

典型含钒原料提钒工艺研究进展与展望

周志慧,高利坤,饶兵,乔善翔,涂升

(昆明理工大学 国土资源工程学院,云南 昆明 650093)

摘要:针对钒资源中的钒赋存状态复杂、提取分离难度高,以及环保要求日趋严格的现状,系统总结了国内外提钒工艺的研究进展,重点探讨了焙烧—浸出、湿法分离,及其他代表型提钒工艺的技术特征与存在问题,并根据钒钛磁铁矿、含钒页岩等不同原料的性质,对比分析了各提钒工艺的适配路线。提出未来提钒工艺朝着低污染、高回收率、智能化、短流程及资源高效综合利用的方向发展,是推动钒冶金技术改进和创新的重要途径。

关键词:钒;提取;钒钛磁铁矿;含钒页岩;研究进展

中图分类号:TF841.3;TF803.2

文献标识码:A

文章编号:1009-2617(2026)04-0467-09

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2026.04.002

钒作为一种重要的战略性金属,具有熔点和沸点较高、无磁性、韧性好、硬度大等一系列良好的理化性能^[1],当其与普通金属结合制成合金后,能够显著提升合金强度和塑性^[2-4],目前钒已广泛应用于国防军工、航空航天、钢铁工业及生物医药等领域^[5-8]。其中钢铁行业是钒应用的主要领域,钒在该领域的消耗量占钒总产量的 85% 左右^[9];此外,随着电化学储能产业的快速发展,钒电池的应用占比也呈逐步上升趋势^[10]。在自然界中,钒大多以伴生状态存在,具有工业开采利用价值的钒矿资源主要包括钒钛磁铁矿、含钒石煤(含钒页岩类黏土矿物)、钒云母、钒铅矿、钒钾铀矿、含钒磷灰石等矿物。从全球范围看,钒矿资源储量分布相对集中,中国、澳大利亚、俄罗斯、南非等国是主要赋存地,占据世界钒矿资源储备的高比例份额。中国的钒矿资源储量与产量均位居世界前列,凭借钒钛磁铁矿与石煤两大资源基础,已形成全球最完整的钒研发、提取及深加工产业化体系,从而为钒在相关材料产业领域的稳定应用与可持续发展提供了重要的资源保障。

目前,工业生产中的主要提钒原料有钒钛磁铁矿、含钒石煤等。国内外针对这些原料所采用

的提钒技术主要有钠化焙烧—水浸、钙化焙烧—碱浸、钙化焙烧—酸浸、熔融钒渣氧化钠化新工艺、熔融钒渣氧化钙化新工艺、空白焙烧、亚熔盐法,以及直接酸浸、直接碱浸等。本文系统总结了这些提钒技术的特征与存在问题,并根据不同原料性质,对比分析了各类工艺的优化与适配路线,展望了提钒技术的发展方向,以期为钒冶金技术的优化提供参考依据。

1 钒钛磁铁矿与含钒页岩(石煤)的资源特性

钒钛磁铁矿是提取钒的重要原料,矿石中 V_2O_5 质量分数通常为 0.1%~2.0%,其主要成分为铁、钛和钒,同时还富集了多元有价元素,如硫、铜、钴、镍、铬等,属于典型的多金属共生矿体,具有较高的资源利用价值^[11-13]。钒常与铁共生于磁铁矿内,二者原子半径相近,因此以类质同象形式存在。在矿物形貌方面,钒钛磁铁矿多呈片状或半自形粒状结构。根据矿石中 TiO_2 含量不同,该矿种可分为高、中、低钛型 3 种类型;根据 Cr_2O_3 含量高低,可分为低铬型和高铬型。钒钛磁铁矿主要赋存于以铁、钛富集为典型特征的基性和超

收稿日期:2026-04-15;修订日期:2026-05-13

基金项目:国家自然科学基金(52364033)。

第一作者简介:周志慧(2000—),女,硕士研究生,主要研究方向为资源综合利用。

通信作者简介:高利坤(1973—),男,博士,教授,主要研究方向为资源综合利用。E-mail:15506681296@163.com。

基性侵入岩中。世界上有很多国家都拥有钒钛磁铁矿资源,主要有俄罗斯、南非、加拿大、中国、新西兰、澳大利亚等^[14]。我国钒钛磁铁矿资源较为丰富,储量居全球第 3 位,主要分布于四川攀西、陕西洋县、河北承德、广东兴宁、新疆喀什与哈密,以及辽宁朝阳等地。

石煤是我国南方分布很广的早古生代海相沉积型低热值非常规煤炭资源,具有高灰、高硫、低固定碳、发热量偏低等特点,矿石中普遍含有钒、钼、稀土等多种有价元素,其中钒资源储量占比最大,因而成为重要的钒系战略矿产载体。石煤质地坚硬、矿物构成复杂,单纯当作燃料,利用价值不高,但因其兼具能源燃烧和多金属综合回收的双重开发潜力,是低品位矿产资源化利用的重要研究对象。从资源分布格局来看,我国石煤资源整体呈现“南方多、北方少,中部集中分布、西北补充”的特征,主要集中在华南、南秦岭及江南隆起周边区域,全国总储量约为 618 亿 t,广泛分布于 20 多个省区。

2 提钒工艺研究

我国从 20 世纪 50 年代开始了提钒研究,目前已形成很多有代表性的提钒工艺。这些工艺特点不尽相同,大致分为两大类:焙烧后浸出提钒工艺和无焙烧(全湿法)浸出提钒工艺。此外,近些年还出现了一些新的提钒工艺,如熔融钒渣氧化钠化提钒、熔融钒渣氧化钙化提钒,以及亚熔盐法液相氧化提钒等新技术。

2.1 焙烧—浸出提钒工艺

2.1.1 钠化焙烧—水浸提钒工艺

钠化焙烧—水浸提钒工艺的核心原理是先将钠盐与含钒原料混合均匀(或造球),之后通过氧化焙烧使矿物内以 FeV_2O_4 尖晶石(钒云母)等形式存在的低价态钒转化为高价态钒,再与钠盐发生反应,生成易溶于水的钒酸钠;接着在其浸出液中添加铵盐类的钒沉淀剂,获得钒酸铵沉淀;最后经过高温煅烧处理,即可得到符合标准纯度的 V_2O_5 ^[15-18]。该工艺流程如图 1 所示。主要反应方程式如下:

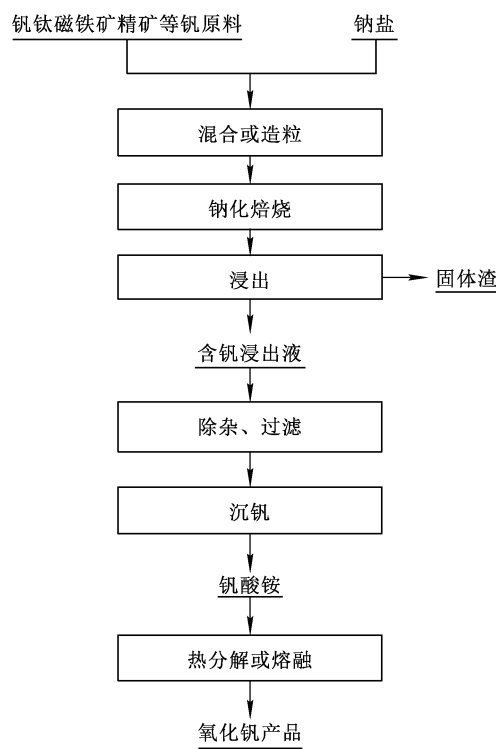
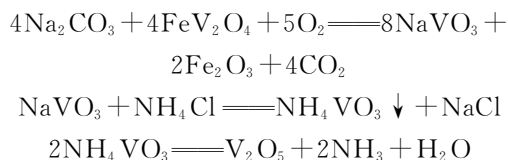


图 1 钠化焙烧—水浸提钒工艺流程^[19]

Fig. 1 Flowchart of sodium roasting—water leaching process for vanadium extraction^[19]

曾尚林等^[20]针对攀枝花钒钛磁铁矿精矿研究了焙烧时间、焙烧温度、钠化剂种类及其配比对焙烧效果的影响,并确定了最优焙烧工艺参数为焙烧时间 120 min、焙烧温度 1 300 ℃、碳酸钠配比为 6%;在该条件下,将焙烧后的钒钛磁铁矿精矿进行钠化处理并浸出钒,钒浸出率可达 86.91%。李建兵^[21]选取来自非洲地区的钒钛磁铁矿为原料,采用直接提钒工艺提取钒,考察了钠盐添加剂种类、浸出时间、温度、液固体积质量比、焙烧温度对钒浸出效果的影响。结果表明,在以 $\text{NaCl-Na}_2\text{CO}_3$ 为复合添加剂、焙烧温度为 1 100~1 300 ℃、浸出温度为 80~90 ℃、浸出时间不超过 2 h、液固体积质量比为 3:1 条件下,钒浸出率达 80% 以上。吴恩辉等^[22]以高铬型钒钛铁精矿为研究对象,在对钠化焙烧过程开展热力学分析基础上,系统研究了焙烧温度和碳酸钠比对焙烧产物成分及钒浸出率的影响。结果表明,当焙烧温度为 1 100 ℃、碳酸钠配比为 15% 条件下, V_2O_5 浸出率可达 89.70%。赵备备等^[23]通过系统试验探究了钠化焙烧—水浸工艺对废钒触媒中钒浸出率的影响,结果表明:当碳酸钠添加量增加时,钒浸出率逐渐升

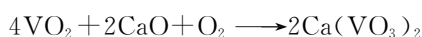
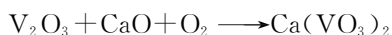
高;当碳酸钠添加量为 12% 时,钒浸出率为 83.14%;但进一步增加碳酸钠含量,钒浸出率增长速度显著减缓;当碳酸钠添加量增至 20% 时,钒浸出率仅为 84.49%。张中豪等^[24]以石煤为研究对象,采用“脱碳氧化—钠化—水浸—净化—酸沉淀—碱溶解—铵盐沉淀”工艺提取钒,适宜条件下, V_2O_5 水溶性转化浸出率可达 80% 以上,效果较好。

钠化焙烧—浸出工艺的钒转化率较高,适于工业生产。但钠盐价格相对较高,且在以硫酸钠和氯化钠为添加剂时,焙烧过程中会产生二氧化硫和氯气等有害气体^[25-26]。此外,采用钠化焙烧—浸出工艺处理含钒钢渣时,其中的大量氧化钙会参与反应,从而导致钒转化浸出率降低,且在浸出过程中会产生难以处理的高盐废水,易造成环境污染,可见该工艺不适用于处理高钙钢渣^[27]。

2.1.2 钙化焙烧—碱浸提钒工艺

钙化焙烧—碱浸提钒工艺的原理是先通过氧化焙烧将矿物中的三价钒氧化成五价钒;五价钒与氧化钙发生反应,生成偏钒酸钙;偏钒酸钙用碳酸钠溶液浸出,使偏钒酸钙转化为溶解度更低的碳酸钒,钒则主要以可溶性钒酸盐形式浸出。该工艺流程如图 2 所示。主要反应方程式如下:

钙化焙烧(氧化-成盐):



碱浸(离子交换浸出):

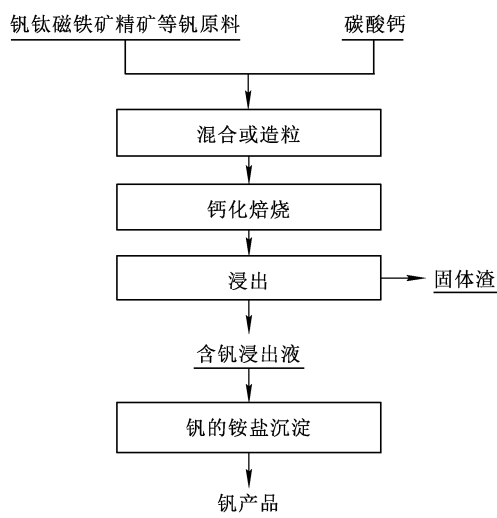
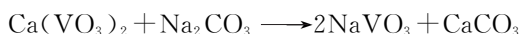


图 2 钙化焙烧—碱浸提钒工艺流程^[19]

Fig. 2 Flowchart of calcination roasting—alkali leaching process for vanadium extraction

李兰杰^[28]以钒钛磁铁矿精矿为研究对象,采用钙化焙烧—碱浸法提钒,结果表明,在选择 10% $CaCO_3$ 为焙烧剂、焙烧温度 1 200 °C、焙烧时间 1 h 条件下,钒浸出率达 72.1%。张晓刚等^[29]以石煤钒矿为研究对象,采用钙化焙烧—氢氧化钠浸出法提钒,结果表明,在加入 5% 碳酸钙为焙烧剂、焙烧温度 900 °C、焙烧时间 2 h 条件下进行钙化焙烧,之后在液固质量比为 3 : 1、氢氧化钠用量为 15%、温度为 103 °C 的微沸条件下浸出 3 h,钒浸出率可达 90% 以上。

钙化焙烧—碱浸工艺的的优点在于产生的废水可回收再利用,且没有有毒气体产生;但能耗和成本均较高,达不到规模化生产要求,钒转化率仍有待进一步提高^[30]。

2.1.3 钙化焙烧—酸浸提钒工艺

钙化焙烧—酸浸提钒工艺是向矿物中加入碳酸钙和石灰石等钙盐类添加剂,在高温条件下焙烧,随后采用硫酸等浸出剂对焙烧熟料进行浸出,再通过水解或添加铵盐类沉钒剂实现钒的沉淀,最终通过焙烧工艺获得 V_2O_5 产品。

吴恩辉等^[31]研究了钒铬渣的氧化钙化焙烧—酸浸提钒,结果表明,最佳工艺条件为焙烧温度 1 000 °C,氧化时间 2 h,钙比 1.2,钙化时间 2 h,在此条件下,钒浸出率可达 85.76%。叶露^[32]以某企业所得钒渣钙化焙烧产物为研究对象,进行了硫酸浸出试验,结果表明,在溶液初始 pH=0.75、温度 50 °C、浸出时间 10 min、液固体积质量比为 10 : 1、搅拌转速 500 r/min 最优条件下,钒浸出率可达 90.21%。梁精龙等^[33]以河北承德某企业所得含钒钢渣为研究对象,以 CaO 为焙烧助剂,采用微波加热并结合酸浸工艺探讨了焙烧时间、焙烧温度及配钙比对钒和铁浸出的影响。结果表明,在焙烧温度 1 000 °C、焙烧时间 3 h 及钙含量为 8% 条件下,钒浸出率可达 50.06%。

钙化焙烧提钒工艺能有效分离钒与铬,不会生成含氯有害气体,且浸出渣中含有大量 CaO,但不含钠盐,可直接用作建材原料。目前,以钒渣为原料的钙化焙烧—酸浸提钒工艺已在攀钢西昌钒厂等企业得到产业化应用。

2.1.4 空白焙烧法

空白焙烧亦称无盐焙烧,核心特征是焙烧过程中不加入任何助剂。在空气氛围下,氧气能破

坏钒矿的物相结构,从而使钒尖晶石析出。析出的钒尖晶石与氧气反应能释放出高价态的钒,再进行浸出即可得到 V_2O_5 。付自碧^[34]基于空白焙烧和碳酸化浸出技术,提出了一种由钒渣制备氧化钒的新工艺,同时对这两种关键工序的工艺参数进行系统研究和优化。试验结果表明:当焙烧温度为 860~900 °C 时,钒渣进行空白焙烧后,钒主要以 $Mn_2V_2O_7$ 和 $Mg_2V_2O_7$ 形式存在;在碳酸氢钠质量浓度 158 g/L、浸出温度 95 °C、浸出时间 120 min 条件下,钒转化浸出率可达 90.49%~92.12%。李兰杰等^[35]通过试验探究了空白焙烧条件下钒渣中钒尖晶石相的氧化行为与反应机制。结果表明:当钒渣在 600~750 °C 下焙烧时,钒尖晶石相能完全氧化分解;当温度超过 750 °C 时,钒转化率超过 95%;将钒渣在氢氧化钠溶液中进行水热浸出,当温度为 180 °C、浸出时间为 2 h 时,钒浸出率超过 95%。

空白焙烧工艺反应过程中无有毒气体产生,同时也不会生成高毒性六价铬,但钠化浸出仍会产生高盐废水,且该工艺生产成本较高,工艺流程较长,使其工业化应用受到较大限制。

2.2 无焙烧浸出提钒工艺

2.2.1 直接碱浸提钒工艺

与酸浸相比,碱浸在抑制有毒金属溶解方面具有显著优势,可有效简化浸出液后续处理流程^[36]。当钒渣中的钒以 V^{5+} 形式存在时,选用碱浸工艺更适宜,其中碳酸钠和氢氧化钠是当前应用较为广泛的浸出剂。

高明磊等^[37]研究了含钒钢渣在高碱度氢氧化钠介质中的浸出行为,结果表明,在常温常压条件下,直接用 65%~90% 的氢氧化钠溶液浸出含钒钢渣,浸出渣中钒质量分数仅为 0.3%~0.6%,钒单次浸出率在 85%~90% 之间。这是因为高浓度的碱性溶液能高效溶解以多种形态存在的钒,使得浸出渣中钒含量较低,浸出率较高。碱浸提钒浸出率受浸出温度、碱液浓度、物料粒度及液固体积质量比等因素影响,其中浸出温度的影响最为显著,钒浸出率随温度升高而逐步提升,该现象可由阿伦尼乌斯方程中速率常数与温度的指数关系进行解释。

万俊峰^[38]研究了采用直接碱浸法从钢渣中提取钒,结果表明,在氢氧化钠浓度为 40%、物料粒径为 49~75 μm 、反应温度为 170 °C、搅拌转速

为 500 r/min、液固质量比为 4:1 条件下,钒浸出率为 68.4%,表观反应活化能为 26.67 kJ/mol;为进一步提高钒浸出率,该团队还进一步研究了碱性热氧化提取钒,结果表明,在氢氧化钠浓度 50%、氧气分压 0.2 MPa、温度 200 °C、搅拌速度 500 r/min、液固体积质量比为 4:1 条件下,钒浸出率可达 88.1%。

直接碱浸工艺可有效溶解以多种形态存在的复杂钒化合物,且在碱性介质中能显著抑制杂质元素的溶出;但该工艺碱耗高,浸出渣后期处理较为困难。

2.2.2 直接酸浸提钒工艺

钒可通过溶解于硫酸溶液并经溶剂萃取实现与其他杂质的分离,随后在含钒溶液中加入铵盐,经后续分离净化步骤制得钒产品^[39]。

张国权等^[40]提出了一种无焙烧直接加压酸浸新工艺,并将其与无焙烧常压酸浸工艺进行了对比研究。结果表明:无焙烧常压酸浸工艺提钒的最佳浸出率约为 60%,增加硫酸浓度或升高浸出温度能提升钒浸出率,但浸出渣中钒的残留量相对较高,钒渣的综合利用率相对较低;而采用无焙烧加压酸浸工艺时,在控制氧气分压 0.6 MPa、初始硫酸质量浓度 150 g/L、液固体积质量比 8:1、浸出温度 110 °C 条件下,钒浸出率可达 92% 左右;与无焙烧常压酸浸相比,无焙烧加压酸浸工艺反应速率更快、钒浸出率更高。

叶国华等^[41]研究了在常温常压下从含钒钢渣中直接酸浸提钒,结果表明,在硫酸用量 90%、液固体积质量比为 4:1、浸出时间 2 h 最优条件下, V^{4+} 可直接浸出,浸出率达 94.1%。史松等^[42]研究了采用直接酸浸工艺从陕西省商洛市某黏土型石煤钒矿中提钒,结果表明,在磨矿细度为 -74 μm 占比 55%、浸出温度 90 °C、浸出时间 12 h、硫酸添加量为 26% (相对于原料质量)、助浸剂添加量为 4% (相对于原料质量)、液固体积质量比为 1.5:1 优化条件下,钒浸出率可达 89.80%。为有效利用陕西省某特定类型的含钒黏土矿,石美莲等^[43]采用直接酸浸法进行了提钒研究,结果表明,在浸出时间 10 h、浸出温度 95 °C、液固体积质量比为 0.6:1、硫酸用量为 25% 时,钒浸出率可达 74.6%。董振海等^[44]以辽宁凤化壳型钒钛磁铁矿精矿为研究对象,采用直接酸浸方法对预富集精矿进行提钒处理,结果表

明,在初始硫酸浓度 2.5 mol/L、氢氟酸浓度 2.5 mol/L、液固体积质量比为 5 mL/1 g、浸出温度 90 ℃、浸出时间 2 h、搅拌转速 100 r/min 最佳条件下,钒浸出率可达 95.68%。许金泉等^[45]针对石煤钒矿,研究了在硫酸氧化条件下直接浸出钒,结果表明,在液固体积质量比为 2:1、氟化铵浓度为 2.5%、氯酸钠浓度为 3%、矿石粒度为 100~200 目、浸出温度 80 ℃、浸出时间 8 h、硫酸

浓度为 30% 最佳条件下,V₂O₅ 浸出率达 92% 以上。

直接酸浸提钒工艺无需焙烧,可实现高效浸出;但酸耗高,浸出液净化过程较困难,且加压浸出对设备要求高,添加含氟助剂导致设备腐蚀更为严重,还易造成环境污染。

焙烧后浸出工艺和无焙烧浸出工艺技术特点对比结果见表 1。

表 1 2 种浸出工艺技术特点对比
Table 1 Comparison of technical characteristics of two leaching processes

对比维度	焙烧后浸出工艺	无焙烧浸出工艺
矿物活化方式	依靠高温焙烧破坏晶体结构	采用机械活化、药剂强化浸出
浸出效果	浸出效率高,适应性强	浸出指标偏低,适用矿石范围窄
生产能耗水平	高温工段能耗高,运行成本高	无需高温处理,整体能耗更低
环境友好程度	烟气、粉尘排放量大,治理成本高	三废排放量较少,清洁生产优势明显
工艺流程特征	工序繁琐,设备配置复杂	流程相对简单,现场操作易管控

2.3 其他提钒工艺

2.3.1 熔融钒渣氧化钠化提钒新工艺

针对传统工艺中因冷却破碎钒渣、球磨除铁,再进行氧化焙烧而导致的能源浪费等问题,宋文臣等^[46]提出了一种针对熔融钒渣的氧化钠化提钒新技术。该技术是利用熔融钒渣的余热完成氧化钠化,之后再采用传统的湿法沉钒技术生产钒产品。具体而言,先向熔融钒渣中加入钠盐,同时通入氧气,将渣中的钒转化为可溶于水的钒酸钠,之后再进行水浸和沉淀处理,即可得到 V₂O₅ 产品。试验结果表明,当碳酸钠添加量为钒渣质量的 25%、搅拌转速为 150 r/min、液固体积质量比为 3:1、温度为 95 ℃ 条件下反应 10 min,钒浸出率可达 85%。

熔融钒渣的氧化钠化提钒新技术省去了物料破碎、球磨、除铁及再氧化焙烧等多个步骤,且可有效利用熔融钒渣的余热,既能优化提钒流程,又可一定程度地降低能耗,节约成本;但该技术存在钠盐用量较大等问题,还有待进一步完善。

2.3.2 熔融钒渣氧化钙化提钒新工艺

熔融钒渣氧化钙化提钒新工艺是先向熔融钒渣中加入氧化钙并通入氧气,促使渣中低价钒转化为高价钒(四价或五价),高价钒再与氧化钙结合生成钒酸钙;将钒酸钙进行破碎、球磨处理,使其粒度小于 200 目(74 μm),之后进行酸浸和沉

钒,制得 V₂O₅ 产品。试验结果表明,在钒钒质量比为 0.5~0.9、浸出时间 120 min、硫酸浓度 20%、液固体积质量比为 5:1、酸浸温度 90 ℃ 优化条件下,钒浸出率可达 88%^[47]。

熔融钒渣氧化钙化提钒新技术能高效利用熔融钒渣的余热,使能耗大大降低;此外,在钒渣熔融态条件下加入 CaO 并通氧,能迅速氧化低价钒,使其转化为易溶于酸的钒酸钙。但该技术要实现工业化需特制的耐高温反应设备,另外钒浸出率也有待提高,因此仍有待改进和完善。

2.3.3 亚熔盐法液相氧化提钒工艺

亚熔盐法液相氧化提钒法的特点包括体系沸点高、蒸气压低、流动性良好、反应活性高、活度系数高,以及分离功能可调节等^[48]。高明磊等^[49]对比研究了钒渣在钾基、钠基亚熔盐介质中的浸出效果,结果表明:通过在 2 种介质中分解钒的固溶相,均形成了可溶性钒酸盐;相较于传统焙烧工艺,亚熔盐体系中的反应温度从 850 ℃ 降至 220~240 ℃,反应时间由 4~6 h 缩短至 1~2 h,使浸出效率明显提高,同时能耗明显降低;在钾基亚熔盐体系中的钒转化率可达 97%,而在钠基体系中的钒转化率为 85%,前者对钒的浸出效果明显优于后者。王大卫等^[50]研究了在氢氧化钠基亚熔盐体系中浸出钒渣,主要考察了影响钒浸出率的影响因素,结果表明:反应温度和时间、碱浓度及

碱矿比均是影响浸出效果的关键因素;最佳浸出工艺参数为反应温度 210 ℃,反应时间 6 h,尾渣粒度 200 目,碱浓度 80%,碱矿比 4:1,通气量(氧气)0.1 L/min,在该条件下,钒浸出率可达 95% 以上。郑诗礼等^[51]针对当前钒渣焙烧提钒工艺中存在的钒资源利用率低、无法同步提取铬,以及“三废”处理导致的严重环境污染等问题,基于亚熔盐介质的优异物理和化学特性,提出了一种高效清洁钒提取的新技术。该工艺可将钒渣的分解温度由传统工艺的 850 ℃降至 200~400 ℃,钒转化率能提升至 95% 以上。这有望突破从钒渣中提取钒所面临的资源和环境限制。

亚熔盐法液相氧化提钒工艺在环境保护、金属回收率及能耗控制方面具有独特优势,被视为可替代传统钠化焙烧工艺的高效绿色工艺;受限于高腐蚀性和高碱浓度特性,该工艺对设备材质及运行维护提出更高要求,导致设备投资与运维成本明显增加,这仍是制约其规模化工业应用的关键问题。

3 结论与展望

1)从钒钛磁铁矿、含钒页岩(石煤)等典型的含钒原料中提钒,常规工艺多采用“焙烧—浸出—沉钒”传统工艺路线,该路线普遍存在三废污染严重及能耗高等问题。目前,针对不同原料特性已有多种产线工艺:钠化焙烧—水浸工艺钒转化率较高,但会产生有害气体和高盐废水,且不适用于高钙钢渣提钒;钙化焙烧—碱浸或酸浸工艺环境友好,与钠化提钒相比具有成本优势,但不同物料的钒转化率差别较大;熔融钒渣氧化钠化/钙化新工艺可有效利用余热、缩短流程,但钠盐用量大或需耐高温设备;空白焙烧法无有害气体产生,尾渣易于综合利用,具有较好的清洁生产潜力,但其规模焙烧的转化效果较难控制,且钠化浸出仍会产生高盐废水;亚熔盐法可在较低温度下全湿法实现钒的高效浸出,钒转化率可达 90% 以上,但设备腐蚀问题突出;直接酸浸或碱浸工艺无需焙烧,流程简单,但高钙原料酸耗大、反应时间长、杂质分离困难;直接碱浸对专用设备腐蚀性较大。

2)钒钛磁铁矿、含钒页岩(石煤)等不同原料的矿物组成与钒赋存状态差异显著,决定了其对提钒工艺具有特定的适配性。钒钛磁铁矿中铁与钒紧密共生,宜采用焙烧—浸出工艺破坏其物

相结构;石煤中钒多赋存于云母等硅酸盐矿物中,需借助高温焙烧或添加氟化物强化转化浸出效果;钒渣的钒品位较高且物相相对简单,适用于空白焙烧、亚熔盐或加压酸浸等高效清洁工艺;含钒钢渣中氧化钙含量高,易消耗浸出剂并生成沉淀包裹钒,需采用高浓度碱浸或优化焙烧—浸出条件以提高钒回收率。

3)未来提钒技术的发展方向应聚焦于清洁、高效、智能化、短流程及资源高效综合利用。一是加强钒资源的选冶结合的深度分离研究,持续推进空白焙烧、亚熔盐法、加压浸出等绿色工艺的工程化应用,并重点解决设备腐蚀、效率提升和规模化放大等瓶颈问题;二是通过引入数字化与智能控制技术,实现提钒全流程的在线监测与精准调控,建设智能工厂,提升综合效率和产品质量,降低劳动强度与能耗;三是加强有价元素与三废同步综合利用,清洁生产、高效利用资源。

参考文献:

- [1] 彭浩,周巧,刘华平,等. 钒渣提钒技术研究进展[J]. 岩石矿物学杂志,2025,44(1):216-226.
Peng Hao,Zhou Qiao,Liu Huaping,et al. Research progress on vanadium extraction technology from vanadium slag[J]. Acta Petrologica et Mineralogica,2025,44(1):216-226.
- [2] 冯志强,李博雍,张大征,等. V-N 微合金化对高强船板钢组织与性能的影响[J]. 钢铁,2026,61(2):160-171.
Feng Zhiqiang,Li Boyong,Zhang Dazheng,et al. Effects of V-N microalloying on microstructure and properties of high-strength shipbuilding steel[J]. Iron and Steel,2026,61(2):160-171.
- [3] 蒲春雷,林银河,尹国亮,等. 铌、钒对高强钢筋再结晶影响及轧制工艺设计[J]. 钢铁,2021,56(10):146-151.
Pu Chunlei,Lin Yinhe,Yin Guoliang,et al. Influence of Nb and V on recrystallization of high-strength steel bars and design of rolling process[J]. Iron and Steel,2021,56(10):146-151.
- [4] 张翔宇,张宇,代春朵,等. 铌钒钛微合金化对热成形钢组织与力学性能的影响[J]. 金属热处理,2025,50(8):14-20.
Zhang Xiangyu,Zhang Yu,Dai Chunduo,et al. Effect of Nb,V and Ti microalloying on microstructure and mechanical properties of hot stamping steel[J]. Heat Treatment of Metals,2025,50(8):14-20.
- [5] Zhang Yimin,Bao Shenxu,Liu Tao,et al. The technology of extracting vanadium from stone coal in China: history, current status and future prospects [J]. Hydrometallurgy, 2011,109(1/2):116-124.
- [6] 朱军,朱明明,赵奇,等. 高纯五氧化二钒制备及应用[J]. 中

- 国有色冶金,2016,45(3):47-50.
- Zhu Jun,Zhu Mingming,Zhao Qi,et al. High purity vanadium pentoxide preparation and application[J]. China Nonferrous Metallurgy,2016,45(3):47-50.
- [7] 王永钢. 含钒合金生产与应用[C]//重庆大学,钒钛资源综合利用产业技术创新战略联盟. 第三届钒钛微合金化高强钢开发应用技术暨第四届钒产业先进技术交流大会. 重庆:[出版者不详],2017:262-268.
- [8] 袁用. 高强度低密度钢的钒合金化研究[D]. 北京:钢铁研究总院,2017.
- [9] Zhang Juhua,Zhang Wei,Xue Zhengliang. An environment-friendly process featuring calcified roasting and precipitation purification to prepare vanadium pentoxide from the converter vanadium slag[J]. Metals,2018,9(1):9010021.
- [10] Skyllas-Kazacos M, Cao Liuyue, Kazacos M, et al. Vanadium electrolyte studies for the vanadium redox battery: a review[J]. ChemSusChem,2016,9(13):1521-1543.
- [11] Chen Desheng, Zhao Hongxin, Hu Guoping, et al. An extraction process to recover vanadium from low-grade vanadium-bearing titanomagnetite[J]. Journal of Hazardous Materials,2015,294:35-40.
- [12] Zhou Mi,Jiang Tao,Yang Songtao,et al. Sintering behaviors and consolidation mechanism of high-chromium vanadium and titanium magnetite fines[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials,2015,22(9):917-925.
- [13] Chen Shuangyin, Fu Xiaojiao, Chu Mansheng, et al. Life cycle assessment of the comprehensive utilisation of vanadium titano-magnetite[J]. Journal of Cleaner Production,2015,101:122-128.
- [14] 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.
- [15] 杨振声,黄开华,蔡博. 钒钛磁铁矿钠化氧化提钒的研究[J]. 钢铁研究总院学报,1983(4):521-528.
- Yang Zhensheng,Huang Kaihua,Cai Bo. Study on sodium oxidation roasting for vanadium extraction from vanadium-titanium magnetite[J]. Journal of Central Iron and Steel Research Institute,1983(4):521-528.
- [16] 赵卫夺,徐颖鹏,李江涛,等. 高铬钒渣钠化焙烧中钙改性驱动的钒铬选择性提取[J]. 中南大学学报(自然科学版),2025,56(8):3117-3125.
- Zhao Weiduo,Xu Yingpeng,Li Jiangtao,et al. Calcium-modification driven selective extraction of vanadium and chromium in sodium roasting of high-chromium vanadium slag[J]. Journal of Central South University,2025,56(8):3117-3125.
- [17] 曹帅,向俊一,黄青云,等. 钒渣高效提取冶金:钠镁复合焙烧提钒工艺[J]. 钢铁钒钛,2025,46(6):40-46.
- Cao Shuai,Xiang Junyi,Huang Qingyun,et al. Efficient extraction metallurgy of vanadium slag: sodium-magnesium composite roasting vanadium extraction process[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2025,46(6):40-46.
- [18] 殷兆迁,郭继科,陈相全,等. 钠化钒液水解沉钒的研究[J]. 钢铁钒钛,2015,36(3):16-20.
- Yin Zhaoqian,Guo Jike,Chen Xiangquan,et al. Study on vanadium precipitation from solution containing high concentration sodium vanadate by hydrolysis[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2015,36(3):16-20.
- [19] 池汝安,覃哲昊,郭文达,等. 钒资源现状及提钒技术研究进展[J]. 有色金属(选矿部分),2026(1):17-27.
- Chi Ru'an,Qin Zhehao,Guo Wenda,et al. Current situation of vanadium resources and research progress of vanadium extraction technology[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section),2026(1):17-27.
- [20] 曾尚林,曾维龙. 攀枝花钒铁精矿钠化焙烧提钒新工艺研究[J]. 金属矿山,2008,383(5):60-62.
- Zeng Shanglin,Zeng Weilong. Novel process of vanadium extraction by sodium roasting from Panzhihua V-Fe concentrate[J]. Metal Mine,2008,383(5):60-62.
- [21] 李建兵. 采用南非某钒钛磁铁矿直接提钒的工艺研究[J]. 湖南有色金属,2020,36(2):42-44.
- Li Jianbing. Study on extraction vanadium directly using vanadium-titanium magnetite from South Africa [J]. Hunan Nonferrous Metals,2020,36(2):42-44.
- [22] 吴恩辉,李军,徐众,等. 高铬型钒钛铁精矿球团氧化钠化焙烧—水浸提钒研究[J]. 稀有金属,2022,46(12):1599-1608.
- Wu Enhui,Li Jun,Xu Zhong,et al. Extraction of vanadium from high-chromium vanadium-bearing titano-magnetite concentrate pellets by oxidizing and Na-activation roasting and water leaching[J]. Chinese Journal of Rare Metals,2022,46(12):1599-1608.
- [23] 赵备备,李兰杰,柳林,等. 废钒触媒提钒工艺研究[J]. 矿产综合利用,2019,220(6):80-83.
- Zhao Beibei,Li Lanjie,Liu Lin,et al. Study on vanadium extraction process of spent vanadium catalyst[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2019,220(6):80-83.
- [24] 张中豪,程正东. 石煤钠化焙烧提钒工艺的研究[J]. 稀有金属,1987(2):100-106.
- Zhang Zhonghao,Cheng Zhengdong. Study on vanadium extraction process from stone coal by sodium roasting[J]. Chinese Journal of Rare Metals,1987(2):100-106.
- [25] 蔡昭铃,杨守志,陈家铺. 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 mathematical model of vanadium extraction by carbonation leaching from vanadium-bearing high-calcium steel slag[J]. Journal of Chemical Metallurgy,1982(2):63-77.

- [26] 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. Roasting process for vanadium-containing steel slag in molten Na_2CO_3 system[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017, 37(6): 76-79.
- [27] 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-bearing steel slag in molten NaOH system[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(5): 1047-1053.
- [28] 李兰杰. 钒钛磁铁矿精矿钙化焙烧直接提钒研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- [29] 张晓刚,高永波,徐强,等. 石煤钒矿钙化焙烧碱浸提钒工艺的实验研究[J]. 应用化工, 2013, 42(6): 1026-1028.
Zhang Xiaogang, Gao Yongbo, Xu Qiang, et al. Vanadic anhydride extracted from stone coal by calcified roast and NaOH leaching[J]. Applied Chemical Industry, 2013, 42(6): 1026-1028.
- [30] 王伟,董辉,赵亮,等. 钒钛磁铁矿提钒工艺综述[C]//中国金属学会能源与热工分会. 第十届全国能源与热工学术年会论文集. 杭州: [出版者不详], 2019: 329-335.
- [31] 吴恩辉,侯静,李军. 钒铬渣氧化钙化焙烧—酸浸提钒实验研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2017, 45(6): 8-13.
Wu Enhui, Hou Jing, Li Jun. Experimental study on vanadium extraction by oxidation calcification roasting and acid leaching of vanadium-chromium slag[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2017, 45(6): 8-13.
- [32] 叶露. 钒渣钙化焙烧熟料酸浸过程钒溶解规律研究[J]. 钢铁钒钛, 2017, 38(5): 20-25.
Ye Lu. Research on dissolution of vanadium in acid leaching process of calcified roasting clinker of vanadium slag[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2017, 38(5): 20-25.
- [33] 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.
- [34] 付自碧. 钒渣空白焙烧清洁提钒工艺探讨[J]. 钢铁钒钛, 2019, 40(4): 17-23.
Fu Zibi. Technology research on clean vanadium-extracting from vanadium slag by blank roasting[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2019, 40(4): 17-23.
- [35] 李兰杰,陈东辉,白瑞国,等. 钒渣空白焙烧高效清洁提钒技术[J]. 河北冶金, 2014, 228(12): 29-33.
Li Lanjie, Chen Donghui, Bai Ruiguo, et al. High-efficiency clean vanadium extraction technology by blank roasting of vanadium slag[J]. Hebei Metallurgy, 2014, 228(12): 29-33.
- [36] 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.
- [37] 高明磊,陈东辉,郑诗礼,等. 一种用高碱度的氢氧化钠介质从含钒钢渣中提取钒的方法: CN201110007715. 6[P]. 2011-06-15.
- [38] 万俊峰. 含钒钢渣碱性水热氧化法提钒应用基础研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- [39] Zhang Xuefei, Fang Dean, Song Shizhe, et al. Selective leaching of vanadium over iron from vanadium slag[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 368: 300-307.
- [40] 张国权,张延安,吕国志,等. 转炉钒渣氧压酸浸提钒探索试验[J]. 钢铁钒钛, 2014, 35(3): 1-4.
Zhang Guoquan, Zhang Ting'an, Lü Guozhi, et al. Study on vanadium extraction from converter vanadium-bearing slag by oxygen pressure acid-leaching[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2014, 35(3): 1-4.
- [41] 叶国华,何伟,路璐,等. 常温常压下含钒钢渣直接硫酸浸钒的研究[J]. 稀有金属, 2013, 37(5): 807-813.
Ye Guohua, He Wei, Lu Lu, et al. Direct leaching of vanadium from V-bearing steel slag with sulfuric acid under normal temperature and pressure[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2013, 37(5): 807-813.
- [42] 史松,吴金鑫,田战武,等. 某粘土型石煤钒矿直接酸浸提钒研究[J]. 中国钼业, 2025, 49(1): 46-50.
Shi Song, Wu Jinxin, Tian Zhanwu, et al. Extraction of vanadium from a clay-type stone coal by direct acid leaching[J]. China Molybdenum Industry, 2025, 49(1): 46-50.
- [43] 石美莲,华骏,颜文斌,等. 含钒黏土矿直接酸浸提钒及其动力学研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(1): 94-97.
Shi Meilian, Hua Jun, Yan Wenbin, et al. A kinetics study for recovery of vanadium from vanadium-bearing clay ore using direct acid leaching[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(1): 94-97.
- [44] 董振海,杨晓峰,刘双安,等. 风化壳型钒钛磁铁矿精矿直接酸浸提钒试验及机理研究[J]. 金属矿山, 2020, 534(12): 108-113.
Dong Zhenhai, Yang Xiaofeng, Liu Shuang'an, et al. Experiment and mechanism study on direct acid leaching of vanadium of weathered crust type vanadium titanium magnetite concentrate[J]. Metal Mine, 2020, 534(12): 108-113.
- [45] 许金泉,张济祥,周京明. 石煤提钒直接酸浸法工艺研究[J]. 云南冶金, 2015, 44(2): 39-43.
Xu Jinquan, Zhang Jixiang, Zhou Jingming. The technical study on extracting vanadium from stone coal by direct acid leaching method[J]. Yunnan Metallurgy, 2015, 44(2): 39-43.
- [46] 宋文臣,李宏. 熔融钒渣直接氧化钠化提钒新工艺研究[J]. 钢铁钒钛, 2012, 33(6): 1-5.

- Song Wenchen, Li Hong. A new process for vanadium extraction from molten vanadium slag by direct oxidation and sodium activating method[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2012, 33(6):1-5.
- [47] 李昆,宋文臣,郑权,等. 熔融态钒渣氧化钙化后酸浸研究[J]. 钢铁钒钛, 2013, 34(5):15-18.
- Li Kun, Song Wenchen, Zheng Quan, et al. Vanadium extraction by acid leaching after calcification of molten vanadium slag[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2013, 34(5):15-18.
- [48] 吕页清. 亚熔盐法钒渣钒铬高效清洁生产工艺流程模拟与优化[D]. 天津:天津大学, 2013.
- [49] 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, Chen Donghui, Li Lanjie, et al. Process and mechanism of leaching vanadium from vanadium-bearing steel slag with sub-molten salt[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2013, 13(6):964-968.
- [50] 王大卫,郑诗礼,王少娜,等. 钒渣 NaOH 亚熔盐法提钒工艺研究[C]//国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 2012 年全国冶金物理化学学术会议专辑:下册. 昆明:《中国稀土学报》编辑委员会, 2012:180-187.
- [51] 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 extraction from vanadium slag by sub-molten salt method[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2012, 33(1):15-19.

Research Progress and Prospect on Vanadium Extraction Process from Typical Vanadium-containing Raw Materials

ZHOU Zhihui, GAO Likun, RAO Bing, QIAO Shanxiang, TU Sheng

(School of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: In view of the complex state of vanadium occurrence in vanadium resources, the high difficulty in extraction and separation, and the increasingly strict environmental protection requirements, this paper systematically summarizes the research progress of vanadium extraction processes at home and abroad, and focuses on discussing the technical characteristics and existing problems of representative vanadium extraction processes such as roasting-leaching, hydrometallurgical separation, and others. According to the properties of different raw materials such as vanadium-titanium magnetite and vanadium-containing shale, the suitable routes of the listed vanadium extraction processes are compared and analyzed. Proposing that future vanadium extraction processes should develop towards the direction of low pollution, high recovery rate, intelligence, short process, and efficient comprehensive utilization of resources, is an important way to promote the improvement and innovation of vanadium metallurgy technology.

Key words: vanadium; extraction; vanadium-titanium magnetite; vanadium-containing shale; research progress