone coal[J]. *Hydrometallurgy*, 2013, 131/132: 1–7.
- [16] Li Xingbin, Wei Chang, Wu Jun, *et al.* Thermodynamics and mechanism of vanadium(IV) extraction from sulphate medium with D2EHPA, EHEHPA and CYANEX 272 in kerosene[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(2): 461–466.
- [17] Wang Yuxin, Zeng Ping. Study on the extraction mechanism of V(IV) by di-(2-ethylhexyl) phosphate[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 1990, 14(3): 172–175.
(王玉鑫, 曾平. 二-(2-乙基己基)磷酸萃取V(IV)的机理研究[J]. *稀有金属*, 1990, 14(3): 172–175.)
- [18] Tang Yue, Ye Guohua, Hu Yujie, *et al.* Mathematical modeling and analysis of vanadium extraction from acid leaching solution of clay vanadium ore with N235[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2021, 42(2): 28–35.
(唐悦, 叶国华, 胡渝杰, 等. N235从黏土钒矿酸浸液中萃钒的数学建模与分析[J]. *钢铁钒钛*, 2021, 42(2): 28–35.)