从含钒钢渣中湿法提取钒的工艺研究进展

王泽锟[1,2]，王　乐[1,2]，李运刚[1,2]

(1. 华北理工大学 冶金与能源学院，河北 唐山　063000
2. 华北理工大学 现代冶金技术教育部重点实验室，河北 唐山　063000)

摘要：含钒钢渣是富含高价值元素的工业废料，具有显著的二次利用价值，因此如何低成本、高效率回收钢渣中的钒资源是我国钒产业需要攻克的关键难题之一。综述了从含钒钢渣中湿法提钒技术研究现状，介绍了焙烧—浸出、直接浸出工艺研究进展，并对其他新型提钒工艺和强化提钒辅助方法进行了分析，最后对比了各类工艺的优缺点，并对未来发展趋势进行了展望。

关键词：钒；含钒钢渣；浸出；湿法提取；研究现状

中图分类号：TF841.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1009-2617(2026)01-0001-09

DOI：10.13355/j.cnki.sfyj.2026.01.001

钒是一种具有优异物理化学性质的稀有金属，且通常以伴生矿形式存在，如钒钛磁铁矿与石煤等，目前并没有发现单独存在的钒矿。随着我国航天、铁路、汽车等领域的快速发展，市场对钒制品的需求量也日益增加[1]。含钒钢渣主要来源于钒钛磁铁矿冶炼和含钒铁水的炼钢过程。近些年，随着钢铁产能提升，含钒钢渣产量增加。含钒钢渣中含钒1%～5%，低于转炉钒渣，但远高于石煤[2-4]，具有一定回收价值。

含钒钢渣提钒工艺主要分为火法与湿法，火法回收率低，烟尘排放量大，焦炭与电能消耗量大，相对而言，湿法更具优势[5-7]。随着各国对工业废气、废渣排放的要求日益严格，以及我国双碳政策的实施，含钒钢渣湿法提钒工艺成为了我国钒产业发展的重要举措。

1　含钒钢渣概述

近年来，随着钢铁产能的持续提升，钒钛磁铁矿冶炼过程中产生的含钒钢渣成为了钒的重要二次资源[8-9]。钒钛磁铁矿主要化学成分见表 1[8]。

表 1　钒钛磁铁矿的主要化学成分[8]

Table 1　Main chemical components of vanadium-containing steel slag[8]　%

CaO	∑Fe	TiO_2	MgO	SiO_2	V_2O_5
1～5	25～35	8～15	2～6	3～10	0.2～0.5

含钒钢渣是钒钛磁铁矿冶炼得到的副产物，钒品位较低，且主要赋存于钒酸盐、尖晶石相和氧化物中，须通过钙盐焙烧—酸浸或强化浸出等工艺提取，回收难度较高[10-14]。

含钒钢渣可分为含钒铁水炼钢废渣和钒铁合金冶炼渣等。由于冶炼工艺不同，其化学成分与矿相存在显著差异(表 2)。

表 2　不同含钒钢渣主要化学成分及矿相差异

Table 2　Main chemical composition and phase differences of various vanadium-containing steel slags

来源类型	主要化学成分	典型物相构成	钒赋存形态
含钒铁水炼钢废渣	FeO、V_2O_5、TiO_2等	硅酸二钙、硅酸三钙、钒酸盐	钒取代 Fe、Mg 进入 RO 相或存在于硅酸盐中
钒铁合金冶炼渣	SiO_2、Al_2O_3、V_2O_5等	钒尖晶石、钒氧化物	部分钒被氧化进入渣相或赋存于尖晶石相中

不同来源的含钒钢渣在化学成分和物相构成方面存在的差异会直接影响后续提钒工艺的选择与提取效率的高低。含钒铁水炼钢废渣中的钒被硅酸盐包裹，结构稳定，须通过高温氧化焙烧破坏

收稿日期：2025-06-04；**修订日期**：2025-09-05

基金项目：国家自然科学基金资助项目(52174314)。

第一作者简介：王泽锟(1999—)，男，硕士研究生，主要研究方向为资源综合利用。

通信作者简介：王乐(1985—)，男，博士，副教授，主要研究方向为湿法冶金及资源综合利用。E-mail：wangl@ncst.edu.cn。

矿物结构，释放出可溶性钒酸盐[15-17]；钒铁合金冶炼渣中，钒主要以氧化物形式存在，部分钒赋存于尖晶石相中，分离困难[17-19]。

2 含钒钢渣的湿法提钒工艺

2.1 焙烧—浸出工艺

焙烧—浸出工艺是目前从钢渣中回收钒的主要方法，并被广泛应用于工业生产中。钢渣中钒的赋存形式多为钒酸钙，也有部分低碱度渣中的钒以类质同象形式赋存于硅酸盐矿物中，性质非常稳定。通过高温焙烧并添加金属盐可将钒转化为可溶钒化合物，后经酸浸、碱浸或水浸等溶解钒，最后再分离与富集得到钒产品，目前已有钠化焙烧、钙化焙烧和空白焙烧等多种工艺。

2.1.1 钠化焙烧—浸出

钠化焙烧是工业提钒主流工艺之一，通常以 Na_2CO_3、Na_2SO_4 和 NaCl 等钠盐为添加剂，将低价钒氧化为五价水溶性钒酸盐，后经浸出、沉淀和煅烧等工序处理焙烧渣来获取 V_2O_5[20]，工艺流程如图 1[1] 所示。

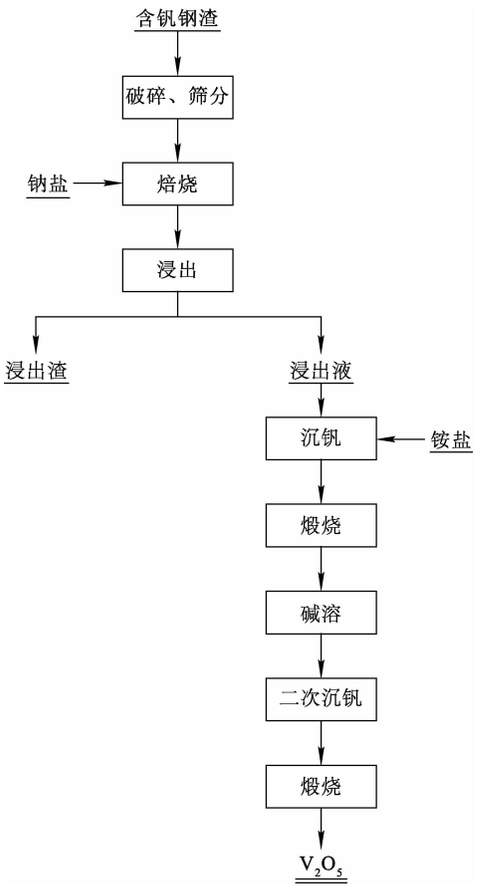


图 1 钠化焙烧—浸出提钒工艺流程[1]

Fig. 1 Process flowchart of sodium roasting-leaching vanadium[1]

以添加 Na_2CO_3 为例，焙烧及浸出过程中所涉及的主要反应如式(1)、(2)所示。

焙烧：

$$V_2O_5+Na_2CO_3\longrightarrow 2NaVO_3+CO_2 \quad (1)$$

沉钒(以 NH_4Cl 为例)：

$$NaVO_3+NH_4Cl\longrightarrow NH_4VO_3+NaCl \quad (2)$$

钠化焙烧生成的钒酸钠盐($NaVO_3$、Na_3VO_4 和 $Na_4V_2O_7$)可溶于水，进而将钒从钢渣中提取出来[21]，水浸反应如式(3)～(5)所示。

$$NaVO_3+H_2O\longrightarrow H_2VO_4^-+Na^+ \quad (3)$$

$$Na_3VO_4\longrightarrow VO_4^{3-}+3Na^+ \quad (4)$$

$$Na_4V_2O_7+H_2O\longrightarrow 2HVO_4^{2-}+4Na^+ \quad (5)$$

钠化焙烧—浸出工艺具有高普适性、高转化率等优点，适用于工业生产；但以氯化钠、硫酸钠为添加剂焙烧时，会产生氯气、二氧化硫等有害气体[22-23]；此外，含钒钢渣中大量氧化钙会参与反应，使钠化效率降低，且浸出时会产生高盐废水，处理困难，易造成环境污染。因此，钠化焙烧—浸出工艺不适用于高钙钢渣[24]。

2.1.2 钙化焙烧—浸出

钙化焙烧工艺是在钢渣焙烧时通过添加 CaO、$CaCO_3$ 等，使钒从尖晶石中析出并形成含钒钙盐，后续再经浸出、除杂、煅烧等工序处理得到 V_2O_5[25]。以 CaO 为例，钙化焙烧可分为 4 个主要阶段，化学反应方程式如式(6)～(12)所示。

FeO 的氧化(300 ℃)：

$$4FeO+O_2\longrightarrow 2Fe_2O_3 \quad (6)$$

橄榄石的氧化分解(400～500 ℃)：

$$2Fe_2SiO_4+O_2\longrightarrow 2Fe_2O_3+2SiO_2 \quad (7)$$

尖晶石的氧化分解(500～600 ℃)：

$$2FeV_2O_4+2FeO+3O_2\longrightarrow 2Fe_2O_3+2V_2O_5 \quad (8)$$

钒酸钙的形成(600～800 ℃)：

$$Fe_2O_3+V_2O_5\longrightarrow 2FeVO_4 \quad (9)$$

$$2FeVO_4+CaO\longrightarrow CaV_2O_6+Fe_2O_3 \quad (10)$$

$$VO_2+CaO\longrightarrow CaVO_3 \quad (11)$$

$$V_2O_5+3CaO\longrightarrow Ca_3V_2O_8 \quad (12)$$

钙化焙烧渣通常用硫酸浸出，浸出液中离子形态由浸出液 pH 和钒浓度决定[26]。25 ℃下，水溶液中钒形态与钒浓度、pH 的关系如图 2 所示。

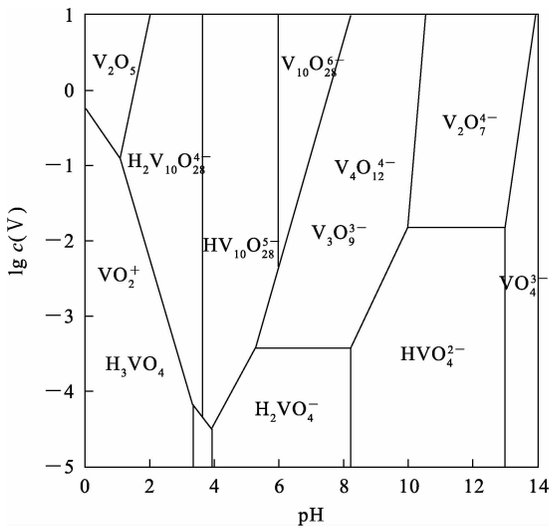


图 2　水溶液中钒形态与 lg c(V)-pH 关系[26]

Fig. 2　Relationship of state of vanadium in aqueous solution between lg c(V) and pH value[26]

相较于钠化焙烧—浸出工艺，钙化焙烧—浸出工艺有效避免了有害气体的产生，使用钙基添加剂成本更低且焙烧渣不含钠盐，有利于资源综合利用；但对于高磷含钒钢渣中的磷去除困难，易导致处理成本偏高，因此该工艺存在一定应用局限性不适于处理高磷含钒钢渣[27-28]。

2.1.3　空白焙烧—浸出

空白焙烧—浸出工艺是在不加任何添加剂条件下，将含钒钢渣在空气气氛中进行焙烧，通过破坏含钒物相结构，使钒尖晶石释放出来，之后再与氧气接触反应，使低价钒从中释放出来，再用硫酸浸出获得 V_2O_5[29-30]。

与钠化焙烧—浸出、钙化焙烧—浸出工艺相比，空白焙烧—浸出工艺简化了提钒流程，同时也降低了生产成本、减少了有害气体的排放与废渣的产生，且焙烧渣可作为炼铁的原料和添加剂；但此法与钠化焙烧—浸出、钙化焙烧—浸出工艺相比，提钒效率较低，不适用于大规模工业生产。

2.2　直接浸出工艺

2.2.1　直接酸浸

直接酸浸工艺具有流程简单、成本低廉等优点，是含钒钢渣提钒的一种常用工艺。其基本原理是用硫酸等与含钒钢渣矿物相反应直接溶解钒，实现由固相到液相的转化，再通过分离、纯化工序获得钒产品。

叶国华[31]在常温常压下使用硫酸直接浸出含钒钢渣，在液固质量比为 4∶1，硫酸用量 90%、浸出时间 2 h 最佳条件下，钒浸出率可达 94.1%。该法流程简单且浸出率高，但酸耗量大，成本较高。为进一步节约成本并增强提钒效果，科研人员探索了一种“以废治废”的新思路，即使用钛白粉生产过程产出的废液浸出含钒钢渣[32-33]。如 Ju J. R. 等[34]用钛白废酸浸出含钒钢渣提取钒，在优化条件下，钒提取率可达99.42%，钢渣中的锰、钙、铬等有价金属也可回收制成硬石膏产品。该工艺所用钛白废酸含有部分游离硫酸，降低了新酸使用量，节约了成本，且能通过优化工艺条件实现钒的高效回收，从经济与环保角度具有明显优势，是资源综合利用领域的重要实践。

直接酸浸含钒钢渣可获得较高的钒转化率；但部分钢渣中氧化钙含量高，在浸出时会优先反应，消耗大量酸；此外，直接酸浸会溶出 Fe、Mn、Cr 等重金属元素，尤其是毒性高的 Cr^{6+}，还需后续进行还原—沉淀处理，导致成本增加。

2.2.2　直接碱浸

钒在钢渣中价态丰富且赋存形式复杂，如 $Ca_3(VO_4)_2$、$FeVO_4$ 等钒化合物能直接被酸溶解，而被非晶态硅酸盐包裹的玻璃相钒化合物难以被酸渗透，须通过碱浸提取。

高明磊等[35]研究了高碱度 NaOH 介质的浸出行为，在常温常压下，用 65%～90%的氢氧化钠溶液直接浸出含钒钢渣，洗涤后尾渣中钒质量分数仅为 0.3%～0.6%，钒单次回收率为 85%～90%，高浓度碱溶液可有效溶解多种赋存形式复杂的钒，且浸出渣中含钒量极低，钒浸出率更高。碱浸法对碱浓度、浸出温度、粒度、液固体积质量比等条件要求较高。其中，浸出温度对钒浸出率的影响尤为显著，钒浸出率会随温度升高而明显升高，这归因于阿伦尼乌斯方程中的速率常数对温度呈指数依赖关系。

为了进一步优化工艺，Wan J. F. 等[36]提出了碱性水热氧化提钒方法并分析了 NaOH 溶液浸出含钒钢渣的机制。在 NaOH 溶液浓度 40%、粒度介于 49～75 μm 之间、温度 200 ℃、氧气分压0.2 MPa、液固质量比 4∶1、搅拌速度 500 r/min 条件下，钒浸出率为 88.1%。水热环境可使 O_2 的氧化能力增强，促进更多低价钒被氧化为 V^{5+}，并生成 $NaVO_3$ 溶于碱性溶液，同时 Fe、Ca 被转化为不溶性沉淀，避免与钒竞争溶解，而 Si 被部分溶解，以 Na_2SiO_3 形式存在，但高碱度可抑制其胶体化。该法不同于传统方法，

提取低价钒时无须额外添加氧化剂，能为难处理含钒固废的资源化提供一种新思路。

碱浸法相较于酸浸法能溶解更多赋存形式复杂的钒化合物，且碱性环境能够抑制杂质元素的溶出，实现钒的选择性浸出；但碱浸废水含大量 Na^+ 和 Cl^-，直接排放易导致土壤盐渍化，且采用铵盐沉钒时，废水中含 NH_4^+，需进行处理，以避免引发富营养化。

2.3 新型提钒工艺

2.3.1 生物浸出

生物浸出是指利用微生物的代谢能力促进矿石或废料中金属化合物的溶解来达到回收有价元素的目的。已有研究表明，生物浸出工艺可用于从含钒物料中回收钒。如 Li J. X. 等[37]研究了用亚铁氧化酸杆菌(*Acidithiobacillus ferrooxidans*)对含钒资源的浸出行为及机制。结果表明，亚铁氧化酸杆菌能浸出熟料中约 59.0%的钒，但对钢渣和钒钛磁铁矿中钒的浸出率较低，分别为 23.0%和12.0%，且浸出液中经常存在有毒的 V^{5+} 和 Cr^{4+}。Wang G. Y. 等[38]研究了洛希希瓦氏菌 PV-4(Shewanella loihicaPV-4)对钒和铬离子的还原效果。结果表明：洛希希瓦氏菌可同时还原 V^{5+} 和 Cr^{4+}；反应 27 d 后，V^{5+} 与 Cr^{4+} 提取率分别为 71.3%和 91.2%。洛希希瓦氏菌 PV-4 是一种厌氧还原菌，能通过外膜细胞色素和电子传递链将高价金属(V^{5+}、Cr^{4+})还原为低价态，促进沉淀；该菌株在复杂多金属环境中具有一定的适应性，适合处理废水、废渣。

生物浸出工艺具有操作简单、绿色环保等优点，越来越受到广泛关注。而钢渣、粉煤灰等冶炼副产品本身就存在一些微生物，这也为生物浸出提供了可行性。

2.3.2 亚熔盐法

亚熔盐提钒工艺是推行的一种全新清洁提钒技术。该技术主要以高化学性和高活跃性的高浓度金属碱(KOH、NaOH 等)作为媒介，在温和条件下分解钒矿物，并消除原料中的硅酸钙等物质，使钒转化为钒酸盐，实现钒的选择性溶出[39]。

Liu B. 等[40]研究了用 $NaOH\text{-}NaNO_3$ 二元熔盐体系在液固体积质量比 4∶1、碱盐质量比1∶1、温度 400 ℃、氧气流速 0.5 L/min、反应 6 h 条件下从钒渣中提取钒。结果表明：$NaOH\text{-}NaNO_3$ 混合熔盐在 400 ℃下会形成液相，$NaNO_3$ 作为氧化剂，通过释放活性氧将低价钒直接氧化为水溶性 $NaVO_3$，大幅减小能耗；且 NaOH 提供的碱性环境能促进钒酸盐生成，同时抑制硅、铝等杂质溶出；$NaNO_3$ 氧化剂与熔盐介质的协同作用能避免单独使用强氧化剂的危险性。

高明磊等[41]分别研究了用 KOH、NaOH 亚熔盐体系从含钒钢渣中提取钒的转化机制。结果表明：在碱矿质量比 4∶1、碱浓度 80%条件下，钒的钾系和钠系转化率分别为 97%和 85%；在钾系与钠系亚熔盐体系中浸出时，含钒钢渣中的钒直接渗透进入溶液，但由于钒在高碱性体系中易形成可溶性钒酸盐，导致溶液中钒浓度较低，很难被分离，同时浸出液还含有大量 $Ca(OH)_2$、K 和 Na，导致去除成本增加。

亚熔盐法能从含钒钢渣和钒渣中选择性溶解钒，同时还能抑制硅、铝等杂质元素溶出，反应温度也远低于传统焙烧工艺，能耗较低；此外，反应产出的废渣稳定性较高，且无 Cl_2、SO_2 等有害气体排放，符合安全清洁生产要求，有望替代传统高污染提钒技术。但高温碱性环境对反应釜腐蚀严重，维护成本较高，熔盐中还含有未反应的 NaOH 及 $NaNO_3$ 分解产物，循环利用难度大，有待突破腐蚀与盐回收瓶颈。

2.4 常规湿法提钒工艺对比分析

含钒钢渣湿法提钒工艺的适用性与局限性见表 3，浸出液除杂难度、沉钒效率、废水处置等关键要素对比分析结果见表 4。

表 3 含钒钢渣湿法提钒工艺的适用性与局限性

Table 3 Applicability and limitations of wet vanadium extraction processes from vanadium-containing steel slag

方法	适用性	局限性
钠化焙烧—浸出	适用于低价态钒，钙会生成不溶的硅酸钙，减少对钒的包裹	钙渣量大，能耗高，具有污染风险
钙化焙烧—浸出	适用于高钙钢渣，对硅酸盐包裹的钒释放效果较好	酸耗高，存在杂质问题
空白焙烧—浸出	工艺简单，适合小规模应用	酸耗高，提钒效率低
直接酸浸	流程短，成本低，、适合小规模应用	浸出效率低，酸耗较大
直接碱浸	对低钙渣效果较好，条件温和	成本高，存在硅溶解问题
生物浸出	适合处理低品位渣或尾渣，条件温和	周期长，菌种敏感
亚熔盐法	适用于高钙、高硅渣，复杂多金属渣	碱耗高，存在腐蚀及杂质控制问题

表 4　含钒钢渣湿法提钒工艺的关键要素对比分析

Table 4　Comparative analysis of key elements in wet process for vanadium extraction from vanadium-containing steel slag

方法	浸出液除杂难度	废水处置	尾渣处理	结圈风险	沉钒效率	添加剂循环
钠化焙烧—浸出	中高（含 Cr^{6+}）	高盐废水难处理	需洗涤/固化	高	高	部分可循环
钙化焙烧—浸出	高（Fe、Al 干扰）	酸性废水中和	稳定，可用于建材行业	低	中	难循环
空白焙烧—浸出	极高（多金属）	钒酸盐废水可重复使用	可与炼铁工艺结合利用	低	中	部分可循环
直接酸浸	极高（多金属）	废酸污泥量大	含重金属，需固化	无	偏低	无循环
直接碱浸	极高（选择性好）	需中和碱性废水	含重金属，需固化	无	中	无循环
生物浸出	低（选择性好）	废水成分简单	无害	无	低	无添加剂
亚熔盐法	中（硅铝杂质）	碱性废水易回用	无害	无	高	可循环

2.5　强化提钒辅助方法

2.5.1　微波辅助加热

含钒钢渣具有良好的微波吸收性能，因此利用微波辅助加热技术强化提钒越来越受到关注。

闫一诺等[42]在温度 1 000 ℃、配钙比 8% 条件下，对含钒钢渣微波焙烧处理 3 h 后，研究了各因素对焙烧渣中钒浸出效果的影响。结果表明：在浸出温度 90 ℃、液固质量比为 10∶1、浸出时间 60 min、硫酸浓度 35% 条件下，钒浸出率为 80.25%，比未用微波辅助加热的钒浸出率有明显提升；该法通过添加过量钙化合物，使得钢渣中的钒完全转化为稳定的钙化钒酸盐，避免了后续酸浸时钒的再反应。Tian L. 等[43]对比研究了微波辅助加热和电辅助加热工艺对含钒钢渣中钒提取的影响。结果表明：在获得相同浸出率时，微波加热所需时间是电加热的一半，这是因为电加热须通过热传导加热钢渣整体矿相，而微波直接作用于反应体系，能快速提升目标物质的反应活性，实现选择性加热，且能量利用率可达 80.0% 以上。

微波辅助加热工艺通过分子极化作用直接加热物料，能量利用率高且升温速度快，可显著缩短反应时间。微波辅助加热能选择性加热介电损耗高的含钒矿物，在减少杂质溶解的同时促进含钒钢渣中钒的溶出。但强酸环境结合微波辐射可能加剧设备腐蚀或产生有害气体，致使微波反应器需耐酸腐蚀和高温，因此能否在工业上得到广泛应用，仍需进一步研究。

2.5.2　原料预处理

原料预处理强化提钒的核心是通过物理、化学等手段，改变含钒钢渣的物相结构或钒的赋存状态，使其在后续浸出、分离步骤中更易释放钒元素，从而提高回收率和降低能耗。

高明磊[44]对含钒钢渣进行破碎、球磨、过筛预处理后，再用稀盐酸浸出钒，通过改变含钒钢渣表面矿相结构增加固液反应面积，从而加快反应速率，实现钒的高效回收。Odebiyi 等[45]对含钒钢渣进行球磨处理后用水浸回收钒，在球径 10 mm、球磨时间 30 min、浸出温度 90 ℃ 条件下，钒回收率高于 82.5%。

谢禹等[46]研究了用磁选技术提取并回收含钒钢渣中的铁，再采取摇床重筛的方式进行脱钙。该法是在分析原料特性及其反应动力学基础上，采用分步浸出工艺实现钒与铁、镁等杂质的初步分离，之后再进行二次酸浸，创新性地在萃取与反萃工序之间增设了有机相洗涤环节，最终通过煅烧制备了高纯钒产品。该分步浸出工艺不仅降低了酸用量、提高了过程可控性，还能副产优质铁精矿；而新增的有机相洗涤步骤既能实现钒的富集，又可彻底去除杂质，为钒资源回收提供了一种新的思路。

磁选、浮选、球磨等预处理方法可以通过破坏钒尖晶石相等稳定结构，提高钒浸出率并减少杂质干扰；预处理后原料在浸出环节所产出的废渣、废液也相对减少，更具环保效益。但预处理会增加提钒流程，且处理过程中易导致钒损失，工艺需进一步优化。

2.5.3　加压酸浸

为从含钒钢渣中更高效、经济地提取钒，研究人员在直接酸浸工艺的基础上，探索了高压环境对钒浸出效果的影响。加压酸浸工艺核心在于通过高压环境提高氧气传质效率与反应温度，将含钒钢渣中稳定存在的低价态钒化合物分解并氧化成可溶于水的高价钒酸盐，从而实现钒的选择性分离。

张国权[47]研究了一种基于加压酸浸技术的无添加剂提钒新方法，在浸出温度 140 ℃、浸出时间 30 min、液固质量比 8∶1 条件下，钒浸出率可达 96.88%。这是因为在高压环境中，酸液对含钒矿物的破坏能力更强，能有效分解钒尖晶石等难溶相，提高钒浸出率，同时还能降低酸耗；高压环境可加速 H^+ 的传质和化学反应速率，缩短浸出时间，所以在效率、经济性和环保性上均优于常压浸出。Liu S. G. 等[48]在氧气分压1.0 MPa、温度 160 ℃条件下从含钒钢渣中提钒，钒浸出率可达 87.8%，但在提钒过程中，铁、锰等其他金属元素也会同时浸出，会增加后续除杂及废液处理困难。

加压酸浸技术通过高压破坏含钒钢渣的稳定矿物结构，使难溶钒转化为易溶高价态钒，促进矿物分解并减少酸用量，尤其适用于高钙、高磷或含有难溶钒矿物的钢渣。该工艺存在一定安全隐患，对设备要求较高，反应通常需在耐高温高压、耐腐蚀的反应釜中进行，设备成本远高于常规浸出法；此外，高温高压环境在一定程度上也会促进杂质元素浸出，增加后续除杂和废液处理成本。目前，该法仍适用于大规模提钒企业和对回收率要求高的项目。

2.5.4 其他强化方法

除了微波辅助加热、原料预处理、加压强化浸出等方法外，用于强化含钒钢渣中钒的提取和回收的方法还有很多。如超声波辅助浸出技术，该法利用超声波为浸出过程提供充足机械能，通过破碎钢渣物理结构，增加固液接触面积，提高传质效率来缩短反应时间并提高钒浸出率；此外，Li M. T. 等[49]研究发现，在反应温度为 150～180 ℃、氧分压 1.2 MPa条件下进行两段逆流浸出，钒浸出率可达 90.0%以上。

强化提钒的辅助方法能推动传统湿法提钒工艺从高耗能、高排放向低碳化、绿色化转型，其核心在于通过物理、化学等手段优化钢渣结构或形态、改进提钒流程来提高钒浸出率和回收率，降低能耗，减少污染，为低品位矿、含钒钢渣、石煤等复杂原料提供适用提钒方法，从而推动钒产业可持续发展。

3 结论与展望

针对从含钒钢渣中提钒，当前主流的钠化焙烧—浸出工艺可实现钒钙分离，但能耗与污染问题突出；钙化焙烧—浸出工艺可减排并固定杂质，但酸耗较高；空白焙烧—浸出工艺有助于清洁生产，是绿色焙烧的重要发展方向。直接酸浸工艺效率高、反应快，但酸耗量大且腐蚀性强；直接碱浸工艺腐蚀性低且选择性浸出钒，尤适高硅渣，但钒浸出率较低。生物浸出工艺利用细菌或真菌自身的代谢能力促进金属化合物溶解，是多领域结合实现的技术突破；亚熔盐提钒工艺中钒被直接溶解，但 Ca、K 等元素同步溶解，需在后续工作中分离。微波辅助加热、机械活化、加压酸浸等辅助方法是改进传统提钒工艺的新手段，应加强此方面的研究。

含钒钢渣现有湿法提钒工艺普遍存在成本高、污染重、回收率低等问题，因此开发经济、清洁、高效的工艺是重要研究方向，建议从两个方面加以改进：

1）明确钒转化机制并优化原料。钢渣中钒的赋存形式复杂，建议在焙烧和浸出环节深入研究反应机制，明确不同阶段钒的微观迁移规律，并通过微波加热、机械活化等方法优化原料形态和结构，提高浸出率。

2）加强对绿色无害化改进提钒工艺的研究。建议开发钛白废酸浸出等技术实现“以废治废”，并加强生物浸出、亚熔盐等绿色提钒工艺的研究，兼顾低碳与高回收率。

参考文献：

[1] 邵雪莹，梁精龙，王乐，等. 含钒钢渣提钒工艺的研究进展[J]. 热加工工艺，2023，52(23)：1-5.
SHAO Xueying，LIANG Jinglong，WANG Le，et al. Research progress of vanadium extraction from vanadium bearing steel slag[J]. Hot Working Technology，2023，52(23)：1-5.

[2] ZHANG W G，ZHANG T A，LI T T，et al. Basic research on the leaching behavior of vanadium-containing steel slag with titanium white waste acid[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering，2021，9(1). DOI：10.1016/j.jece.2020.104897.

[3] 张礼，王长福. 钒钛磁铁矿资源选矿技术及综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用，2023，43(5)：127-137.
ZHANG Li，WANG Changfu. Research progress on separation technology and comprehensive utilization of vanadium-titanium magnetite resources[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources，2023，43(5)：127-137.

[4] 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.

[5] 陈志勇，朱清，武海炜，等. 新型储能发展下钒资源需求趋势分析[J]. 中国矿业，2024，33(12)：99-110.
CHEN Zhiyong，ZHU Qing，WU Haiwei，et al. Vanadium resource demand trend analysis under the development of new energy storage[J]. China Mining Magazine，2024，33(12)：99-110.

[6] 瞿金为，马娜，胡月芳，等. 钒资源现状与石煤钒矿提钒新工艺进展[J]. 矿产综合利用，2025，46(1)：194-199.
QU Jinwei，MA Na，HU Yuefang，et al. Current situation of vanadium resources and new process progress of vanadium extraction from the stone coal vanadium ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources，2025，46(1)：194-199.

[7] 时金玲，余良晖. 国内外钒资源供需分析与思考[J]. 中国矿业，2025，34(1)：63-69.
SHI Jinling，YU Lianghui. Analysis and reflection on the supply and demand of vanadium resources at home and abroad[J]. China Mining Magazine，2025，34(1)：63-69.

[8] 罗林根，庞建明，李新，等. 钒钛磁铁矿还原-磨选工艺分离铁钛试验[J]. 钢铁，2024，59(8)：13-18.
LUO Lingen，PANG Jianxin，LI Xin，et al. Separation of iron and titanium by reduction grinding separation process of vanadium titanium magnetite[J]. Iron and Steel，2024，59(8)：13-18.

[9] 瞿金为，张廷安，牛丽萍，等. 转炉钒渣的综合利用技术进展[J]. 钢铁钒钛，2020，41(5)：1-7.
QU Jinwei，ZHANG Ting'an，NIU Liping，et al. Technology progress in comprehensive utilization ofconverter vanadium slag[J]. Iron Steel Vanadium Titanium，2020，41(5)：1-7.

[10] MOSKALYK R R，ALFANTAZI A M. Processing of vanadium：a review[J]. Minerals Engineering，2003，16(9)：793-805.

[11] 吴恩辉，李军，侯静，等. 钒钛铁精矿钛白废酸浸出提钒实验[J]. 矿产综合利用，2022，43(5)：20-24.
WU Enhui，LI Jun，HOU Jing，et al. Extraction of vanadium from vanadium titanomagnetite concentrates by leaching process with titanium white waste acid[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources，2022，43(5)：20-24.

[12] 杨耀辉，惠博，颜世强，等. 全球钒钛磁铁矿资源概况与综合利用研究进展[J]. 矿产综合利用，2023，44(4)：1-11.
YANG Yaohui，HUI Bo，YAN Shiqiang，et al. Overview of global vanadium-titanium magnetite resources and comprehensive utilization[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources，2023，44(4)：1-11.

[13] 吕韬，李秦灿，宁晓宇，等. 转炉含钒钢渣入矿热炉预处理工艺设计[J]. 有色金属设计，2020，47(4)：53-56.
LYU Tao，LI Qincan，NING Xiaoyu，et al. Pretreatment process design of vanadium-containing bof slag for saf smelting[J]. Nonferrous Metals Design，2020，47(4)：53-56.

[14] 常福增，赵备备，李兰杰，等. 钒钛磁铁矿提钒技术研究现状与展望[J]. 钢铁钒钛，2018，39(5)：71-78.
CHANG Fuzeng，ZHAO Beibei，LI Lanjie，et al. Research status and prospect of vanadium extraction from vanadium titano-magnetite[J]. Iron Steel Vanadium Titanium，2018，39(5)：71-78.

[15] 赵涛，余少武，温靖，等. 微波强化钒钛磁铁矿直接还原过程研究[J]. 钢铁钒钛，2021，42(4)：105-110.
ZHAO Tao，YU Shaowu，WEN Jing，et al. Research on microwave enhanced direct reduction of vanadium titanomagnetite[J]. Iron Steel Vanadium Titanium，2021，42(4)：105-110.

[16] 胡渝杰，叶国华，左琪，等. 响应曲面法优化承钢含钒钢渣浸出负组元钙的试验研究[J]. 有色金属工程，2021，11(5)：52-59.
HU Yujie，YE Guohua，ZUO Qi，et al. Study on optimization of leaching of negative component calcium from vanadium-containing slag of chenggang by response surface methodology[J]. Nonferrous Metals Engineering，2021，11(5)：52-59.

[17] 黄云生，齐建云，王明，等. 从钒钛磁铁矿中湿法回收钒铁钛试验研究[J]. 湿法冶金，2021，40(1)：10-15.
HUANG Yunsheng，QI Jianyun，WANG Ming，et al. Recovery of vanadium，iron and titanium from vanadium-titanium magnetite by hydrometallurgical process[J]. Hydrometallurgy of China，2021，40(1)：10-15.

[18] 刘景景. 含钒钢渣湿法提钒工艺研究进展[J]. 矿产综合利用，2025，46(5)：155-163.
LIU Jingjing. Research progress on hydrometallurgical vanadium extraction process fromvanadium-containing steel slag[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources，2025，46(5)：155-163.

[19] GAO F，OLAYIWOLA 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.

[20] 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.
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.

[21] GILLIGAN R，NIKOLOSKI A N. The extraction of vanadium from titanomagnetites and other sources[J]. Minerals Engineering，2020，146. DOI：10.1016/j.mineng.2019.106106.

[22] 蔡昭铃，杨守志，陈家镛. 含钒高钙钢渣碳酸化浸取提钒数

学模型的研究[J]. 化工冶金,1982(2):63-77.
CAI Zhaoling, YANG Shouzhi, CHEN Jiayong. Study on the mathematical model of vanadium extraction by carbonation leaching of vanadium-containing high-calcium steel slag[J]. Chemical Metallurgy,1982(2):63-77.

[23] 蔡永红,赵昌明,宁哲,等. 熔融 Na_2CO_3 体系中含钒钢渣焙烧过程研究[J]. 矿冶工程,2017,37(6):76-79.
CAI Yonghong, ZHAO Changming, NING Zhe, et al. Study on the roasting process of vanadium-containing steel slag in molten Na_2CO_3 system[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2017,37(6):76-79.

[24] 蔡永红,赵昌明,宁哲,等. 含钒钢渣在熔融 NaOH 体系中的焙烧过程[J]. 中南大学学报(自然科学版),2018,49(5):1047-1053.
CAI Yonghong, ZHAO Changming, NING Zhe, et al. Roasting process of vanadium-containing steel slag in molten NaOH system[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2018,49(5):1047-1053.

[25] GILLIGAN R, NIKOLOSKI A N. The extraction of vanadium from titanomagnetites and other sources[J]. Minerals Engineering, 2020, 146. DOI: 10. 1016/j. mineng. 2019. 106106.

[26] YANG M Q, YANG J Y. Vanadium extraction from steel slag: generation, recycling and management[J]. Environmental Pollution,2024,343. DOI:10. 1016/j. envpol. 2023. 123126.

[27] 王皎月,张琦,龚波,等. 低品位高钙含钒钢渣的提钒工艺:CN 201210030216. 3 A[P]. 2012-07-04.

[28] 梁精龙,邵雪莹,王乐,等. 钙化焙烧-微波酸浸对钢渣中钒铁浸出的影响[J]. 中国冶金,2023,33(4):111-118.
LIANG Jinglong, SHAO Xueying, WANG Le, et al. Effect of calcified roasting-microwave acid leaching on leaching of iron and vanadium from steel slag[J]. China Metallurgy, 2023,33(4):111-118.

[29] 孙洪强,赵玉涛,陈刚,等. 添加微量稀土对锶变质铝轮毂材料组织和性能的影响[J]. 热加工工艺,2007,36(13):5-8.
SUN Hongqiang, ZHAO Yutao, CHEN Gang, et al. influence of adding little re on micr ostr uctur e & mechanical pr oper tiesof aluminum hub mater ial modified with sr [J]. Hot Working Technology,2007,36(13):5-8.

[30] 刘景景. 含钒钢渣空白焙烧—硫酸浸出提钒试验研究[J]. 金属矿山,2025(6):100-106.
LIU Jingjing. Experimental study on vanadium extraction from steel slag containing vanadium by blank roastingand sulfuric acid leaching[J]. Metal Mine,2025(6):100-106.

[31] 叶国华. 从含钒钢渣中提取 V_2O_5 的新工艺与机理研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2010.

[32] 李婷婷,张廷安,吕国志,等. 钛白废酸直接浸出含钒钢渣基础实验研究与机理分析[J]. 矿冶工程,2021,41(4):104-108.
LI Tingting, ZHANG Tingan, LYU Guozhi, et al. Basic experimental study and mechanism analysis for direct leaching of vanadium-containing steel slag from titanium dioxide waste acid[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(4):104-108.

[33] 刘孟博,韩颖,张威,等. 钛白废酸和含钒钢渣资源化协同处理研究[J]. 山东化工,2023,52(21):236-238.
LIU Mengbo, HAN Ying, ZHANG Wei, et al. Study on the synergistic treatment of titanium white waste acid and vanadium steel slag resource utilization[J]. Shandong Chemical Industry,2023,52(21):236-238.

[34] JU J R, FENG Y L, LI H R, et al. Efficient separation and recovery of vanadium, titanium, iron, magnesium, and synthesizing anhydrite from steel slag[J]. Mining, Metallurgy & Exploration,2022,39(2):733-748.

[35] 高明磊,陈东辉,郑诗礼,等. 一种用高碱度氢氧化钠介质从含钒钢渣中提取钒的方法:CN 102094123 A[P]. 2011-06-15.

[36] WAN J F, DU H, GAO F, et al. Direct leaching of vanadium from vanadium-containing steel slag using NaOH solutions: a case study[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review,2021,42(4):257-267.

[37] LI J X, ZHANG B G, MENG Y, et al. Bioleaching of vanadium by acidithiobacillus ferrooxidans from vanadium-containing resources: performance and mechanisms[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 416. DOI: 10. 1016/j. jhazmat. 2021. 125843.

[38] WANG G Y, ZHANG B G, LI S, et al. Simultaneous microbial reduction of vanadium (Ⅴ) and chromium (Ⅵ) by Shewanella loihica PV-4[J]. Bioresource Technology, 2017,227:353-358.

[39] 郑诗礼,杜浩,王少娜,等. 亚熔盐法钒渣高效清洁提钒技术[J]. 钢铁钒钛,2012,33(1):15-19.
ZHENG Shili, DU Hao, WANG Shaona, et al. Efficient and cleaner technology of vanadium extractionfrom vanadium slag by sub-molten salt method[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2012,33(1):15-19.

[40] LIU B, DU H, WANG S N, et al. A novel method to extract vanadium and chromium from vanadium slag using molten NaOH-$NaNO_3$ binary system[J]. AIChE Journal, 2013,59(2):541-552.

[41] 高明磊,陈东辉,李兰杰,等. 含钒钢渣亚熔盐法浸出提钒过程与机理[J]. 过程工程学报,2013,13(6):964-968.
GAO Minglei, CHENG Donghui, LI Lanjie, et al. Process and mechanism of leaching vanadium from vanadium-containing Steel slag with sub-molten salt[J]. The Chinese Journal of Process Engineering,2013,13(6):964-968.

[42] 闫一诺,邵雪莹,梁精龙,等. 钙化重构含钒钢渣微波酸浸提钒研究[J]. 储能科学与技术,2023,12(5):1461-1468.
YAN Yinuo, SHAO Xueying, LIANG Jinglong, et al. Study on microwave acid leaching of vanadium from calci-

fied reconstructed steel slag[J]. Energy Storage Science and Technology，2023，12(5)：1461-1468.

[43] TIAN L，XU Z F，CHEN L J，et al. Effect of microwave heating on the pressure leaching of vanadium from converter slag[J]. Hydrometallurgy，2019，184：45-54.

[44] 高明磊. 从含钒钢渣中富集钒的方法：CN 106834749 A [P]. 2017-06-13.

[45] ODEBIYI O S，GUO Y，DU H，et al. Effect of parametric modeling of WET ball-milling on vanadium recovery from vanadium bearing steel slag[J]. Advanced Powder Technology，2024，35(8). DOI：10. 1016/j. apt. 2024. 104579.

[46] 谢禹，叶国华，左琪，等. 含钒钢渣提钒新工艺研究[J]. 钢铁钒钛，2019，40(1)：69-77.

XIE Yu，YE Guohua，ZUO Qi，et al. New technology of vanadium Extraction from vanadium-containing steel slag [J]. Iron Steel Vanadium Titanium，2019，40(1)：69-77.

[47] 张国权. 无焙烧加压浸出转炉钒渣提钒的基础研究[D]. 沈阳：东北大学，2017.

[48] LIU S G，DING E M，NING P，et al. Vanadium extraction from roasted vanadium-containing steel slag via pressure acid leaching[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering，2021，9(3). DOI：10. 1016/j. jece. 2021. 105195.

[49] LI M T，CHANG W，QIU S，et al. Kinetics of vanadium dissolution from black shale in pressure acid leaching[J]. Hydrometallurgy，2010，104(2)：193-200.

Research Progress on Wet Extraction of Vanadium from Vanadium-containing Steel Slag

WANG Zekun[1,2]，WANG Le[1,2]，LI Yungang[1,2]

(1. *School of Metallurgy and Energy，North China University of Science and Technology，Tangshan* 063000，*China*；
2. *Key Laboratory of Ministry of Education for Modern Metallurgy Technology，North China University of Science and Technology，Tangshan* 063000，*China*)

Abstract：Vanadium-containing steel slag is an industrial waste rich in high-value elements and has significant secondary utilization value. Therefore，how to recover vanadium resources from steel slag at low cost and high efficiency is one of the key challenges that China's vanadium industry needs to overcome. The current research status of wet vanadium extraction technology from vanadium-containing steel slag is reviewed. The progress of calcination-leaching and direct leaching processes is introduced. Other new vanadium extraction processes and enhanced auxiliary methods for vanadium extraction are analyzed. Finally，the advantages and disadvantages of various processes are compared，and the future development trends are prospected.

Key words：vanadium；vanadium-containing steel slag；leaching；wet extraction；research status