双酸复配强化浸出赤泥中钒和镓①

郭婷[1]，朱晓波[1]，李望[1]，袁彩凤[2]，吕亚军[3]
（1.河南理工大学 化学化工学院，河南 焦作 454000；2.河南省生态环境技术中心，河南 郑州 450000；3.华北水利水电大学 建筑学院，河南 郑州 450046）

摘　要：采用双酸（H_2SO_4，HCl）复配强化酸浸的方法提取赤泥中的钒、镓，考察了双酸体积配比、酸浓度、反应时间、浸出温度以及液固比对钒、镓浸出率的影响。结果表明，在双酸体积配比 1∶1、酸浓度 28.89%、液固比 9、反应时间 60 min、浸出温度 120 ℃条件下，钒浸出率为 90.65%，镓浸出率为 97.30%。X 射线衍射分析和热力学分析结果表明，在酸浸过程中，赤泥中的白云母、赤铁矿和钙钛矿均被一定程度溶解；钒和镓分别以钒酸盐和镓离子形式存在于酸浸液中，表明酸浸有效促进了矿物的溶解及有价金属的释放。

关键词：赤泥；钒；镓；强化浸出；双酸复配；酸浸
中图分类号：TF111　　**文献标志码：**A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2025.06.021
文章编号：0253-6099（2025）06-0119-05

Enhanced Leaching of Vanadium and Gallium from Red Mud with a Mixture of Acids

GUO Ting[1], ZHU Xiaobo[1], LI Wang[1], YUAN Caifeng[2], LYU Yajun[3]
(1. *School of Chemistry and Chemical Engineering*, *Henan Polytechnic University*, *Jiaozuo* 454000, *Henan*, *China*; 2. *Henan Ecological Environment Technology Center*, *Zhengzhou* 450000, *Henan*, *China*; 3. *School of Architecture*, *North China University of Water Resources and Electric Power*, *Zhengzhou* 450046, *Henan*, *China*)

Abstract: A mixture of two acids (H_2SO_4, HCl) was used to enhance the acid leaching of vanadium (V) and gallium (Ga) from red mud, and the effects of key parameters on the leaching rates of V and Ga were investigated, including volume ratio of two acids, acid concentration, reaction time, leaching temperature and liquid-to-solid ratio. The results show that under the following conditions, including two acids in a volume ratio of 1∶1, acid concentration of 28.89%, liquid-to-solid ratio of 9, reaction time of 60 min and leaching temperature of 120 ℃, the leaching rates of V and Ga can reach 90.65% and 97.30%, respectively. X-ray diffraction (XRD) and thermodynamic analyses indicate that muscovite, hematite and perovskite in red mud are dissolved to some extent during the acid leaching process, and vanadium and gallium exist in different valence states in the leachate. It is concluded that acid leaching can effectively promote dissolution of minerals and release of valuable metals.

Key words: red mud; vanadium; gallium; enhanced leaching; mixture of two acids; acid leaching

赤泥是铝土矿生产氧化铝过程中产生的一种强碱性固体工业废弃物，每生产 1 t 氧化铝会排放 1.0~1.8 t 赤泥，因其外观似暗红色泥土，故称之为赤泥[1]。同时赤泥有较强的碱性和放射性，属于有害产物，赤泥的处理成为了一个国际性的难题[2]。

赤泥中含有丰富的铝、铁、钒、镓等金属资源[3]，其中钒和镓作为关键的战略元素[4-8]，不仅具备显著的经济价值和广泛的应用前景，而且高效回收这些金属对缓解资源短缺与促进固废资源化均具有重要意义[9-10]。目前从赤泥中提取稀有金属的主要方法包括酸浸法[11]、溶剂萃取[12]以及氯化法[13]等，酸浸法因操作简便、成本可控而被广泛研究。然而，采用单酸（例如 H_2SO_4 或 HCl）进行浸出时，难以同时实现钒和镓的高浸出率。

本文创新性地采用双酸（HCl、H_2SO_4）复配的方法

① **收稿日期：**2025-06-01
基金项目：国家自然科学基金（51804103，51904097）；河南省重点研发计划（231111321800）；河南省科技项目（242102320354）
作者简介：郭婷（1999—），女，甘肃陇南人，硕士研究生，主要从事赤泥有价金属综合回收。E-mail：772081943@qq.com
通信作者：朱晓波（1985—），男，辽宁辽阳人，博士，副教授，主要从事化学提取分离与固废资源化利用方面的研究。E-mail：zhuxiaobo0119@126.com

强化浸出赤泥中的钒、镓,通过研究酸浸过程中的双酸体积配比、酸浓度、反应时间、浸出温度以及液固比等参数对钒、镓稀有金属浸出率的影响,为赤泥的高效综合利用提供了一种新思路。

1 实验

1.1 实验材料及分析仪器

赤泥试样来自河南某地,经烘干、研磨、过筛后得到粒径小于0.034 mm的实验原料,通过电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)分析的赤泥原料主要化学成分见表1。赤泥XRD图谱见图1。

表1 赤泥原料主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical components of red mud %

Fe	Al	Ca	Si	V	Ga
24.33	16.26	19.51	19.98	0.034 1	0.003 2

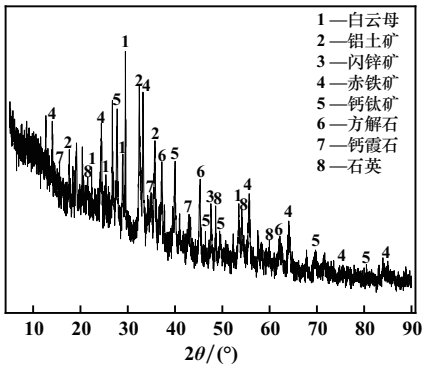


图1 赤泥的XRD图谱

Fig.1 XRD pattern of red mud sample

从图1可知,赤泥原料主要物相为赤铁矿、钙钛矿、铝土矿、闪锌矿、方解石、钙霞石、石英和白云母,其中钒以类质同象形式存在于白云母晶格中[14];镓以同构形式优先存在于赤铁矿或针铁矿中,以Ga^{3+}的形式取代矿物晶格中的Fe^{3+}[15-16]。

1.2 试剂及实验装置

主要试剂包括硫酸、盐酸、高锰酸钾、尿素、亚硝酸钠、二苯胺磺酸钠、硫酸亚铁铵、重铬酸钾,均为分析纯;实验用水为去离子水。

主要仪器包括ZNCL-TS型智能磁力搅拌器、SHB-III真空抽滤机、JDO-9070A型鼓风烘干箱、PTX-FA2105电子天平、D8 Advance X射线衍射仪、PerkinElmer电感耦合等离子体质谱仪(ICP-OES)。

1.3 实验方法

在河南某地取赤泥样品,赤泥经干燥机烘干后用球磨机进行研磨,取粒径小于0.034 mm的赤泥10 g于烧杯中,配制90 mL的溶剂,其中盐酸、硫酸按照不同体积配比(分别为1∶3、1∶2、1∶1、2∶1和3∶1)混合后形成不同酸浓度的溶液,用ZNCL-TS磁力搅拌电热套加热到一定温度,并反应一段时间。待赤泥的酸浸液冷却后用SHB-III真空抽滤机对赤泥浸出的矿浆进行固液分离,分离后的溶液进行定容,用JDO-9070A型鼓风烘干箱对滤渣进行干燥。

分析浸出液和浸出渣中钒、镓含量,钒、镓浸出率计算公式为:

$$\eta = \frac{m}{M} \times 100\% \tag{1}$$

式中:η为浸出率,%;m为浸出液中钒或镓的质量,g;M为赤泥中钒或镓的质量,g。

1.4 热力学分析

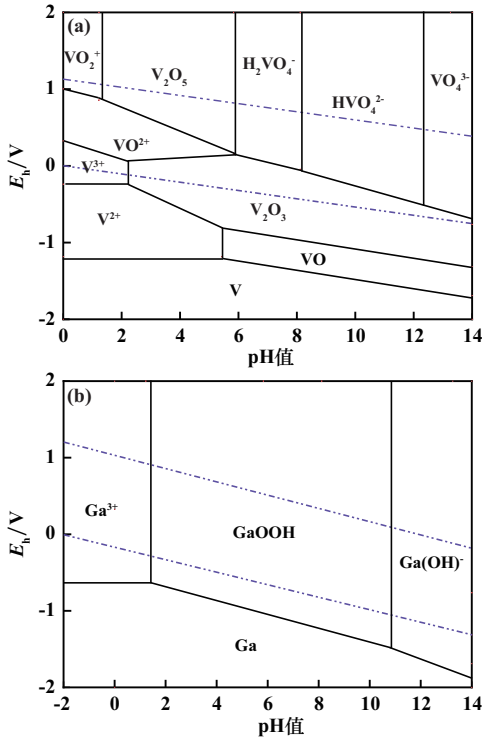
表2列出了Ga-H_2O和V-H_2O体系中的物种及相应的热力学数据。标准状态(298.15 K)下,各物质吉布斯自由能如表2所示。

表2 标准状态下各物质吉布斯自由能

Table 2 Standard-state Gibbs free energy

物种	价态	ΔG_f^θ/(kJ·mol^{-1})
V	0	−8.619
V^{2+}	II	−174.423
VO	II	−443.391
$V(OH)^+$	II	−450.344
V^{3+}	III	−173.356
V_2O_3	III	−1 255.225
VO^+	III	−465.315
$V(OH)_2^+$	III	−762.254
VO^{2+}	IV	−434.207
VO_2	IV	−732.899
$V(OH)_3^+$	IV	−1 010.603
$V(OH)^{3+}$	IV	−469.453
$HV_2O_5^-$	IV	−1 724.197
V_2O_5	V	−1 596.748
VO_2^+	V	−630.939
VO_3^-	V	−1 009.771
VO_4^{3-}	V	−1 128.872
HVO_4^{2-}	V	−1 188.239
$H_2VO_4^-$	V	−1 236.309
$V_4O_{12}^{4-}$	V	−3 670.531
H_3VO_4	V	−1 232.473
$H_3V_2O_7^-$	V	−2 183.873
$HV_6O_{17}^{3-}$	V	−5 404.201
$H_2V_6O_{17}^{2-}$	V	−5 410.514
$H_2V_{10}O_{28}^{4-}$	V	−8 815.374
$HV_{10}O_{28}^{5-}$	V	−8 820.157
Ga_2O	I	−78.681
GaO^+	I	−86.635
Ga_2O_3	III	−239.075
GaOOH	III	−150.077
Ga^{3+}	III	−38.747
$Ga(OH)_2^+$	III	−91.558
$Ga(OH)^{2+}$	III	−142.187
GaO_2^+	V	−128.741

根据实验数据和相关反应,利用 HSC Chemistry 6.0 软件绘制了 298.15 K 下 V-H_2O 和 Ga-H_2O 体系的 E_h-pH图,结果如图 2 所示,其中上下虚线分别表示 O_2-H_2O和 H_2O-H_2稳定的边界。



(a) V-H_2O; (b) Ga-H_2O

图 2　V-H_2O 和 Ga-H_2O 体系的 E_h-pH 图

Fig. 2　E_h-pH diagrams of V-H_2O and Ga-H_2O systems

图 2(a)中,稳定的物种是 VO^{2+},从高酸性到 pH 值为 2.0 时,各种钒酸盐离子随着 pH 值增加而增加。同样,VO^{2+}、V^{3+}和 V^{2+}在 pH<6、pH<2 和 pH<5.5 的溶液中分别具有适当的电位。图 2(b)中,Ga^{3+}在酸性条件下稳定存在,$Ga(OH)^-$在 pH>11 时具有一定的电位。

根据稳定物种的变化情况,明确了在实验中应选择的 pH 值范围,从而确保钒和镓能够以预期的形式存在于酸浸液中。

2　结果与讨论

2.1　双酸体积配比的影响

总酸浓度 28.89%、浸出温度 120 ℃、液固比 9、浸出时间 60 min 条件下,双酸体积配比对钒、镓浸出率的影响如图 3 所示。由图 3 可知,在硫酸和盐酸体积配比为 1∶1时,钒和镓浸出率分别为 90.65%和 97.3%,表明此时两种酸的协同作用较强。随着硫酸比例增加,钒浸出率上升,而镓浸出率下降,说明硫酸主要促进钒的溶解,而对镓的溶解效果不佳。硫酸能够与钒形成可溶性硫酸盐,且其强氧化性和酸性有助于将钒从赤泥中氧化并溶解出来。盐酸对钒浸出的影响相对较小,主要是辅助硫酸的溶解作用。相反,增加盐酸比例时,钒浸出率下降,而镓浸出率上升,表明盐酸更能促进镓的溶解。Ga^{3+}更倾向于与某些配体形成配合物,特别是氢氧根配合物、氟化配合物、两种金属的硫酸盐配合物以及镓的氯化配合物[17]。因此,盐酸相对于硫酸有更大的溶解潜力。综合考虑钒和镓的浸出率,确定适宜的硫酸和盐酸体积配比为 1∶1。

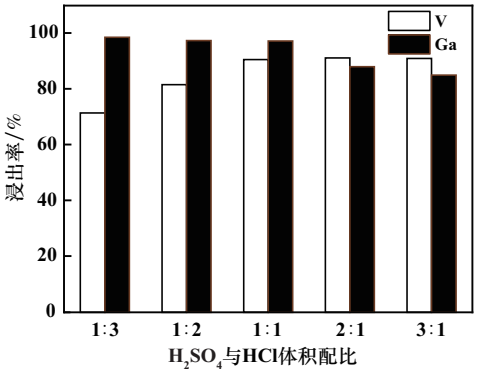


图 3　双酸体积配比对钒、镓浸出率的影响

Fig. 3　Effect of volume ratio of two acids on leaching rates of V and Ga

2.2　酸浓度的影响

双酸体积配比为 1∶1,其他条件不变,酸浓度对钒、镓浸出率的影响如图 4 所示。由图 4 可知,酸浓度对钒和镓浸出率影响显著。钒浸出率随着酸浓度增加先上升后下降。酸浓度 28.89%时,钒浸出率达到 90.65%。随后,高浓度酸会过度腐蚀赤泥等基质材料,导致其他成分迅速溶解,这些离子与钒竞争,抑制钒有效溶出[18]。此外,酸浓度过高还会改变反应体系中的离子平衡,进一步抑制钒的溶解。因此,酸浓度继续增加时,钒浸出率逐渐降低。随着酸浓度增加,镓浸出率先逐渐升高,酸浓度 28.89%时,镓浸出率达到 97.30%。这是由于在浸出初期,随着酸浓度增加,更多的镓离子能够有效溶解于溶液中,镓浸出率上升。酸浓度过高时,浸出反应受到抑制[19],如 Fe^{3+}、Al^{3+}等其他离子的溶解速度大于镓的溶解速度,形成竞争溶解,导致镓的相对浸出效率降低。适宜的酸浓度为 28.89%。

2.3　浸出温度的影响

酸浓度 28.89%,其他条件不变,浸出温度对钒、镓浸出率的影响如图 5 所示。由图 5 可知,浸出温度对 V、Ga 的浸出率有显著影响。随着浸出温度升高,钒浸出率先升高后趋于平缓,镓浸出率先降低后升高。

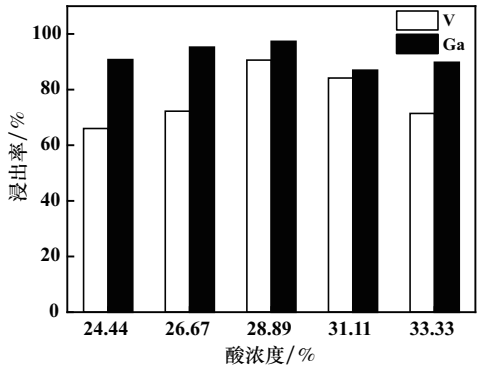


图4 酸浓度对钒、镓浸出率的影响

Fig.4 Effect of acid concentration on leaching rates of V and Ga

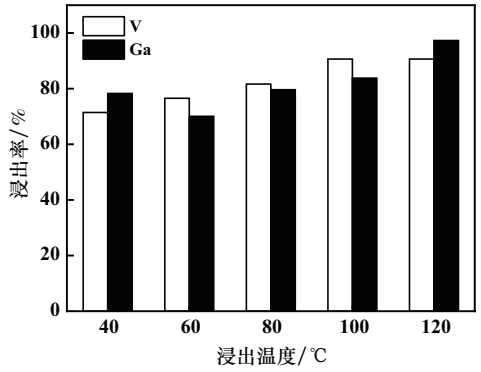


图5 浸出温度对钒、镓浸出率的影响

Fig.5 Effect of leaching temperature on leaching rates of V and Ga

温度从40 ℃升高到120 ℃时,钒浸出率从71.45%提高到90.65%,镓浸出率从78.27%提高到97.30%,但60 ℃时,镓浸出率稍有下降。随着温度升高,矿相中钒、镓矿物的溶解度增加,分子间活化能和有效碰撞概率增加,提高浸出温度有助于提高浸出效率[20]。从浸出动力学角度来看,随着温度升高,硫酸和盐酸溶液向赤泥中扩散的速度加快[18],提高温度有利于赤泥中矿物的加速溶解。然而温度超过100 ℃后,钒浸出率基本不变,镓浸出率仍在升高。综上所述,确定适宜的浸出温度为120 ℃。

2.4 液固比的影响

浸出温度120 ℃,其他条件不变,液固比对钒、镓浸出率的影响如图6所示。由图6可见,液固比从5上升到9,钒浸出率从70.95%升高到90.65%,镓浸出率从78.88%升高到97.30%;液固比从9升高到13时,钒浸出率从90.65%降到88.24%,镓浸出率从97.30%降到85.24%。增加液体的量可以提高浸出反应的接触面积,从而提升浸出效率,促进钒和镓的溶解。但过高的液固比导致酸浓度降低,从而降低反应的驱动力,特别是对于溶解性差的金属镓[21]。确定适宜的液固比为9。

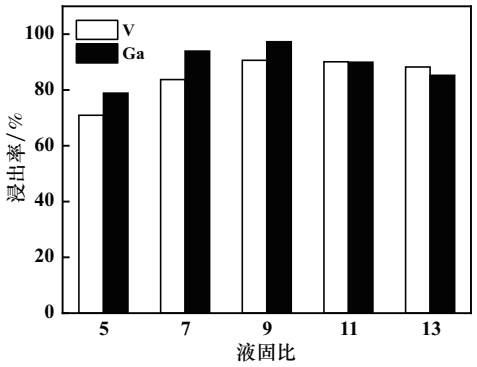


图6 液固比对钒、镓浸出率的影响

Fig.6 Effect of liquid-solid ratio on leaching rates of V and Ga

2.5 反应时间的影响

液固比9,其他条件不变,反应时间对钒、镓浸出率的影响如图7所示。由图7可知,反应时间从30 min延长到60 min,钒浸出率从69.18%升高到90.65%,镓浸出率从78.35%升高到97.30%,反应时间超过60 min后,钒、镓浸出率上升缓慢。初期反应速率较快,随着反应的进行,表面活性位点逐渐减少,导致浸出速率减慢,最终趋于稳定[22]。当钒、镓的溶解达到一定的平衡状态时,浸出率会保持相对稳定,最终趋于动态平衡。适宜的反应时间为60 min。

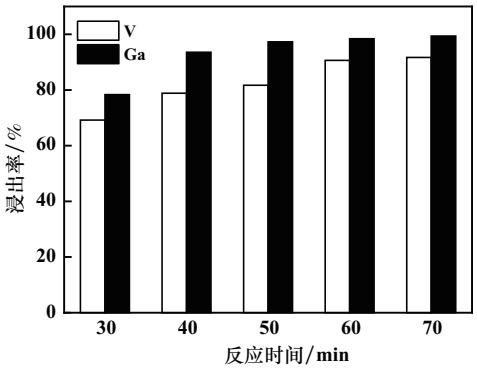


图7 反应时间对钒、镓浸出率的影响

Fig.7 Effect of reaction time on leaching rates of V and Ga

2.6 优化条件实验

根据单因素实验确定双酸复配强化浸出赤泥中钒和镓的优化条件为:双酸体积配比1∶1、酸浓度28.89%、液固比9、反应时间60 min、浸出温度120 ℃,在此条件下,钒、镓浸出率分别为90.65%、97.30%。优化条件下所得双酸浸出渣的XRD图谱见图8。由图8可知,赤泥经H_2SO_4和HCl双酸复配浸出后,钙钛矿、赤铁矿和白云母均出现一定程度溶解,出现了硬石膏相,这表明钒和镓已浸出溶解到酸浸液中。

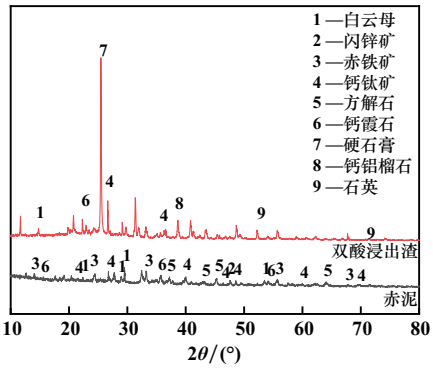


图 8　赤泥原样与双酸浸出渣的 XRD 图谱

Fig. 8　XRD patterns of red mud and its leaching residue by two acids

3　结论

1）通过 XRD 分析可以看出,钙钛矿、白云石、赤铁矿和白云母在特定的酸性条件下均发生了不同程度的溶解,表明这些矿物中的钒和镓能够有效进入酸浸液中。热力学分析进一步揭示,在酸浸液中,钒主要以钒酸盐形式存在,而镓则以 Ga^{3+} 形式稳定存在于溶液中。

2）在双酸体积配比 1∶1、酸浓度 28.89%、液固比 9、反应时间 60 min、浸出温度 120 ℃条件下,钒、镓浸出率分别为 90.65%、97.30%,实现了钒和镓的高效浸出。

参考文献(References):

[1] 叶鑫,赵爱春,刘宸嘉,等. 赤泥中有价金属的回收工艺研究进展[J]. 湿法冶金, 2023,42(3):229-235.
YE Xin, ZHAO Aichun, LIU Chenjia, et al. Research progress on recovery process of valuable metals in red mud[J]. Hydrometallurgy of China, 2023,42(3):229-235.

[2] 柳晓,韩跃新,何发钰,等. 赤泥的危害及其综合利用研究现状[J]. 金属矿山, 2018(11):7-12.
LIU Xiao, HAN Yuexin, HE Fayu, et al. Research status on hazards and comprehensive utilization of red mud[J]. Metal Mine, 2018(11):7-12.

[3] 杨军臣,王凤玲,李德胜,等. 铝土矿中伴生稀有稀土元素赋存状态及走向查定[J]. 矿冶, 2004(2):89-92.
YANG Junchen, WANG Fengling, LI Desheng, et al. Investigation on occurrence and trend of rare and rare-earth elements associated in bauxite [J]. Mining and Metallurgy, 2004(2):89-92.

[4] 梁雪崟,叶国华,朱思琴,等. 钒钛磁铁矿提钒工艺的研究进展[J]. 稀有金属, 2023,47(6):893-907.
LIANG Xueyin, YE Guohua, ZHU Siqin, et al. Research progress of process of vanadium extraction from vanadium-titanium magnetite[J]. Rare Metals, 2023,47(6):893-907.

[5] ZHU X B, LI W, ZHANG C X. Extraction and removal of vanadium by adsorption with resin 201 * 7 from vanadium waste liquid[J]. Environmental Research, 2020,180:108865.

[6] TENG A J, XUE X X. A novel roasting process to extract vanadium and chromium from high chromium vanadium slag using a NaOH-$NaNO_3$ binary system[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019,379:120805.

[7] 王祥丁,刘军,黄翔,等. 含钒钛精矿冶炼过程中钒还原行为分析[J]. 矿冶工程, 2024,44(6):121-124.
WANG Xiangding, LIU Jun, HUANG Xiang, et al. Analysis of vanadium reduction behavior in smelting of vanadium containing titanium concentrate [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(6):121-124.

[8] 张丽曼,张会,梁倩,等. 镓矿资源的分布、发展概况及中国发展镓产业的思考[J]. 矿产勘查, 2022,13(8):1235-1240.
ZHANG Liman, ZHANG Hui, LIANG Qian, et al. The distribution and development of gallium mineral resources and thinking of developing gallium industry in China[J]. Mineral Exploration, 2022,13(8):1235-1240.

[9] 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.

[10] ZHU Y M, GE W C, ZHANG Y, et al. Gallium extraction from red mud via leaching with a weak acid[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024,182:740-751.

[11] 李洪博,韩东,张津榕,等. 从赤泥酸浸液中分离提取稀土试验研究[J]. 湿法冶金, 2023,42(4):388-393.
LI Hongbo, HAN Dong, ZHANG Jinrong, et al. Separation and extraction of rare earth from red mud acid leaching solution [J].Hydrometallurgy, 2023,42(4):388-393.

[12] 朱晓波,王涛,李望. 醋酸浸出赤泥及 P507 萃取浸出液回收钇的实验研究[J]. 工程科学与技术, 2021,53(4):240-246.
ZHU Xiaobo, WANG Tao, LI Wang. Experimental study on recovery of Y by acetic acid leaching from red mud and solvent extraction by P507 from leaching solution[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021,53(4):240-246.

[13] 王平艳. 真空碳热还原氯化法炼铝的研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2006.
WANG Pingyan. Study on aluminum smelting by vacuum carbothermic reduction chlorination[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2006.

[14] 朱晓波,李望,管学茂. 赤泥酸浸提钒[J]. 过程工程学报, 2014,14(5):792-796.
ZHU Xiaobo, LI Wang, GUAN Xuemao. Leaching of red mud with different acids for extraction of vanadium[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2014,14(5):792-796.

[15] LU F H, XIAO T F, LIN J, et al. Recovery of gallium from Bayer red mud through acidic-leaching-ion-exchange process under normal atmospheric pressure[J]. Hydrometallurgy, 2018,175:124-132.

[16] LIU Z, ZONG Y, LI H, et al. Characterization of scandium and gallium in red mud with time of flight-secondary ion mass spectrometry (ToF-SIMS) and electron probe micro-analysis (EPMA)[J]. Minerals Engineering, 2018,119:263-273.

(下转第 129 页)

ting ash in process of zinc metallurgy by oxidation leaching[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018,38(6):88-91.

[8] 刘小文,周兆安,毛谙章,等. 从高锡高砷铜阳极泥中浸出铜镍的工艺研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(6):104-106.
LIU Xiaowen, ZHOU Zhaoan, MAO Anzhang, et al. Processing technique for leaching copper and nickel from high-content tin-arsenic copper anode slime[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019, 39(6):104-106.

[9] YU Y, WANG H, HU J H, et al. An environmentally-friendly process for recovering, solidifying as and preparing bronze material from tin-bearing middling[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 323:129036.

[10] 刘大方,史谊峰,舒波,等. 铜冶炼烟尘回收铟技术进展[J]. 矿冶工程, 2017,37(2):98-103.
LIU Dafang, SHI Yifeng, SHU Bo, et al. Progress in recovery of indium from copper smelting dust[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017,37(2):98-103.

[11] 宋兴诚. 锡冶金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
SONG Xingcheng. Tin metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011.

[12] 蒋开喜. 有色金属进展(1996—2005): 第四卷重有色金属[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007.
JIANG Kaixi. Advances in nonferrous metals (1996—2005): Volume IV Heavy nonferrous metals[M]. Changsha: Central South University Press, 2007.

[13] HAN J W, OU Z Y, LIU W, et al. Recovery of antimony and bismuth from tin anode slime after soda roasting-alkaline leaching[J]. Separation and Purification Technology, 2020,242:116789.

[14] 李敦华. 火法富集-湿法分离工艺从固废资源中回收锌及其他有价金属的探究[J]. 中国有色冶金, 2020,49(1):8-12.
LI Dunhua. Exploration of recovery of zinc and other valuable metals from solid waste resources by pyrometallurgy enrichment-hydrometallurgy separation process[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2020, 49(1):8-12.

[15] 王丽,王苗,谢容生,等. 锡冶炼烟尘砷汞赋存形态与分布特征研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(10):22-25.
WANG Li, WANG Miao, XIE Rongsheng, et al. Study on existence speciation and distribution characteristics of arsenic and mercury in tin smelting dust[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(10):22-25.

[16] 黄迎红,王亚雄,王维昌. 含铟锡烟尘硫酸氧压浸出提铟试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2011(12):35-38.
HUANG Yinghong, WANG Yaxiong, WANG Weichang. Indium extraction by sulfuric acid pressure-oxidation leaching process from tin dust with indium[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2011(12):35-38.

[17] 施善林,路文,曹昕宇,等. 锡冶炼烟尘中锡、锌、镉的分离回收工艺研究[J]. 湿法冶金, 2024,43(4):380-384.
SHI Shanlin, LU Wen, CAO Xinyu, et al. Separation and recovery of tin, zinc and cadmium from tin smelting dust[J]. Hydrometallurgy of China, 2024,43(4):380-384.

[18] 龙跃,王贵华,杜培培,等. 含铟粉尘的处理工艺现状与展望[J]. 烧结球团, 2024,49(1):1-10.
LONG Yue, WANG Guihua, DU Peipei, et al. Current status and prospect of treatment process for indium-containing dust[J]. Sinter Pellets, 2024,49(1):1-10.

[19] 徐万立,张璋,袁海滨. 锡冶炼烟尘中有害杂质脱出与锡富集研究[J]. 矿冶, 2022,31(1):56-60.
XU Wanli, ZHANG Zhang, YUAN Haibin. Removal of harmful impurities from tin smelting dust and enrichment of tin[J]. Mining and Metallurgy, 2022,31(1):56-60.

引用本文:陈丽诗,李鹏程,伍美珍,等. 锡冶炼烟尘中锡、铟赋存形态及分离富集研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):124-129.
CHEN Lishi, LI Pengcheng, WU Meizhen, et al. Occurrence state of tin and indium in tin smelting dust and corresponding separation method[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):124-129.

(上接第 123 页)

[17] POURRAHIM M, REZAI B, GHARABAGHI M. Comparison of indium and gallium dissolution from zinc oxide concentrate in different acidic solutions[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2017,42(4):1591-1600.

[18] ZHU Y M, GE W C, ZHANG Y, et al. Gallium extraction from red mud via leaching with a weak acid[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024,182:740-751.

[19] 郭庆,陈书文,张军红,等. 微波强化赤泥制备 Fe-Al 基絮凝剂工艺研究[J]. 矿产综合利用, 2019(4):117-121.
GUO Qing, CHEN Shuwen, ZHANG Junhong, et al. Study on preparation of Fe/Al-base flocculant from red mud by microwave[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(4): 117-121.

[20] DING W, XIAO J H, PENG Y, et al. Extraction of scandium and iron from red mud[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2022,43(1):61-68.

[21] 谢元涛,封孝信. 钢渣矿化固化二氧化碳研究现状及展望[J]. 金属矿山, 2023(11):45-54.
XIE Yuantao, FENG Xiaoxin. Research status and prospect of steel slag mineralization for carbon dioxide capture and sequestration[J]. Metal Mine, 2023(11):45-54.

[22] 那迪,刘诚,李杨梅,等. TpBD-3COOH COF 的制备及对废水中罗丹明 B 吸附性能研究[J]. 湿法冶金, 2024,43(2):172-177.
NA Di, LIU Cheng, LI Yangmei, et al. Preparation of TpBD-3COOH COF and the adsorption of rhodamine B in wastewater[J]. Hydrometallurgy of China, 2024,43(2):172-177.

引用本文:郭婷,朱晓波,李望,等. 双酸复配强化浸出赤泥中钒和镓[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):119-123.
GUO Ting, ZHU Xiaobo, LI Wang, et al. Enhanced leaching of vanadium and gallium from red mud with a mixture of acids[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):119-123.