

钒渣高效提取冶金：钠镁复合焙烧提钒工艺

曹 帅¹, 向俊一^{1*}, 黄青云¹, 申 彪², 何文艺², 韦林森³, 吕学伟⁴

(1. 重庆科技大学冶金与动力工程学院, 重庆 401331; 2. 攀钢集团研究院有限公司 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000; 3. 攀钢集团钒钛资源股份有限公司, 四川 攀枝花 617067; 4. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 钒渣钠化焙烧过程中碱土金属会很容易生成难溶于水的钙/镁钒酸盐, 导致钒收率下降。然而, 适量添加氧化镁可诱导生成高溶解度的钠镁复合钒酸盐($\text{Na}_6\text{Mg}_2\text{V}_4\text{O}_{15}$)。基于此, 创新性提出钒渣钠镁复合焙烧提钒工艺。试验结果表明, $\text{Na}_6\text{Mg}_2\text{V}_4\text{O}_{15}$ 在钠化熟料水浸条件($\text{pH}\approx 11$)下表现出优异的溶解性能; 当 Na_2CO_3 配比为 20%、焙烧温度 875 °C 时, 钒渣钠化焙烧钒浸出率最高可达 85.30%; 而采用钠镁复合焙烧, 加入 3% 的 MgO 即可将 Na_2CO_3 配比降至 18%, 并将钒浸出率提升至 90.38%。焙烧熟料和浸出渣的物相分析结果表明, 复合焙烧有效促进了钠镁复合钒酸盐的焙烧转化及浸出。采用低成本镁盐部分替代钠盐进行复合焙烧, 可为钠化提钒工艺降本增效提供新思路。

关键词: 钒渣; 钠镁复合焙烧; 钠化焙烧; 提钒

中图分类号: TF044

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2025)06-0040-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.06.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Efficient metallurgical extraction of vanadium slag: Sodium-magnesium composite roasting vanadium extraction process

CAO Shuai¹, XIANG Junyi^{1*}, HUANG Qingyun¹, SHEN Biao², HE Wenyi², WEI Linsen³, LÜ Xuewei⁴

(1. School of Metallurgy and Power Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China; 2. Pangang Group Research Institute Co., Ltd., State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 3. Pangang Group Vanadium Titanium Resources Co., Ltd., Panzhihua 617067, Sichuan, China; 4. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Alkaline earth metals can easily form water-insoluble calcium/magnesium vanadates during sodium roasting of vanadium slag, leading to a decrease in vanadium recovery rate. However, the moderate MgO addition facilitates the formation of a highly soluble sodium-magnesium vanadate ($\text{Na}_6\text{Mg}_2\text{V}_4\text{O}_{15}$). Based on this discovery, we propose an innovative sodium-magnesium composite roasting process for the vanadium extraction from vanadium slag. Experimental results reveal that $\text{Na}_6\text{Mg}_2\text{V}_4\text{O}_{15}$ exhibits superior dissolution performance under the alkaline leaching conditions ($\text{pH}\sim 11$) of the typical sodium-roasted vanadium slag. The highest vanadium leaching efficiency of 85.30% is obtained under the conventional sodium roasting conditions (20% Na_2CO_3 dosage, 875 °C). By using the composite roasting process with 3% MgO addition, the Na_2CO_3 dosage is reduced to 18% and the leaching rate is increase to 90.38%. Phase composition analysis of the roasted samples and leached residues

收稿日期: 2025-04-07; 修回日期: 2025-04-28; 接受日期: 2025-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(52474323); 重庆科技大学研究生创新计划项目(YKJCX2420201)。

作者简介: 曹帅, 2001 年出生, 男, 重庆涪陵人, 硕士研究生, 研究方向为钒渣提钒, E-mail: 18329667521@163.com; *通讯作者: 向俊一, 1989 年出生, 湖北宜昌人, 博士, 副研究员, 研究方向为钒冶金及新材料制备, E-mail: xiangjunyi126@126.com。

indicates that composite roasting promotes the formation of sodium-magnesium vanadate and its subsequent dissolution. This cost-effective strategy of partially substituting sodium salts with magnesium salts provides a novel approach for optimizing conventional sodium roasting processes, leading to the reduction of costs and increase of efficiency in the sodium vanadium extraction process.

Key words: vanadium slag, sodium-magnesium composite roasting, sodium roasting, vanadium extraction

0 引言

钒渣是钢铁生产过程中产生的典型副产品,也是重要的钒二次资源^[1-3]。在全球经济下行、环境政策趋严^[4]、战略资源需求激增^[5-6]的背景下,如何更经济地实现钒的高效绿色提取,已成为了钒冶金领域的核心挑战。

钠化焙烧—水浸提钒工艺^[7-9]是目前我国乃至全球最普遍采用的钒渣提钒工艺。该工艺通过加钠焙烧将钒转化为可溶性的钒酸钠,然后经水浸和铵盐沉淀得到多钒酸铵,多钒酸铵经煅烧得到氧化钒产品。该工艺具有原料适用性广、氧化钒产品纯度高优势,但长期面临两大瓶颈:其一,高钠盐配比导致焙烧体系易生成低熔点钠硅酸盐^[10],引发物料结块、回转窑结圈^[11]等问题,迫使企业采用返料稀释二次焙烧,严重制约生产效率;其二,尾渣中残留的碱金属钠易引发土壤盐碱化^[12],尽管通过技术升级已实现废水循环,但固废堆存仍存在环境风险^[13]。

从技术原理上看,促进钒渣焙烧过程的可溶性钒酸盐的转化及提高其浸出过程的溶解率是提高钒收率的关键^[14]。生产中常通过二次焙烧、增加钠盐配比或提高焙烧温度来提高钒收率,但高比例钠盐以及高焙烧温度均会很大程度促进低熔点液相的生成,阻碍氧化传质。针对上述问题,学界提出了多种解决思路,如 WEN 等^[15]提出一种钠盐焙烧-硫酸铵浸出体系,使钒转化为可溶性钠盐并高效浸出,提取率达 94.6%。LI 等^[16]采用 NaOH 与 Na₂CO₃ 混合钠盐焙烧-水浸出体系,在最佳条件(850 °C、90 min、15% NaOH、35% Na₂CO₃)下,钒的浸出率达到 95.8%。殷兆迁等^[17]采用精粉钒渣与碳酸钠混合造球焙烧体系,在球团粒径 5 mm、碳酸钠与精粉钒渣比例 26%、焙烧温度 800 °C、焙烧时间 60 min 等条件下,熟料中钒的转浸率达 94% 以上。然而,现有研究多聚焦于钠盐体系内的参数调整,未能突破高钠依赖的技术框架。钠化提钒工艺的诸多弊端均由高比例的钠盐添加引起,那么是否能在保证钒收率的条件下有效降低钠盐用量呢?

传统理论认为,在钠化提钒工艺中钙、镁等碱土金属通常被视为有害元素^[18],因其易与钒形成难溶性钒酸盐^[19-20],从而对水浸效果产生不利影响。因此,实际生产中往往需严格控制原料中碱土金属

的含量。然而,笔者团队研究发现,在适当范围内添加氧化钙或氧化镁反而能够显著提高钒的转化率,该现象与传统认知存在明显差异。基于这一发现,创新性地提出了钒渣钠镁复合焙烧提钒新工艺。首先通过研究钠镁复合钒酸盐(Na₆Mg₂V₄O₁₅)的溶解行为,明确其溶解特性;进而通过焙烧—浸出试验,系统比较钠化焙烧与添加氧化镁的复合焙烧对钒浸出率的影响,以验证钠镁复合焙烧新工艺的可行性。预期为传统钠化提钒工艺“降钠提效”提供新的技术路径。

1 试验部分

1.1 试验原料和仪器

试验所用原料为攀钢转炉钒渣经分选富集后的钒渣,其化学成分如表 1 所示。该钒渣精粉主要物相为 Fe₃O₄、(Mn⁺²,Fe⁺²)(Cr⁺³,V⁺³)₂O₄、Fe₂SiO₄ 和 Fe₂TiO₄ (如图 1 所示)。钠镁复合钒酸盐的合成以及钒渣焙烧所用的试剂样品主要有五氧化二钒(V₂O₅, ≥99.5%,阿拉丁)、碳酸钠(Na₂CO₃, ≥99.8%,麦克林)、氧化镁(MgO, ≥99.0%,麦克林)。

表 1 钒渣精粉化学成分

Table 1 Chemical composition of vanadium slag concentrate %

V ₂ O ₅	TFe	TiO ₂	SiO ₂	MnO	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃
16.50	32.59	10.98	9.99	7.88	2.18	1.86	1.21	1.94

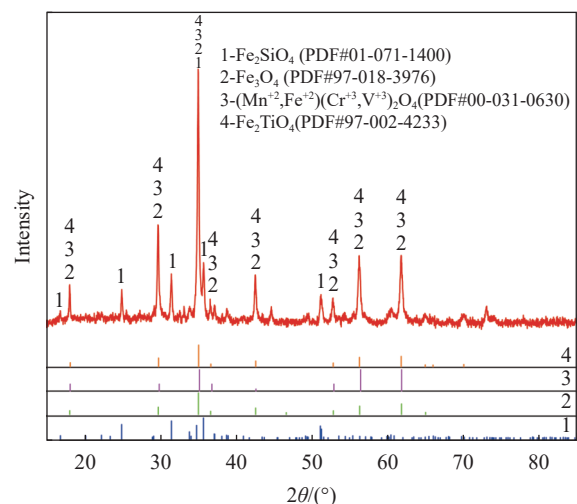


图 1 钒渣精粉 XRD 谱图

Fig. 1 XRD pattern of vanadium slag concentrate

试验所用主要设备为马弗炉(KSL-1200X, 合肥科晶材料技术有限公司);集热式磁力搅拌器(DF-101S, 上海力辰);X射线衍射仪(XRD, X'Pert, 荷兰PANalytical公司);电感耦合等离子发射光谱仪(ICAP 6000, 美国Thermo Fisher Scientific公司)。

1.2 试验方法

钠镁复合钒酸盐的合成:为验证钠镁复合钒酸盐的溶解特性,按化学计量比($n(\text{Na}):n(\text{Mg}):n(\text{V})=6:3:4$)称取 V_2O_5 、 Na_2CO_3 、 MgO ,经充分研磨混合均匀后压制 $\text{O}10\text{ mm}$ 坯块,置于马弗炉中由低温梯级进行煅烧。样品首先在 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 保温 40 h 后,取出样品充分研磨后进行X射线衍射分析,若样品物相不纯则升高 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 继续保温 40 h ,如此反复直至焙烧产物XRD物相稳定。产物经XRD结构精修表明, $750\text{ }^\circ\text{C}$ 合成钠镁复合钒酸盐的主相为 $\text{Na}_6\text{Mg}_2\text{V}_4\text{O}_{15}$ (93.99%)与残余 MgO (6.01%),且进一步升温或延长保温时间未发生相变生成 $\text{Na}_6\text{Mg}_3\text{V}_4\text{O}_{16}$,证实 $\text{Na}_6\text{Mg}_2\text{V}_4\text{O}_{15}$ 为热力学稳定相而非 $\text{Na}_6\text{Mg}_3\text{V}_4\text{O}_{16}$ 。

钠镁复合钒酸盐($\text{Na}_6\text{Mg}_2\text{V}_4\text{O}_{15}$)的浸出试验在集热式磁力搅拌器中进行。试验时首先量取 100 mL 去离子水于烧杯中并加热至 $80\text{ }^\circ\text{C}$,然后采用稀 NaOH 溶液控制 pH 至 11 ,用于模拟钠化焙烧熟料水浸溶液 pH 条件;然后称取 1 g 合成的钠镁复合钒酸盐样品加入至烧杯内进行搅拌浸出。浸出过程中定期采用针式过滤器取样进行钒含量分析。浸出 2 h 后,采用微滤膜对浸出样品进行抽滤,得到浸出液和浸出渣。通过ICP-OES测定浸出液钒浓度,浸出渣经 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 鼓风干燥后进行X射线衍射分析。通过公式(1)计算钒的浸出率。

$$\eta = \frac{V\rho}{mw} \times 100\% \quad (1)$$

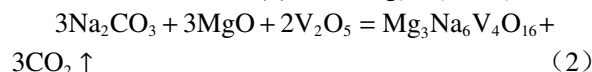
其中 η 表示钒浸出率, $\%$; V 表示浸出液体积, L ; ρ 表示浸出液中钒的浓度, g/L ; m 表示钠镁复合钒酸盐样品(焙烧熟料)的质量, g ; w 表示钠镁复合钒酸盐样品(焙烧熟料)的质量分数, $\%$ 。

钒渣钠化/钠镁复合焙烧-水浸提钒试验流程如下:将钒渣精粉与 Na_2CO_3 、 MgO 按设定比例混合后装入刚玉坩埚,并置于马弗炉中,以 $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温至目标温度($775\text{ }^\circ\text{C}\sim 900\text{ }^\circ\text{C}$),在空气气氛($2\text{ L}/\text{min}$)下保温 2 h 。焙烧熟料冷却后研磨至 $\leq 74\text{ }\mu\text{m}$ 后进行X射线衍射分析与水浸试验。取 10.00 g 熟料与 200 mL 去离子水($80\text{ }^\circ\text{C}\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$)混合,在集热式磁力搅拌器中搅拌浸出 2 h 。浸出浆料经微孔滤膜($0.45\text{ }\mu\text{m}$)洗涤抽滤,浸出液定容后并通过ICP-OES测定钒浓度,浸出渣于 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 干燥 24 h 后进行X射线衍射分析,按式(1)计算钒的浸出率。

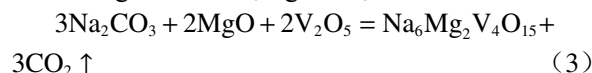
2 结果与讨论

2.1 钠镁复合焙烧提钒基本原理

在钒渣钠化焙烧提钒过程中,普遍认为焙烧过程可溶性钒酸盐的生成是 $\text{Na}_2\text{O}-\text{V}_2\text{O}_5$ 二元系之间的反应。而在 $\text{MgO}-\text{V}_2\text{O}_5$ 二元体系中主要生成三种钒酸盐:偏钒酸镁(MgV_2O_6)、焦钒酸镁($\text{Mg}_2\text{V}_2\text{O}_7$)和正钒酸镁($\text{Mg}_3\text{V}_2\text{O}_8$)。依次在 750 、 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $1150\text{ }^\circ\text{C}$ 熔化并发生分解。当采用钠镁复合焙烧则使简单的 $\text{Na}_2\text{O}-\text{V}_2\text{O}_5$ 二元系转变为 $\text{Na}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{V}_2\text{O}_5$ 三元系。如图2所示,在 $\text{Na}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{V}_2\text{O}_5$ 三元系中可能生成钒酸钠为基础的取代固溶体,如 MgNaV_3O_9 、 $\text{Mg}_3\text{Na}_6\text{V}_4\text{O}_{16}$ 、 $\text{Mg}_4\text{NaV}_3\text{O}_{12}$ 等^[21]。因此钠镁钒酸盐的浸出行为对钒渣钠镁复合焙烧-水浸提钒具有重要的作用。按方程式(2)合成 $\text{Mg}_3\text{Na}_6\text{V}_4\text{O}_{16}$ 。



合成钠镁复合钒酸盐的XRD如图3所示,其主要衍射峰均与 $\text{Na}_6\text{Mg}_2\text{V}_4\text{O}_{15}$ 标准卡片(PDF#00-055-0866)完全匹配,反应方程式如式(3)所示。但同时检测到微量未反应的 MgO 衍射峰,表明固相反应中 MgO 未与 $\text{Na}_6\text{Mg}_2\text{V}_4\text{O}_{15}$ 发生反应。



该钠镁复合钒酸盐($\text{Na}_6\text{Mg}_2\text{V}_4\text{O}_{15}$)的浸出率曲线如图4所示。在浸出初始阶段(10 min),钒浸出率即可超过 70% ;随着浸出时间延长至 120 min ,浸出率持续上升至 90% 以上。进一步对浸出残渣进行物相分析(图3),其XRD图谱显示主要衍射峰归属于 MgO (PDF#04-003-7162),表明合成的钠镁复合钒酸盐($\text{Na}_6\text{Mg}_2\text{V}_4\text{O}_{15}$)在浸出过程中被有效溶解,残留 MgO 来源于固相反应中未参与合成的原料。

2.2 钠化焙烧对钒渣水浸提钒的影响

为建立钠镁复合焙烧工艺的对比基准,首先针对钒渣钠化焙烧工艺进行了试验研究。仅以 Na_2CO_3 为焙烧添加剂,在质量分数分别为 18% 和 20% 两种添加量下,考察了焙烧温度($775\text{ }^\circ\text{C}\sim 900\text{ }^\circ\text{C}$)对钒浸出率的影响,结果如图5所示。试验结果表明,当焙烧温度由 $775\text{ }^\circ\text{C}$ 提高至 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 时,钒浸出率反而略有降低,说明在 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 焙烧温度提升引起的低熔点液相恶化了钒转化的动力学条件, Na_2CO_3 添加量越高,此种抑制现象越明显。继续提升焙烧温度至 $900\text{ }^\circ\text{C}$,虽低熔点液相更多,但在热力学层面高温显著提升了钒转化反应的驱动力,在动力学层面也一定程度上强化了固液界面的传质效率,因此

钒浸出率随焙烧温度的升高整体呈显著上升趋势; 当 Na_2CO_3 的添加量从 18% 增加至 20% 时, 相同焙

烧温度下钒浸出率提高 1~2 个百分点, 其中 900 °C 时最高浸出率达 89.68%。

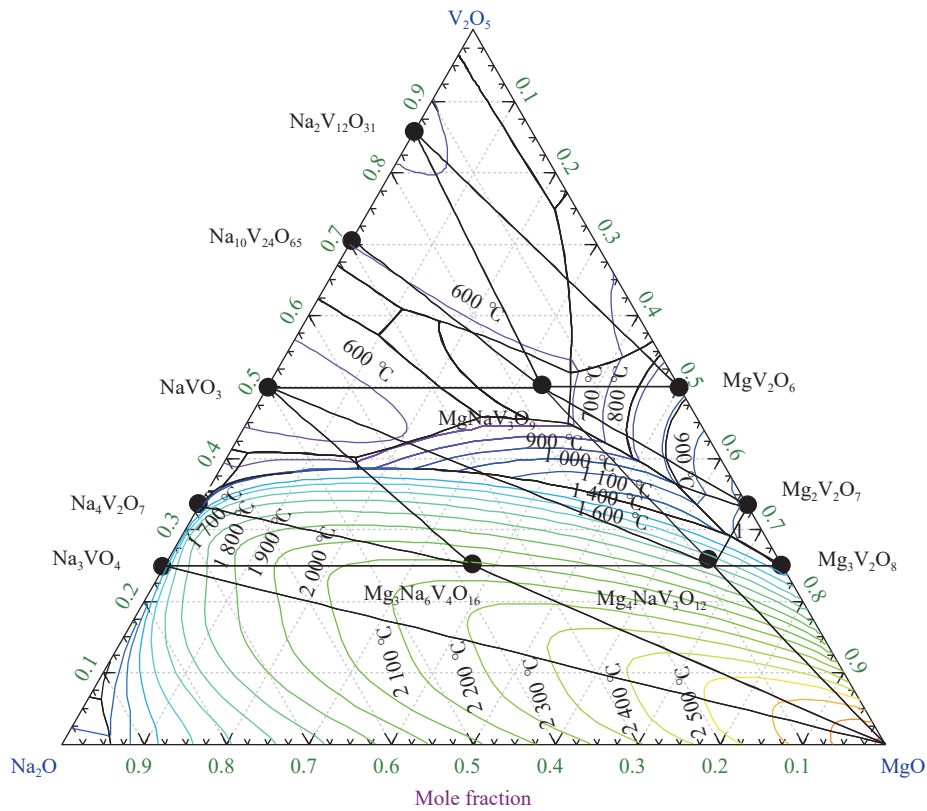


图 2 预测的 $\text{Na}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{V}_2\text{O}_5$ 体系液相投影面^[21]
Fig. 2 The predicted liquid projection of the $\text{Na}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{V}_2\text{O}_5$ system

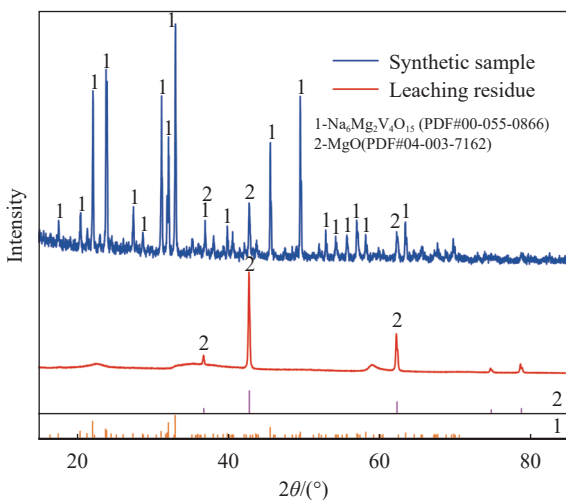


图 3 $\text{Na}_6\text{Mg}_2\text{V}_4\text{O}_{15}$ 及其浸出渣 XRD 图
Fig. 3 XRD patterns of the synthesized $\text{Na}_6\text{Mg}_2\text{V}_4\text{O}_{15}$ and its leaching residue

钠化焙烧熟料及其浸出渣的物相分析结果如图 6 所示。焙烧熟料中主要物相为 Fe_2O_3 、 $\text{NaTi}(\text{Si}_2\text{O}_6)$ 、 $\text{MgFe}_2\text{Ti}_5\text{O}_{10}$ 和 NaVO_3 。可以看出在 $2\theta = 25^\circ \sim 30^\circ$ 对应于 NaVO_3 的特征衍射峰在浸出渣中完全消失,

而 Fe_2O_3 、 $\text{NaTi}(\text{Si}_2\text{O}_6)$ 、 $\text{MgFe}_2\text{Ti}_5\text{O}_{10}$ 的衍射峰位置及强度未发生显著变化。这说明高温钠化焙烧生成的 NaVO_3 已基本被浸出, 而含赤铁矿、钛酸盐等物相在浸出过程中基本保持稳定。

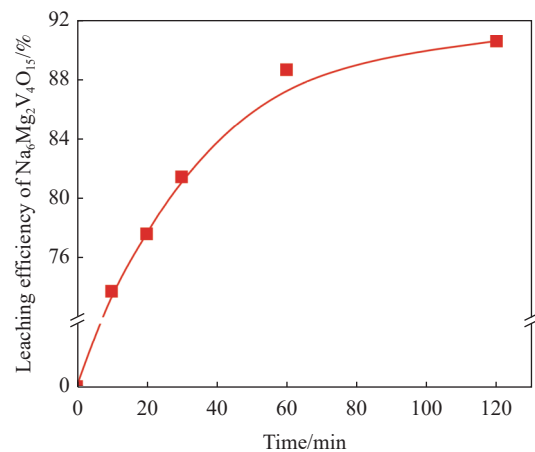


图 4 $\text{Na}_6\text{Mg}_2\text{V}_4\text{O}_{15}$ 在 $\text{pH} \approx 11$ 条件下的浸出率曲线
Fig. 4 Leaching rate curve of $\text{Na}_6\text{Mg}_2\text{V}_4\text{O}_{15}$ under $\text{pH} \approx 11$ condition

2.3 钠镁复合焙烧对钒渣水浸提钒的影响
焙烧温度与添加剂加入量对钒转化存在显著交

互影响。因此,在固定 Na_2CO_3 加入量为18%或20%、 MgO 加入量为3%的条件下,研究了焙烧温度(775~900℃)对钒浸出率的影响。不同温度下钒渣钠镁复合焙烧熟料中钒浸出率变化如图7所示。

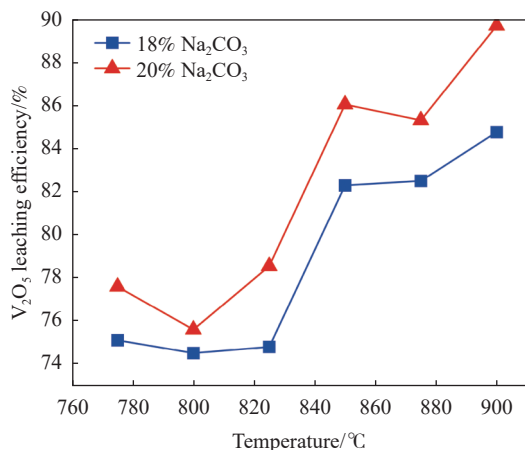


图5 焙烧温度对钒渣钠化焙烧熟料浸出的影响

Fig. 5 Effect of roasting temperature on leaching of sodium roasted vanadium slag

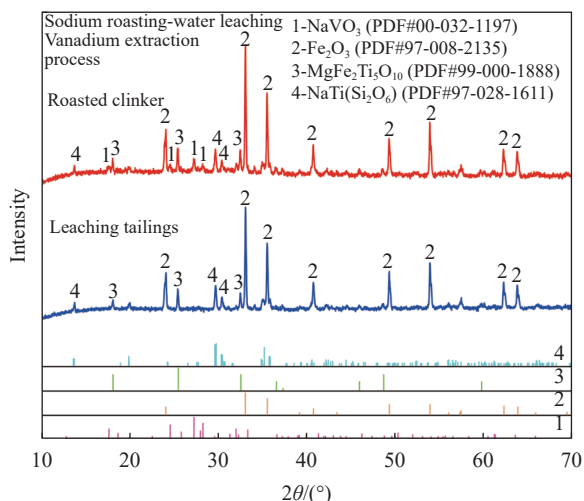


图6 钒渣钠化焙烧熟料和浸出渣 XRD

Fig. 6 XRD patterns of the sodium roasted vanadium slag and leaching residue

由图7可知,在775~900℃的范围内,钒浸出率随焙烧温度升高呈上升趋势。当 Na_2CO_3 加入量为20%时,添加3% MgO 可使钒浸出率在875℃时达到峰值(约91.15%),较相同温度下的纯钠焙烧体系(图5)提高近5.85个百分点。当 Na_2CO_3 加入量为18%,添加3% MgO 时,钒浸出率在875℃时达到90.38%,继续升温至900℃可进一步提升至90.80%。对比图5与图7可知,当焙烧温度为875℃时,添加3%的 MgO 可使 Na_2CO_3 用量从20%降至18%的同时,钒浸出率提升5.08个百分点(从85.30%升至90.38%),达到90%以上。

图8为875℃条件时钒渣钠镁复合焙烧熟料

和浸出渣的XRD图。钠镁复合焙烧熟料的主要物相为 Fe_2O_3 、 $\text{NaTi}(\text{Si}_2\text{O}_6)$ 、 $\text{MgFe}_2\text{Ti}_5\text{O}_{10}$ 、 NaVO_3 ,以及微量相 $\text{Na}_6\text{Mg}_2\text{V}_4\text{O}_{15}$ 。浸出渣中 NaVO_3 和 $\text{Na}_6\text{Mg}_2\text{V}_4\text{O}_{15}$ 的衍射峰完全消失,而 Fe_2O_3 、 $\text{NaTi}(\text{Si}_2\text{O}_6)$ 和 $\text{MgFe}_2\text{Ti}_5\text{O}_{10}$ 的峰位保持不变。这一结果证实: MgO 的添加不仅通过固相反应促进部分钒向水溶性钠镁复合钒酸盐($\text{Na}_6\text{Mg}_2\text{V}_4\text{O}_{15}$)转化,还显著提升了其在浸出过程中的溶解效率。

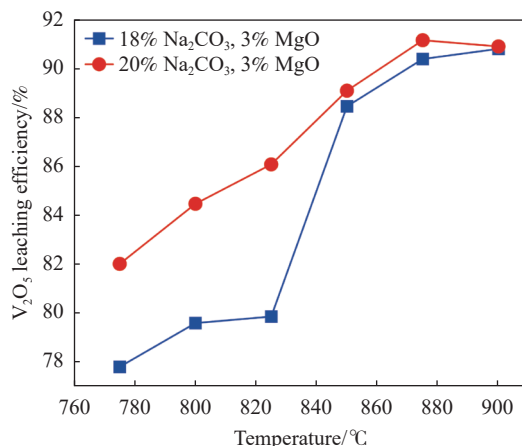


图7 焙烧温度对钒渣钠镁复合焙烧熟料浸出的影响

Fig. 7 Effect of roasting temperature on leaching of sodium-magnesium roasted vanadium slag

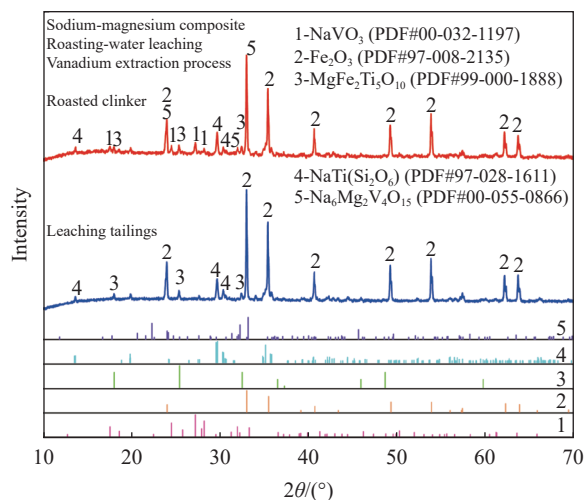


图8 钒渣钠镁复合焙烧熟料和浸出渣 XRD

Fig. 8 XRD patterns of the sodium-magnesium roasted vanadium slag and leaching residue

2.4 钠镁复合焙烧-水浸提钒工艺设计

基于上述试验结果,提出如图9所示的钒渣钠镁复合焙烧-水浸提钒新工艺。具体流程包括混料、复合焙烧、水浸提钒、固液分离、铵盐沉钒等。其中最关键的是通过配入钠盐(Na_2CO_3)与镁盐(MgO)实现钠镁复合焙烧,将钒渣中的钒铁尖晶石转化为可溶性的钒酸钠和钠镁复合钒酸盐,从而实现钒的高效焙烧转化与有效转浸。

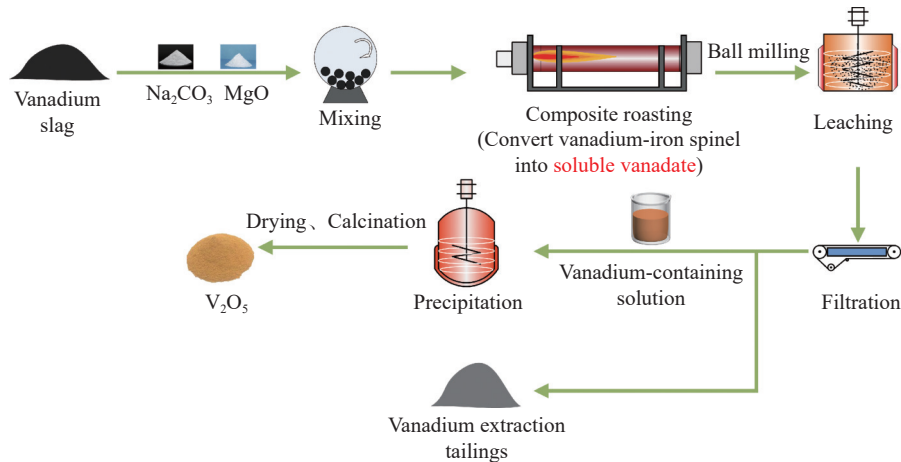


图 9 钠镁复合焙烧-水浸提钒工艺流程

Fig. 9 Flowchart of the sodium-magnesium composite roasting - water leaching vanadium extraction process

相较于传统钠化焙烧工艺, 该工艺凭借钠镁协同效应实现了多方面的指标突破。以 1 t 钒渣用 20% Na_2CO_3 添加量和 18% Na_2CO_3 , 3% MgO 添加量为例, 绘制雷达图(图 10)进行多维对比分析, 可知 Na_2CO_3 添加量降幅达 10%(由 20% 降低至 18%), 钒浸出率反而从 85.30% 提高至 90.38%。同

时, 以价格较低的镁基辅料(约 400 元/t)替代部分高价钠盐(Na_2CO_3 , 2 000 元/t), 使吨钒渣添加剂成本从 400 元/t_渣降至 372 元/t_渣, 下降 7%。此外, 由于钠盐用量减少, 浸出渣中碱金属钠含量相应降低, 更有利于提钒尾渣的后续规模化利用。

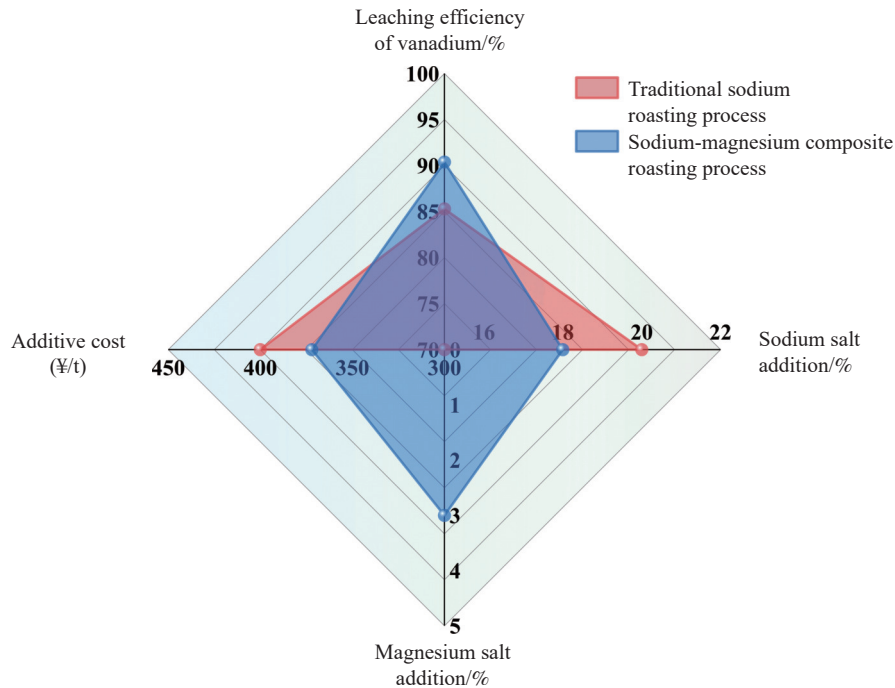


图 10 钠镁复合焙烧与传统钠化焙烧工艺的雷达图对比

Fig. 10 Radar chart comparison between sodium-magnesium composite roasting and conventional sodium roasting processes

3 结论

1) 通过固相反应法成功合成了钠镁复合钒酸盐($\text{Na}_6\text{Mg}_2\text{V}_4\text{O}_{15}$), 该化合物在碱性浸出条件(pH ~

11)下表现出较高溶解度, 钒浸出率达 90% 以上。

2) 与钠化焙烧相比(20% Na_2CO_3 , 875 °C), 引入 3% MgO 的复合焙烧体系, 在 875 °C 下可将 Na_2CO_3 用量降低至 18%, 降幅达 10%, 同时钒浸出率提升

5.08%(从 85.30% 至 90.38% 以上), 复合焙烧熟料中生成了 $\text{Na}_6\text{Mg}_2\text{V}_4\text{O}_{15}$ 并在浸出过程中被有效溶出。

3) 采用廉价的氧化镁部分替代碳酸钠进行复

合焙烧, 不仅降低了钠盐消耗, 还将钒浸出率提升至 90% 以上, 显著提升了工艺经济性与环境友好性, 为钒提取冶金提供了新思路。

参考文献

- [1] DONG Z H, YANG R L, YANG R C, *et al.* Research progress on the comprehensive utilization of converter vanadium slag[J]. *Sustainable Mining and Metallurgy*, 2024, 40(4): 18-23,31.
(董自慧, 杨瑞兰, 杨瑞臣, 等. 转炉钒渣综合利用研究进展[J]. *绿色矿冶*, 2024, 40(4): 18-23,31.)
- [2] GAO F, OLAVIWOLA A U, LIU B, *et al.* Review of vanadium production part I: primary resources[J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2022, 43(4): 466-488.
- [3] NASIMIFAR A, MEHRABANI J V. A review on the extraction of vanadium pentoxide from primary, secondary, and co-product sources[J]. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 2022, 56(4): 361-382.
- [4] JIA L, ZHANG Y, TAO L, *et al.* A methodology for assessing cleaner production in the vanadium extraction industry[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 84: 598-605.
- [5] SIMANDL G J, PARADIS S. Vanadium as a critical material: economic geology with emphasis on market and the main deposit types[J]. *Applied Earth Science*, 2022, 131(4): 218-236.
- [6] RODDY K E, JAFFE R L, OLIVETTI E A, *et al.* Materials availability and supply chain considerations for vanadium in grid-scale redox flow batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2023, 560: 232605.
- [7] BLEECKER W F. Process of producing copper, lead, or iron vanadate from vanadiferous ores: U. S. Patent 1, 015, 469[P]. 1912-1-23.
- [8] JENA P K, BROCCHI E A. Halide metallurgy of refractory metals[J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 1992, 10(1): 29-40.
- [9] LI H Y, FANG H X, WANG K, *et al.* Asynchronous extraction of vanadium and chromium from vanadium slag by stepwise sodium roasting-water leaching[J]. *Hydrometallurgy*, 2015, 156: 124-135.
- [10] LI L J, CHEN D H, BAI R G, *et al.* Research progress of extraction technology for vanadium & chromium from vanadium slags[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2013(2): 7-11.
(李兰杰, 陈东辉, 白瑞国, 等. 钒渣中钒铬提取技术研究进展[J]. *矿产综合利用*, 2013(2): 7-11.)
- [11] WANG Y. Low-temperature reduction degradation behavior of vanadium-titanium pellet in $\text{H}_2\text{-CO}$ mixtures[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
(王月. $\text{H}_2\text{-CO}$ 作用下钒钛矿球团低温还原粉化行为研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.)
- [12] JIN E G, ZHOU Y, CHEN J, *et al.* Research progress on treatment and resource utilization technology of manure and sewage in dairy farm[J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2019, 41(1): 82-87.
(金尔光, 周源, 陈洁, 等. 奶牛场粪污处理与资源化利用技术研究进展[J]. *畜牧与饲料科学*, 2020, 41(1): 82-87.)
- [13] HU P W, XIE Z C, HU B, *et al.* Comprehensive utilization status and development of vanadium-bearing solid wastes[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2020, 40(5): 144-152.
(胡佩伟, 谢志诚, 胡兵, 等. 含钒固废综合利用现状及发展[J]. *矿产保护与利用*, 2020, 40(5): 144-152.)
- [14] WANG X. Study on extraction of vanadium from vanadium slag through composite roasting with CaO/MgO and acid leaching process[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
(王鑫. 钒渣钙镁复合焙烧-酸浸提钒工艺研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.)
- [15] WEN J, JIANG T, XU Y, *et al.* Efficient extraction and separation of vanadium and chromium in high chromium vanadium slag by sodium salt roasting- $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ leaching[J]. *Journal of industrial and engineering chemistry*, 2019, 71: 327-335.
- [16] LI M, XIAO L, LIU J J, *et al.* Effective extraction of vanadium and chromium from high chromium content vanadium slag by sodium roasting and water leaching[C]//*Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd., 2016, 863: 144-148.
- [17] YIN Z Q, LI Q W, FU Z B, *et al.* Technology research on sodium salt roasting of vanadium slag pellet[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2016, 37(1): 12-15, 20.
(殷兆迁, 李千文, 付自碧, 等. 钒渣钠化球团化焙烧技术研究[J]. *钢铁钒钛*, 2016, 37(1): 12-15, 20.)
- [18] LI W. Study on the reaction behavior in sodium roasting of high vanadium slag[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
(李尉. 高钒渣钠化焙烧反应行为研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.)
- [19] YANG M, YANG H, TIAN S, *et al.* Effect of mechanical activation on extraction of vanadium from chromium-containing vanadate solution by calcification and carbonization[J]. *Hydrometallurgy*, 2021, 201: 105591.
- [20] LIU D, XUE X X, YANG H. Reaction mechanism of magnesium in roasting of vanadium slag[J]. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 2020, 92(2): e20181062.
- [21] PEI G S. Thermodynamic modeling of $\text{CaO-MgO-R}_2\text{O-V}_2\text{O}_5$ ($\text{R}=\text{Li, Na, K, Rb, and Cs}$) systems and its applications[D]. Chongqing: Chongqing University, 2023.
(裴贵尚. $\text{CaO-MgO-R}_2\text{O-V}_2\text{O}_5$ ($\text{R}=\text{Li, Na, K, Rb}$ 和 Cs) 体系热力学模型构建及其应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2023.)