

综述与专论

转炉钒渣的综合利用技术进展

瞿金为 张延安 牛丽萍 吕国志 张伟光 陈 杨

(东北大学 多金属共生矿生态冶金教育部重点实验室 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 转炉钒渣是直接提钒的原料,其中包含有价值的金属,例如钒、铬、钛和铁等。目前转炉钒渣的提取工艺主要是钠化焙烧—水浸和钙化焙烧—酸浸。钠化焙烧—水浸过程将产生大量有害气体,污染环境。钙化焙烧—酸浸过程虽然没有产生废气,但酸浸溶液中杂质很多,影响了钒产品的质量。基于转炉钒渣综合利用的必要性,介绍了转炉钒渣提钒的最新技术,如:无焙烧钒渣加压酸浸、熔融钒渣直接氧化钠化/钙化提钒、硫酸铵熔融法酸浸提钒、转炉钒渣机械活化酸浸提钒、电场强化酸浸提钒等,讨论了各自工艺的优缺点,并提出了转炉钒渣综合利用的一些建议。

关键词: 转炉钒渣; 提钒; 钠化焙烧; 钙化焙烧; 机械活化; 电场强化; 浸出率

中图分类号: TF841.3 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2020)05-0001-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2020.05.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Technology Progress in Comprehensive Utilization of Converter Vanadium Slag

Qu Jinwei Zhang Ting'an Niu Liping Lü Guozhi Zhang Weiguang Chen Yang

(Northeastern University, Key Laboratory for Ecological Utilization of Multimetallic Mineral, Ministry of Education, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: Converter vanadium slag is a raw material for direct extraction of vanadium, which contains valuable metals such as vanadium, chromium, titanium and iron. At present, the extraction process of converter vanadium slag is mainly divided into sodium roasting-water leaching and calcification roasting-acid leaching. The process of sodium roasting-water leaching will produce a lot of harmful gases which will pollute the environment. Although no waste gas is generated during the process of calcification roasting-acid leaching, there are many impurities in the acid leaching solution, which affects the quality of vanadium products. Based on the necessity of comprehensive utilization of converter vanadium slag, this paper introduces the latest new technology for vanadium extraction from converter vanadium slag, discusses the advantages and disadvantages of the new process, and proposes some suggestions of comprehensive utilization of converter vanadium slag.

Key words: converter vanadium slag, vanadium extraction, sodium roasting, calcification roasting, mechanical activation, electric field enhancement, leaching rate

0 引言

钒的应用非常广泛,被誉为现代工业的“味

精”。钒最初应用于钢铁,通过细化钢的组织 and 晶粒,提高钢的强度、韧性和耐磨性。后来,由于钒在钛合金中的优异改良作用,将其应用于航空航天领

收稿日期: 2020-05-26

基金项目: 国家自然科学基金(名称: 利用高炉含钒铁水直接冶炼钒钢短流程工艺基础研究,编号: 51874094)。

作者简介: 瞿金为(1987—),男,安徽铜陵人,在读博士,研究方向: 有色金属冶金, E-mail: qujinwei2008@163.com; 通讯作者: 张延安(1960—),男,河南周口人,博士生导师,研究方向: 冶金与材料, E-mail: zta2000@163.net。

域,使航空航天工业取得了突破性的发展。此外,钒也广泛应用于化学、电池、颜料和医药等众多领域。随着全球钒制品需求的不断加大,对含钒资源展开绿色高效的综合利用研究具有重大的意义。钒的主要赋存矿物有钒钛磁铁矿、石煤钒矿和钒铅矿等。我国钒钛磁铁矿资源非常丰富,主要分布在四川攀西地区、河北承德地区和陕西汉中地区。

钒钛磁铁矿首先经选矿得到铁精矿,然后将石灰石粉和煤粉添加至铁精矿中,经过烧结得到烧结矿,烧结矿经过高炉冶炼得到含钒铁水和高炉渣,最后含钒铁水经过转炉吹氧冶炼得到钒渣和半钢,此钒渣即为转炉钒渣^[1-3]。

转炉钒渣作为直接提钒的原料,目前最为成熟的工艺是钠化焙烧—水浸提钒工艺^[4-7]和钙化焙烧—酸浸提钒工艺^[8-13]。

钠化焙烧—水浸提钒工艺是指先将转炉钒渣破碎,再球磨,然后添加一定比例的钠盐(食盐或苏打),在800℃下,于回转窑中焙烧,焙烧产物经水浸可得水浸液,向水浸液添加硫酸沉淀出粗钒,粗钒经碱溶加氯化铵得到偏钒酸铵,最后煅烧偏钒酸铵得到五氧化二钒产品。此工艺成熟,操作简单,前期投入小,一直是我国提钒的主要方法。但此工艺在焙烧过程中会产生大量的氯气、氯化氢和二氧化硫等有毒有害气体,危害周边环境和居民的健康。对于日益要求严格的环境标准,此工艺有待加以改进或替代。

钙化焙烧—酸浸提钒工艺是指先将转炉钒渣破碎,再球磨,然后添加一定量的钙盐(氧化钙或碳酸钙),在950℃下,于回转窑中焙烧,焙烧产物经酸浸可得酸浸液,酸浸液先经过净化除杂,再加入氯化铵得偏钒酸铵,最后煅烧偏钒酸铵得到五氧化二钒产品。此工艺相比钠化提钒,焙烧过程中无有毒气体排放,回转窑的结圈现象减轻,沉钒废水可循环使用,提钒尾渣不含碱金属,容易被回收再利用。但此工艺的酸浸液杂质较多,最终影响五氧化二钒产品的质量,另外钙化提钒工艺的钒回收率偏低,因而钙化法在目前仍无法完全取代钠化法。

由上述提钒工艺可知,转炉钒渣的现有提钒工艺急需改进和优化,或需要研究出新的提钒工艺。因此,笔者对近年来钒渣提钒工艺的新研究动向进行了梳理和分析,指出了下步研究或改进方向。

1 转炉钒渣成分及物相组成

转炉钒渣的物相组成与化学成分对其提钒工艺

影响很大。图1为攀钢转炉钒渣的典型物相组成,表1为攀钢转炉钒渣的主要化学成分。

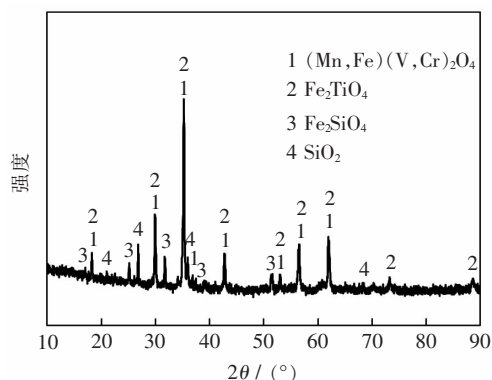


图1 转炉钒渣的XRD图谱

Fig. 1 XRD pattern of converter vanadium slag

表1 转炉钒渣的主要化学成分
Table 1 Main chemical compositions of converter vanadium slag %

Fe ₂ O ₃	SiO ₂	V ₂ O ₅	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	CO ₂
28.6	25.0	11.1	9.56	8.91	7.38	2.93
MgO	Cr ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅
2.07	1.89	1.38	0.56	0.42	0.17	0.08

由图1可知,转炉钒渣中的主要含钒物相为钒铁尖晶石相 $[(\text{Mn}, \text{Fe})(\text{V}, \text{Cr})_2\text{O}_4]$,其中Cr、Mn以类质同象取代晶格中的部分V和Fe,粘结相为 Fe_2SiO_4 ,此外,渣中还有部分 Fe_2TiO_4 和 SiO_2 存在。

由表1可知,钒渣中含量最高的元素为Fe,其次分别为Si、V、Ti、Al、Mn等。其中Si是形成粘结相的主要元素,Ti会与其它元素形成尖晶石。钒渣中 V_2O_5 含量为11.1%, SiO_2 含量为25.0%, P_2O_5 含量为0.08%, $\text{CaO}/\text{V}_2\text{O}_5$ 比为0.12,根据钒渣质量标准属于FZ11三级。该钒渣中Si含量高,易形成低熔点物质,对钒渣焙烧过程中钒氧化率会造成影响,同时不利于含钒浸出液的沉降和过滤。

2 转炉钒渣提钒新工艺研究

2.1 无焙烧直接加压酸浸提钒技术

东北大学张国权等^[14-15]提出了转炉钒渣无焙烧直接加压酸浸提钒新工艺,其工艺流程见图2。

此工艺研究了三种提钒方法的对比,主要包括:无焙烧常压酸浸、无盐氧化焙烧常压酸浸、无焙烧加压酸浸。结果表明:无焙烧常压酸浸的钒

提取率不高,最优条件下约为 60% 左右,提高反应温度和酸浓度,可略微提高钒的浸出率;无盐氧化焙烧常压酸浸的钒提取率较高,最优条件下达到 90% 左右,表明焙烧有助于含钒尖晶石的转变,有利于钒的浸出;无焙烧加压酸浸的钒提取率较高,能够达到 92% 左右。

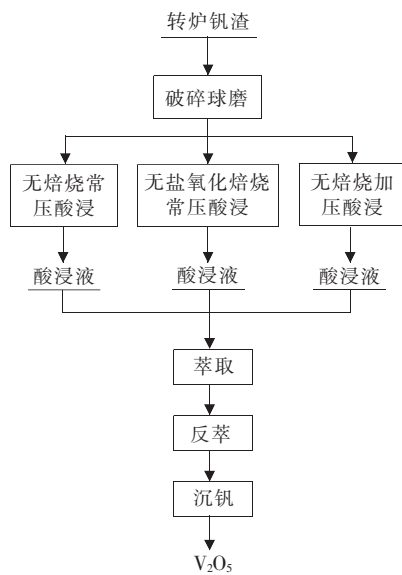


图2 无焙烧直接加压酸浸提钒工艺流程

Fig. 2 Flow chart of vanadium extraction by direct pressure acid leaching without roasting

此三种提钒方法相比,无焙烧常压酸浸工艺提钒率不高,无盐氧化焙烧常压酸浸的提钒率虽然很高,但需要增加一步焙烧,导致能耗和提钒成本增加。无焙烧加压酸浸的提钒率最高,在最优条件下:初始硫酸浓度 150 g/L,氧气分压 0.6 MPa,液固比 8:1,反应温度 110 °C,钒的浸出率可达到 92% 左右。可见,无焙烧直接加压酸浸工艺具有反应直接、快速和高效的特点,但此工艺需要特制的反应釜,且酸的消耗量很大,酸浸液中杂质也很多,需要除杂再回收钒,因而此工艺有待改进和优化。

2.2 熔融钒渣直接氧化钠化提钒新工艺

北京科技大学的宋文臣等^[16-17]提出了熔融钒渣直接氧化钠化提钒新工艺,其工艺流程如图 3 所示。

现行的钠化焙烧—水浸或钙化焙烧—酸浸提钒工艺,都是将熔融态的钒渣先冷却,再破碎球磨至一定粒度,除铁后与一定量的钠盐或钙盐混合,在回转窑或多膛炉内进行高温氧化焙烧,使钒铁尖晶石相裂解,并使钒转化为易溶于水或酸的钒酸盐。然后

采用沉淀法或萃取法从含钒溶液中回收钒,最后煅烧为 V_2O_5 产品。

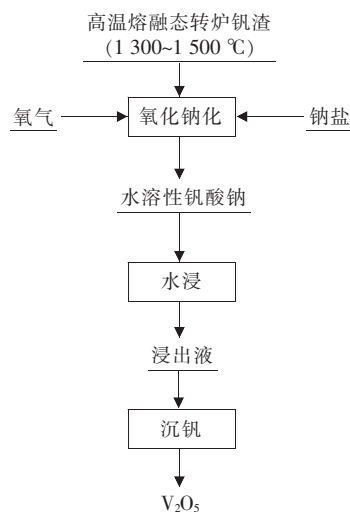


图3 熔融钒渣直接氧化钠化提钒工艺流程

Fig. 3 Flow chart of vanadium extraction from molten vanadium slag by direct oxidation and sodiumization

针对熔融钒渣先冷却再破碎、球磨和除铁,然后再氧化焙烧这一热量浪费过程,宋文臣提出利用熔融钒渣的热量,直接氧化钠化,然后再利用现有的湿法沉钒工艺制备成钒产品。

工艺中主要包括向熔融钒渣中添加钠盐,并同时喷吹氧气,使钒生成钒酸钠,而后通过水浸使钒进入到溶液中,最终沉钒得 V_2O_5 。在添加钒渣质量 25% 的碳酸钠后,在浸出温度 95 °C,浸出时间 10 min,液固比 3:1,搅拌速度 150 r/min 条件下,钒的浸出率达到 85%。

此工艺充分利用了熔融钒渣的热量,并减少了破碎、球磨、除铁、再氧化焙烧等多个程序,大大减少了提钒的步骤,节省了大量的费用和能耗。但此工艺对钠盐的消耗量很大,水浸渣量大且含钠高,它的再利用仍是个大问题,另外,钒的浸出率不是很高。因此,此项工艺有待优化。

2.3 熔融钒渣直接氧化钙化提钒新工艺

北京科技大学的李昆等^[18-19]提出了熔融钒渣直接氧化钙化提钒新工艺,其工艺流程如图 4 所示。

该工艺将 CaO 加入到熔融态的转炉钒渣中并吹氧,目的是使钒渣中的低价钒氧化为四价或五价的钒,高价钒与 CaO 形成钒酸钙。然后将其破碎球磨至 200 目(74 μm),再进入到酸浸和沉钒工序,最终得到 V_2O_5 产品。结果表明:当钙钒比为 0.5 ~

0.9 酸浸温度 90 ℃, 酸浸时间 120 min, 液固比 5 : 1, 初始硫酸浓度 20% 的条件下, 钒的浸出率可以达到 88%。

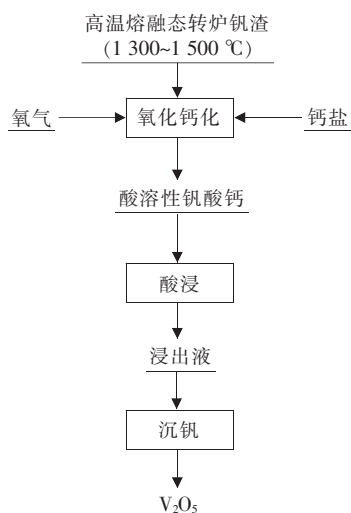


图 4 熔融钒渣直接氧化钙化提钒工艺流程

Fig. 4 Flow chart of vanadium extraction from molten vanadium slag by direct oxidation and calcification

此工艺不仅利用了熔融钒渣的热量, 节省了大量的能耗, 而且在钒渣熔融态情况下添加 CaO 并吹氧, 可以在短时间内使低价钒氧化生成易溶于酸的钒酸钙。但此工艺要实现工业化需要特制的耐高温反应设备, 另外钒浸出率有待提高, 因而工艺需加以改进。

2.4 硫酸铵熔融法酸浸提钒新工艺

东北大学的李亮^[20]提出了硫酸铵熔融法酸浸提钒新工艺, 其工艺流程如图 5 所示。

该工艺先将转炉钒渣破碎球磨至一定粒度, 混合一定量的硫酸铵和硫酸氢钾, 加热到一定温度, 使得钒渣中的 V、Ti、Fe 等难溶物质转化为可溶性物质。然后将其进行酸浸, 得到酸浸液。再对酸浸液进行萃取提钒, 反萃钒。最后调节 pH 值沉钒再煅烧得 V₂O₅ 产品。该研究表明当焙烧条件为: 转炉钒渣 : 硫酸铵 : 硫酸氢钾 = 1 : 8 : 0.67, 焙烧温度 350 ℃, 焙烧时间 36 min 时, 焙烧熟料水浸后 V、Ti、Fe 的浸出率分别为 69%、30.5%、66.5%。当酸浸条件为: 液固比 8 : 1, 初始酸浓度 12%, 酸浸温度 95 ℃, 酸浸时间 5 h。转炉钒渣的 V 浸出率为 97%。最终酸浸液经萃取、反萃和沉钒后, 可得到纯度为 90% 以上的 V₂O₅ 产品。

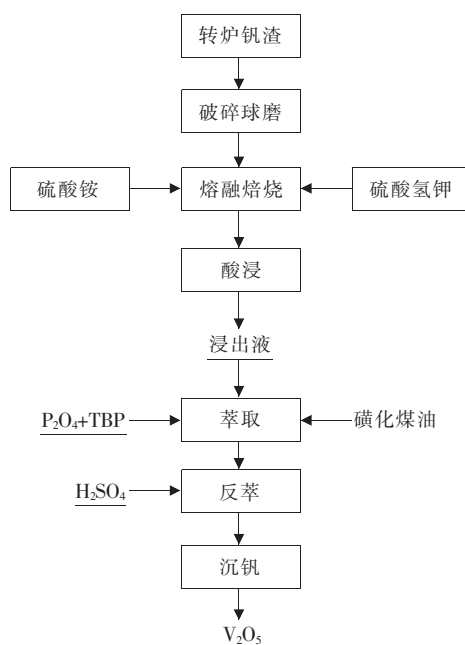


图 5 硫酸铵熔融法酸浸提钒工艺流程

Fig. 5 Flow chart of vanadium extraction by acid leaching with ammonium sulfate melting method

此工艺采取焙烧—水浸—酸浸—萃取—反萃—沉钒—煅烧的提钒工艺流程, 与现有工艺相比, 焙烧能耗降低, 生产成本降低, 钒的浸出率和萃取率也很高, 有一定优势。但此工艺由于是硫酸铵焙烧, 需要特制的反应设备, 另外硫酸铵焙烧会腐蚀设备, 产生氨气和二氧化硫, 危害环境, 需要对此气体加以回收利用。另外, 钒渣经过硫酸铵焙烧后酸浸, 虽然钒的浸出率很高, 但 Fe 和 Ti 等其他杂质的浸出也过多, 最终会影响 V₂O₅ 产品的质量。

2.5 转炉钒渣机械活化酸浸提钒新工艺

重庆大学的向俊^[21]提出了转炉钒渣机械活化酸浸提钒新工艺, 其工艺流程如图 6 所示。

该工艺是先将转炉钒渣破碎分选, 然后将分选的转炉钒渣继续球磨一定的时间, 机械活化后的转炉钒渣混合一定量的 CaO 在马弗炉中进行钙化焙烧, 焙烧熟料再进行酸浸提钒。提钒尾渣可继续回收利用, 先将提钒尾渣与碳混合, 在 1 300 ℃ 下半熔融还原, 再通过磁选可得到含 V 和 Cr 的铁合金, 磁选剩余物为高钛渣, 可作为原料返回提钛工序使用或作为一般固体废弃物堆存。

该研究结果表明: 未活化钒渣经过钙化焙烧后, 在最优浸出条件(焙烧熟料粒度 < 74 μm, 钙钒摩尔

比 1 : 1 , 焙烧温度 900 ℃ , 酸浸温度 90 ℃ , 固液比 1 : 20 , 搅拌速度 200 r/min , 酸浓度 pH = 2.5 , 浸出 60 min) 下 , 钒的浸出率为 86% 。而经过机械活化 80 min 的转炉钒渣在钙化焙烧后 , 在此条件下浸出 20 min , 钒的浸出率由 75% 提高至 90% 。可见 , 机械活化使钒渣的粒度减小 , 比表面积增大 , 促进了钒渣的焙烧反应和酸浸反应。

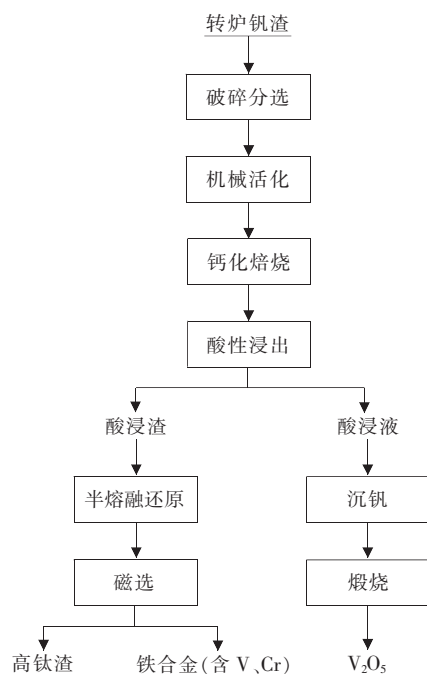


图6 转炉钒渣机械活化酸浸提钒工艺流程

Fig. 6 Flow chart of vanadium extraction from converter vanadium slag by acid leaching with mechanical activation

该工艺中半熔融还原结果表明: 采用半熔融还原 , 同时提取钒铁铬是可行的; 在还原温度 1 300 ℃ , 加碳量 12% , 还原时间 1 h 条件下 , 酸浸渣中 99% 的铁、90% 的钒和 95% 的铬生成了铁合金 , 钒则存在于尾渣中 , 其中二氧化钛含量达 27% 。

此工艺在传统钙化焙烧工艺上进行了优化 , 增加了焙烧前的机械活化 , 这显著促进了钒渣的焙烧反应并缩短了后续酸浸时间 , 使钒的浸出率有了一定的提高; 另外 , 对酸浸渣的综合回收利用具有一定的环保优势。但此工艺的钒元素转化率偏低 , 且两段焙烧耗能大 , 增加了钒渣处理的成本。

2.6 转炉钒渣电场强化酸浸提钒新工艺

重庆大学的李艳^[22]提出了转炉钒渣电场强化酸浸提钒新工艺 , 其工艺流程如图 7 所示。

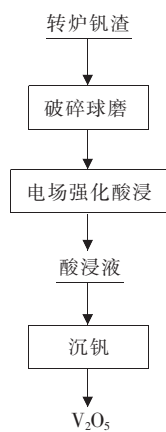


图7 转炉钒渣电场强化酸浸提钒工艺流程

Fig. 7 Flow chart of vanadium extraction from converter vanadium slag by acid leaching with electric field enhancement

该工艺先将转炉钒渣破碎球磨至一定粒度 , 直接电场强化酸性浸出 , 浸出液直接回收钒 , 沉淀并煅烧制备 V_2O_5 。

该研究表明在最优浸出条件下: H_2SO_4 加入量 40% , $MnSO_4$ 加入量 20% , 电流 0.6 A , 电压 2.8 ~ 3.0 V , 电极间距 20 mm , 液固比 4 : 1 , 酸浸温度 85 ℃ , 酸浸时间 4 h , 钒的浸出率达 79.64% 。而直接酸浸的钒浸出率为 67.18% , 浸出率有了一定的提高。研究过程表明电场不仅强化含钒物相的破坏 , 也通过阳极氧化作用 , 使钒渣中低价钒氧化为高价钒 , 从而提高钒的浸出效率。

此工艺流程非常简单 , 步骤也较少 , 在电场强化浸出过程中 , 浸出时间也较短 , 与传统工艺相比 , 大大减少了对环境的污染。但此工艺耗酸量巨大 , 硫酸锰的费用也很高 , 钒的回收率偏低 , 另外也需要特制的反应装备 , 要实现工业化仍有一定的距离。

3 结论与展望

1) 转炉钒渣作为直接提钒的原料 , 目前国内外提钒工艺主要为钠化焙烧—水浸提钒和钙化焙烧—酸浸提钒 , 由于其对环境的影响 , 迫切需要一种新的工艺代替或对原有工艺加以改进和优化。

2) 转炉钒渣的无焙烧直接加压酸浸工艺具有反应直接、快速和高效的特点 , 但此工艺需要特制的反应釜 , 酸的消耗量很大 , 酸浸液中杂质也过多 , 回收钒之前需要除杂 , 因而此工艺有待加以改进和优化。

3) 熔融钒渣直接钠化或钙化,再水浸或酸浸提钒工艺,充分利用了熔融钒渣的热能,但直接钠化工艺耗钠量很大,且钒的浸出率不是很高;直接钙化工艺仍需要特制的耐高温反应设备,且高温熔融下钒渣容易粘结。

4) 虽然转炉钒渣的硫酸铵酸浸提钒工艺中钒的浸出率很高,但生产过程中仍有废气生成,且成本很高,酸浸液中的铁和钛含量过高,后续仍需处理。转炉钒渣的机械活化钙化焙烧提钒工艺具有一定的优势,并且还处理了最终的提钒尾渣,但此工艺的钒元素转化率偏低,仍需加以改进。转炉钒渣的直接

电场强化浸出具有一定的理论意义,但离实际生产仍有一定的距离。

目前,转炉钒渣的提钒工艺仍存在各式各样的问题,如能耗、成本和环境污染等问题。因此,转炉钒渣的综合利用技术仍需进一步的提高。综合来说,无论转炉钒渣是否需要进行预处理,如破碎球磨、氧化焙烧和机械活化,最终的目的是提钒和沉钒,此外,酸浸渣的回收利用也是一项待以解决的难题。综合多种提钒新工艺,应该发挥各技术的优点,避免缺点,更进一步地优化工艺,使得转炉钒渣得以真正的综合利用。

参考文献

- [1] 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.
(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.)
- [2] Zhao Beibei, Li Lanjie, Liu Lin *et al.* Study on extraction of vanadium from waste vanadium catalyst [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources 2019, 6: 80-83.
(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, 6: 80-83.)
- [3] Qu Jinwei, Zhang Ting'an, Niu Liping *et al.* Technology progress in comprehensive utilization of vanadium-chromium reducing slag [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy) 2020(1): 79-83.
(瞿金为, 张廷安, 牛丽萍, 等. 钒铬还原渣综合利用技术进展[J]. 有色金属(冶炼部分) 2020(1): 79-83.)
- [4] Li Xiumin, Zhang Yimin, Huang Jing *et al.* Research of vanadium extraction from vanadium-bearing intermediate slag mixed into tailings with sodium roasting [J]. Metal Mine 2013(11): 158-161.
(李秀敏, 张一敏, 黄晶, 等. 含钒中间渣返回钒渣钠化焙烧提钒研究[J]. 金属矿山 2013(11): 158-161.)
- [5] Xie Zhaoming, Deng Rongrui, Liu Zuohua *et al.* Evolution behavior of fractal growth of sodium roasting converter vanadium slag powder [J]. CIESC Journal 2019, 70(5): 1904-1912.
(谢昭明, 邓容锐, 刘作华, 等. 钠化焙烧转炉钒渣粉体分形生长的演化行为[J]. 化工学报 2019, 70(5): 1904-1912.)
- [6] Shi Zhixin. Characterization of variation of vanadium spinel and fayalite during the calcination of vanadium slag [J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section) 2018(4): 4-9.
(史志新. 钒渣钠化焙烧过程中钒尖晶石和铁橄榄石的变化规律表征[J]. 有色金属(选矿部分) 2018(4): 4-9.)
- [7] Meng Qingwen, Zhang Jinliang. Experimental research of sodium salt roasting vanadium extraction by leaching for a certain kind of vanadium titano magnetite concentrate from Chaoyang city [J]. Mining Engineering 2017, 15(3): 34-36.
(孟庆文, 张金良. 朝阳某钒钛磁铁矿精矿钠化焙烧—水浸提钒试验研究[J]. 矿业工程 2017, 15(3): 34-36.)
- [8] Fu Nianxin, Zhang Lin, Liu Wuhan *et al.* Mechanism analysis of calcium roasting phase transformation process of vanadium slag [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2018, 28(2): 377-385.
(付念新, 张林, 刘武汉, 等. 钒渣钙化焙烧相变过程的机理分析[J]. 中国有色金属学报 2018, 28(2): 377-385.)
- [9] He Wenyi. Separation of magnetic vanadium slag and vanadium extraction by calcification roasting [J]. Iron Steel Vanadium Titanium 2018, 39(2): 39-43.
(何文艺. 磁性钒渣分离及钙化提钒工艺研究[J]. 钢铁钒钛 2018, 39(2): 39-43.)
- [10] Shen Biao. Temperature control of acid leaching process for calcified clinker of vanadium slag [J]. Iron Steel Vanadium Titanium 2018, 39(5): 30-36.
(申彪. 钒渣钙化焙烧熟料酸浸工艺温度控制[J]. 钢铁钒钛 2018, 39(5): 30-36.)
- [11] Chen Shurui, Yang Shaoli, Ma Lan *et al.* Research status of vanadium extraction from steel slag containing vanadium [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources 2019(3): 69-74.
(陈书锐, 杨绍利, 马兰, 等. 含钒钢渣提钒研究现状[J]. 矿产保护与利用 2019(3): 69-74.)

- [12] Lü Changxiao, Zhang Ting'an, Zhang Ying *et al.* Comprehensive recovery of vanadium from calcification roasting-acid leaching tailings[J]. Chinese Journal of Rare Metals 2019(4): 1-12.
(吕昌晓, 张廷安, 张莹, 等. 从钙化焙烧—酸浸尾渣中综合回收钒的研究[J]. 稀有金属 2019(4): 1-12.)
- [13] Guo Shuanghua. Extraction of vanadium from ferrovanadium slag by process of roasting calcification-acidic leaching[J]. Hydro-metallurgy of China 2018, 37(2): 111-113.
(郭双华. 用钙化焙烧—酸浸法从钒铁渣中提取钒试验研究[J]. 湿法冶金 2018, 37(2): 111-113.)
- [14] 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.
(张国权, 张廷安, 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.)
- [15] Zhang Ying, Zhang Ting'an, Lü Guozhi *et al.* Separation between vanadium and iron in acid leaching solution of converter vanadium slag without calcination[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science) 2015, 36(10): 1445-1448.
(张莹, 张廷安, 吕国志, 等. 钒渣无焙烧浸出液中钒铁萃取分离[J]. 东北大学学报(自然科学版) 2015, 36(10): 1445-1448.)
- [16] Song Wencheng, 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.
(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.)
- [17] Song W C, Li K, Zheng Q *et al.* A novel process of vanadium extraction from molten vanadium bearing slag[J]. Waste Biomass Valor 2013, 12: 1-6.
- [18] Li Kun, Song Wencheng, Zheng Quan *et al.* Vanadium extraction by acid leaching after calcification of molten vanadium slag[J]. Iron Steel Vanadium Titanium 2013, 34(5): 15-22.
(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): 15-22.)
- [19] Song W C, Li H, Zhu F X *et al.* Extraction of vanadium from molten vanadium bearing slag by oxidation with pure oxygen in the presence of CaO[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China 2014, 24: 2687-2694.
- [20] Li Liang. Research of extracting V_2O_5 from the converter vanadium slag with novel process[D]. Shenyang: Northeastern University 2013.
(李亮. 从转炉钒渣中提取五氧化二钒的新工艺研究[D]. 沈阳: 东北大学 2013.)
- [21] Xiang Junyi. Fundamental study on the optimization of vanadium extraction from LD converter slag by calcification based process and the comprehensive utilization of tailings[D]. Chongqing: Chongqing University 2018.
(向俊一. 转炉钒渣钙化提钒工艺优化及提钒尾渣综合利用基础研究[D]. 重庆: 重庆大学 2018.)
- [22] Li Yan. Experimental study on leaching of vanadium slag by electric field intensification[D]. Chongqing: Chongqing University 2012.
(李艳. 电场强化转炉钒渣浸取试验研究[D]. 重庆: 重庆大学 2012.)

编辑 杨冬梅

大连液流电池储能电站 220 kV 送出工程启动

9月16日,大连液流电池储能调峰电站国家示范项目的220 kV送出工程正式启动。该项目于2016年11月开工建设,计划2020年12月竣工投运。

该项目位于大连市西岗区,是国家能源局批准的首个大型化学储能国家示范项目,也是中国唯一的化学储能调峰电站,建设规模达到200 MW/800 MW时,总建筑面积36 519 m²,总投资38亿元。其采用国内自主研发、具有自主知识产权的全钒液流电池储能技术,适用于大功率、大容量储能,具有安全性好、循环寿命长、响应速度快、能源转换效率高、绿色环保等优点。

该项目建成后,可发挥削峰填谷的双重作用,对提高大连电网调峰能力和大连南部地区供电可靠性、保障电网安全经济运行,改善辽宁电网的电源结构,促进风电的开发提供有利条件,推动储能技术应用和发展等诸多方面具有重要意义。

摘自 http://www.dlxww.com/news/content/2020-09/18/content_2475112.htm