

# METSIM 在含钒钢渣加压强化提钒工艺中的应用研究

王海旭<sup>1</sup>, 李兰杰<sup>2\*</sup>, 白 丽<sup>1</sup>, 万贺利<sup>1</sup>

(1. 承德钒钛新材料有限公司, 河北 承德 067002; 2. 河钢材料技术研究院, 河北 石家庄 050023)

**摘 要:** 针对提钒工艺中的关键环节, 采用 METSIM 软件对含钒钢渣加压强化提钒工艺进行了工艺建模和物料衡算, 得到了整个工艺过程中各物流的质量流量以及所包含的物质的详细信息。模拟过程可清晰了解每种物质详细走向, 为工艺的设计及优化提供参考。结合上述模拟结果和产线实际运行中存在的蒸发水量较大的问题, 设计了优先处理尾渣中钒酸钙, 其次再进行优化尾渣洗涤的方式。结果表明通过模拟分析可进一步优化实际工艺方案, 模拟结果使提钒工艺中总用水量减少 7 552 t/a, 蒸发水量减少 7 521 t/a, 显著降低了提钒工艺能耗。

**关键词:** 提钒; 含钒钢渣; 加压浸出; METSIM; 流程模拟; 物料衡算

中图分类号: TF841.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2023)01-0092-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.01.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听  
语  
音  
聊  
科  
研  
与  
作  
者  
互  
动

## Application of METSIM on vanadium extraction from vanadium bearing steel slag with pressure strengthening

Wang Haixu<sup>1</sup>, Li Lanjie<sup>2\*</sup>, Bai Li<sup>1</sup>, Wan Heli<sup>1</sup>

(1. Chengde Vanadium Titanium New Material Co., Ltd., Chengde 067002, Hebei, China; 2. HBIS Materials Technology Research Institute, Shijiazhuang 050023, Hebei, China)

**Abstract:** In this paper, in view of the key steps in the vanadium extraction process, METSIM software was used to carry out the process modeling and material balance in the extraction process from vanadium bearing steel slag using pressure strengthening, and the mass flow rate of each logistics and the detailed information of the substance in the whole process were obtained. The simulation process could clearly understand the detailed trend of each substance, and provided a reference for the design and optimization of the process. Combined with the above simulation results and the problem of large amount of evaporative water in the actual operation of the production line, the calcium vanadate in the tail slag was firstly treated, and then the washing method of the tail slag was optimized. The results show that the actual process scheme can be further optimized by simulation analysis. The total water consumption and evaporation water in vanadium extraction process can be reduced respectively by 7 552 t/a and 7 521 t/a, and the energy consumption of vanadium extraction process can be significantly reduced by the simulation results.

**Key words:** vanadium extraction, vanadium bearing steel slag, pressure strengthening, METSIM, flow simulation, material balance

收稿日期: 2022-10-30

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC1910604-5)。

作者简介: 王海旭, 1991 年出生, 男, 吉林白山人, 本科, 主要从事提钒化工技术开发工作, E-mail: wanghaixu@hbisco.com;

\* 通讯作者: 李兰杰, 1983 年出生, 男, 山东潍坊人, 博士, 教授级高工, 主要从事钒钛新材料研发及产业化应用工作, E-mail: lilanjie@hbisco.com。

## 0 引言

钒是重要的战略金属,广泛应用于钢铁、航空航天、新能源等领域<sup>[1-4]</sup>,特别是近年来,随着能源结构变革,全钒液流电池因具有循环寿命长、效率高、安全性高等优势,成为新能源大规模储能技术领域的重要发展方向<sup>[5-7]</sup>。全钒液流电池中钒电解液用高纯钒的需求量与之剧增,预计到“十四五”末,储能用高纯钒缺口需求量将达到 3 万 t/a,因此,开展钒提取相关研究具有广阔的前景<sup>[8-10]</sup>。

含钒钢渣是典型的大宗冶金固废,我国每年排放数百万吨<sup>[11-12]</sup>。含钒钢渣来自于钒钛磁铁矿炼钢过程<sup>[13-14]</sup>,含钒钢渣具有以下特点:①CaO 含量高,一般为 30%~60%,质地密实,解离度差;②钒含量较低,一般为 1%~4%,赋存状态复杂<sup>[15-17]</sup>。含钒钢渣的无害化、绿色化、资源化处置已成为钢铁行业棘手的问题。

近年,中国科学院过程工程研究所与河钢股份有限公司承德分公司基于含钒钢渣特点开发了含钒钢渣加压强化提钒专利技术<sup>[18]</sup>,该工艺在反应温度 120 ℃、反应压力 0.6 MPa 条件下可实现钒的浸出率≥85%,不仅可解决含钒钢渣无害化、绿色化、资源化处置问题,而且过程可吸收二氧化碳,进一步降低钢铁行业碳排放量。

目前该工艺正处于放大阶段,为了详细了解各操作单元的物料走向以及整个工艺的介质循环及平衡情况,需获得整个工艺过程的物料平衡。前期物料平衡主要采用 Excel 软件逐个操作单元计算,耗时大,出错率高,流程改进或放大均需大量修改,可移植性差。

METSIM 起源于一个冶金工艺的模拟程序,经过不断的完善与发展,现已成功应用于很多冶金工艺的流程模拟<sup>[19-22]</sup>。蔡旺等采用 METSIM 软件对冶炼烟气制酸工艺进行了物料衡算,所建立模型的计算结果与实际生产结果基本一致<sup>[23]</sup>。张小东等采用 METSIM 软件对重烧氧化镁工艺和轻烧氧化镁工艺分别进行了模拟对比,获得了工艺的物料平衡和热平衡计算结果,为焙烧生产选择燃料气种类提供了参考<sup>[24]</sup>。崔沐采用 METSIM 软件对基于浸没燃烧熔池熔炼技术所处理的含铜污泥和废有机溶剂进行了模拟,有效解决了 Excel 效率低和准确性差的问题,大幅提高了设计效率<sup>[25]</sup>。

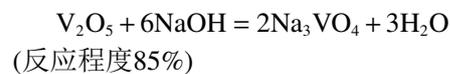
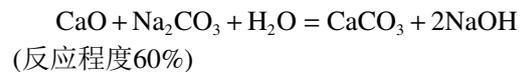
METSIM 具有以下优势:①流程模拟可大幅节省计算时间,且能快速的实现工艺更改;②可任意更改设备类型与生产规模,从而选择最优工艺;③可获得更加详细的工艺数据。笔者拟采用 METSIM 软件对含钒钢渣加压强化提钒工艺进行物料衡算,获得整个工艺过程中主要物质的走向,根据模拟计算结果指导工艺参数的优化与改进,最终实现工艺指标的显著改善与提升。

## 1 模拟过程

含钒钢渣加压强化提钒工艺主要包括加压浸出单元、过滤分离单元、尾渣三级逆流洗涤单元、冷却结晶单元、钒酸钠过滤分离单元、钙化单元、钒酸钙过滤分离单元、钒酸钙洗涤单元以及反应介质再生单元,分别介绍如下:

### 1) 加压浸出单元

反应介质采用氢氧化钠和碳酸钠混合溶液,质量分数分别为 20% 和 10%,反应温度 120 ℃、反应压力 0.6 MPa,液固比为 8:1,该过程发生的主要反应如下:



### 2) 过滤分离单元

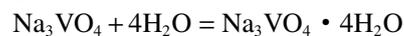
反应后浆料冷却后直接过滤,过滤后得到粗尾渣和含钒液,其中粗尾渣含湿率为 40%,含钒液直接进入冷却结晶单元。

### 3) 尾渣三级逆流洗涤单元

洗水添加量与粗尾渣质量相等,并且所添加的洗水对尾渣进行三级逆流洗涤。洗涤之后得到尾渣及洗水,所得到的洗水直接进入反应介质再生单元,实现氢氧化钠和碳酸钠的循环。

### 4) 冷却结晶单元

得到含钒液冷却至 40 ℃ 时,钒酸钠大量结晶,结晶后溶液中钒酸钠浓度降低至 1.5 g/L,结晶液直接进入钒酸钠过滤分离单元。该单元发生的反应如下:



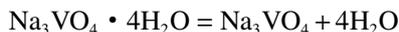
### 5) 钒酸钠过滤分离单元

结晶液经过过滤分离单元后得到钒酸钠湿晶和结晶后液,钒酸钠湿晶的含湿率为 30%,直接进入钙化单元,结晶后液进入反应介质再生单元,实现氢

氧化钠和碳酸钠的循环。

6) 钙化单元

钒酸钠湿晶在钙化单元会溶解, 并与所添加的氧化钙反应生成钒酸钙沉淀和氢氧化钠, 该单元通过阳离子置换可实现反应介质的循环, 发生的反应如下:



(反应程度100%)



(反应程度99%)

7) 钒酸钙过滤分离单元

钙化完的溶液直接进入钒酸钙过滤分离单元, 分离后得到钒酸钙和钙化后液, 钒酸钙含湿率为 40%, 钙化后液直接进入反应介质再生单元以实现反应介质的循环。

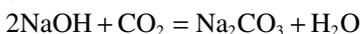
8) 钒酸钙洗涤单元

得到的钒酸钙产品因含湿率较大, 里面夹带较

多的氢氧化钠及碳酸钠, 所以需进行一次洗涤, 洗涤添加水量为粗钒酸钙的一倍。洗涤之后过滤得到钒酸钙产品以及洗涤后液, 洗涤后液直接进入反应介质再生单元进行介质的循环。

9) 反应介质再生单元

整个工艺分离所产生的液相全部进入反应介质再生单元, 由于在浸出单元, 碳酸钠中的碳酸根与氧化钙反应以碳酸钙形式进入了渣相, 所以碳酸钠全部转化为氢氧化钠, 为了实现介质的循环, 需要对返回的反应介质进行碳化, 该单元发生的主要反应如下:



(反应程度100%)

该单元不仅可实现反应介质的循环, 同时该过程为一个减碳过程, 其可吸收一定量的二氧化碳, 降低钢铁行业二氧化碳的排放量。采用 METSIM 对以上工艺进行了流程建模, 如图 1 所示。

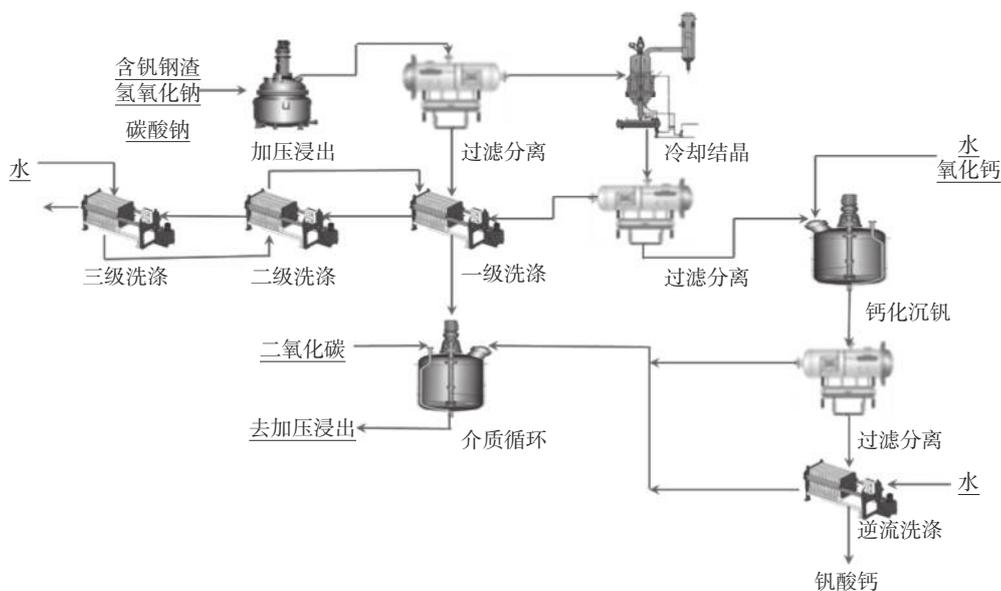


图 1 METSIM 软件建模示意  
Fig. 1 Schematic diagram of METSIM software modeling

## 2 物料平衡计算

该模型以年处理 10 万 t 含钒钢渣为计算基准, 含钒钢渣来自承德, 其组成如表 1 所示。基于上面模拟过程所描述的反应条件进行 METSIM 中模拟单元参数设置, 每个单元均依据设置的参数及输入物料而得到输出物料, 整个工艺所有单元数据收敛后得到了整个工艺总物料平衡以及每股物料的成分、质量流量, 可以清晰地了解每种物质的走向, 得到的

总物料平衡如表 2 所示, 过程中水平衡、碱平衡以及钒平衡如图 2 所示。由于整个反应过程中氢氧化钠回收利用, 因此不需要添加, 损失的钠来自碳酸钠物料。

从表 2 可以看出, 整个工艺输入与输出项已达到平衡。介质循环之后, 仅需补充 1 585 t/a 碳酸钠即可达到浸出液要求, 实现钒 85% 的浸出率, 而且介质循环过程会吸收 18 760 t/a 二氧化碳。

表 1 含钒钢渣的主要成分  
Table 1 Composition of steel slag containing vanadium

V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
2.57	41.09	1.90	1.57	0.57	24.28	1.85	7.94	11.90	2.45

表 2 总物料的平衡  
Table 2 Balance of total materials

输入		输出	
名称	质量流量	名称	质量流量
含钒钢渣	100 000	尾渣	195 272
碳酸钠	1 585	钒酸钙	7 549
氧化钙	2 359	冷凝水	147 480
水	227 597		
二氧化碳	18 760		
合计	350 301	合计	350 301

图 2 列出了主要物流的五氧化二钒、水、氢氧化钠、碳酸钠的质量流量, 从图 2 可以清楚的看到整个工艺中五氧化二钒、水、氢氧化钠、碳酸钠的走向。对于钒平衡, 分析图 2 可以看出, 含钒钢渣中含有的 2 570 t/a 五氧化二钒, 浸出率 85% 情况下, 399 t/a 五氧化二钒进入尾渣, 2 171 t/a 五氧化二钒

进入钒酸钙产品中, 整个工艺钒的回收率为:  $2\ 171 / 2\ 570 \times 100\% = 84.47\%$ 。

对于水平衡, 从表 2 中可以看出整个工艺总用水量 227 597 t/a, 包括尾渣洗涤水 195 272 t/a、钙化用水 24 776 t/a、钒酸钙洗涤水 7 549 t/a, 由于输出项中仅有尾渣和钒酸钙含湿 40%, 分别带走 76 971 t/a 和 2 909 t/a 水, 所以为保证整个工艺的顺行, 过程需要蒸发 147 480 t/a 水, 蒸发水量可直接用于尾渣洗涤水, 所以整个工艺实际需要添加的水量为 80 117 t/a。但是过程蒸发水会导致工艺能耗较高, 钒酸钙洗涤水中氢氧化钠和碳酸钠质量分数仅为 3.1% 和 0.1%, 因此可以将尾渣洗涤水先用于钒酸钙的洗涤, 然后再进行尾渣洗涤, 这样减少整个工艺的用水量, 过程蒸发水量也会随之降低。进行上述用水量的优化前后主要物流的影响对比如表 3 所示。

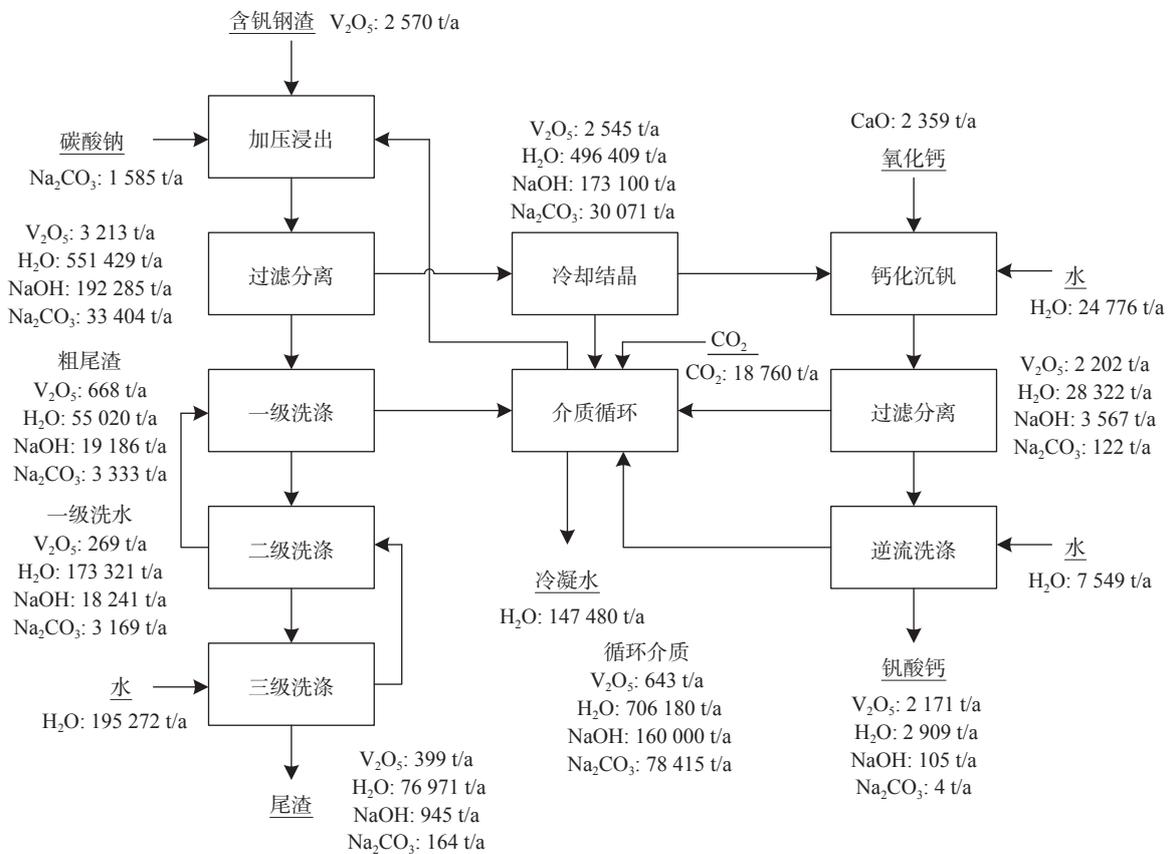


图 2 过程水平衡、碱平衡以及钒平衡

Fig. 2 Balance of water, base and vanadium in the vanadium extraction process

分析表3可以看出,优化后总用水量减少了7 552 t/a,蒸发水量减少了7 521 t/a,但是由于工艺添加的洗水先洗涤钒酸钙,然后洗涤尾渣,所以洗涤后的钒酸钙夹带的氢氧化钠和碳酸钠减少,尾渣夹

带的碱量有所增加。但是优化后工艺需要补充的碳酸钠仅比优化前工艺需要补充的碳酸钠增加了50 t/a,即洗水量减少7 552 t/a可以导致蒸发水量减少7 521 t/a及碳酸钠用量增加50 t/a。

表3 优化前后主要物流质量流量对比  
Table 3 Comparison of main logistics mass flow before and after optimization

	碳酸钠	总用水量	蒸发水量	尾渣				钒酸钙			
				V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	NaOH	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O	NaOH	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
优化前	1 585	227 597	147 480	399	76 971	945	164	2 171	2 909	105	4
优化后	1 635	220 045	139 959	400	76 846	1 065	168	2 170	2 996	21	0.7

通过对整个工艺总物料平衡、水平衡、钒平衡及碱平衡可以看出该工艺的物料衡算已达到平衡,这也说明了所建模型的可靠性。但目前工艺流程的模拟计算只针对了物料衡算,对于热量衡算没有涉及,希望之后通过不同物料热容的确定而实现热量衡算,为后期工艺的能量优化提供数据支撑。

### 3 结论

通过对含钒钢渣加高压强化提钒工艺的物料衡算,得到以下结论:

1) METSIM 软件可实现含钒钢渣加高压提钒工艺的流程模拟。通过 METSIM 对工艺建模以后,可

以清晰地了解每股物流的详细信息以及每种物质在整个工艺中的走向。根据物料衡算结果可知,钒的浸出率为85%条件下,含钒钢渣中五氧化二钒15.53%存在于尾渣中,84.47%的五氧化二钒存在于钒酸钙产品中。

2) 物料衡算结果显示整个工艺过程蒸发水量较大,分析工艺的用水量,提出将尾渣洗水先洗涤钒酸钙,然后再洗涤尾渣的优化方案。优化后总用水量减少了7 552 t/a,蒸发水量减少了7 521 t/a,通过该方法可使工艺路线及控制参数得到优化,显著降低了产线能耗。

### 参考文献

- [1] Moskalyk R R, Alfantazi A M. Processing of vanadium: A review[J]. *Minerals Engineering*, 2003, 16(8): 793-805.
- [2] Sun Shilin. Study on preparation technology of aerospace grade vanadium-aluminum intermediate alloy[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015: 14-16.  
(孙诗淋. 航空航天级钒铝中间合金制备工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015: 14-16.)
- [3] Feng Junning, Hu Zhijie, Ma Zhongxian, *et al.* Intermediate alloys for titanium alloys and their standardization[J]. *World Non-ferrous Metals*, 2016, (2): 49-52.  
(冯军宁, 胡志杰, 马忠贤, 等. 钛合金用中间合金及其标准化[J]. *世界有色金属*, 2016, (2): 49-52.)
- [4] Chol C, Kim S, Kim R, *et al.* A review of vanadium electrolytes for vanadium redox flow batteries[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 69: 263-274.
- [5] Yan Chuanwei. Development of large-scale long-term energy storage and all-vanadium flow battery industry[J]. *Solar Energy*, 2022, 5: 14-22.  
(严川伟. 大规模长时储能与全钒液流电池产业发展[J]. *太阳能*, 2022, 5: 14-22.)
- [6] Zhang Huamin, Zhang Yu, Li Xianfen, *et al.* Development and industrialization of all-vanadium liquid flow battery energy storage technology[J]. *High Technology and Industrialization*, 2018, 4: 59-63.  
(张华民, 张宇, 李先锋, 等. 全钒液流电池储能技术的研发及产业化[J]. *高科技与产业化*, 2018, 4: 59-63.)
- [7] Yang Linlin, Liao Wenjun, Su Qing, *et al.* Development status of all-vanadium flow-through battery technology[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2013, 2(2): 140-145.  
(杨霖霖, 廖文俊, 苏青, 等. 全钒液流电池技术发展现状[J]. *储能科学与技术*, 2013, 2(2): 140-145.)
- [8] Li Xiumin, Zhang Yimin, Huang Jing, *et al.* Effect of leaching aid on acid leaching of vanadium from vanadium tailings of Panzhihua Iron & Steel Co., Ltd.[J]. *Metal Mine*, 2012, (7): 158-160, 168.  
(李秀敏, 张一敏, 黄晶, 等. 助浸剂对攀钢钒尾渣酸浸提钒的影响[J]. *金属矿山*, 2012, (7): 158-160, 168.)
- [9] Zhu Guangjun, Qiu Huidong, Yang Zhili, *et al.* Study on kinetics of vanadium extraction from steel slag by chlorination

- leaching[J]. *Materials Review*, 2011, 25: 258–260.  
(朱光俊, 邱会东, 杨治立, 等. 钢渣氯化浸取提钒工艺的动力学研究[J]. *材料导报*, 2011, 25: 258–260.)
- [10] Ye Guohua, He Wei, Lu Lu, *et al.* Study on direct leaching of vanadium by sulfuric acid from vanadium bearing steel slag under normal temperature and pressure[J]. *Rare Metals*, 2013, 37(5): 807–813.  
(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.)
- [11] Gao Minglei, Chen Donghui, Li Lanjie, *et al.* Leaching behavior of vanadium from vanadium bearing steel slag in KOH molten salt medium[J]. *Journal of Process Engineering*, 2011, 11(5): 761–766.  
(高明磊, 陈东辉, 李兰杰, 等. 含钒钢渣中钒在KOH亚熔盐介质中溶出行为[J]. *过程工程学报*, 2011, 11(5): 761–766.)
- [12] Fu Zibi, Peng Yi, Zhang Lin, *et al.* Experimental study on vanadium extraction from steel slag by waste acid leaching of titanium dioxide[J]. *Progress in Titanium Industry*, 2009, 26(5): 33–37.  
(付自碧, 彭毅, 张林, 等. 钛白废酸浸出钢渣提钒试验研究[J]. *钛工业进展*, 2009, 26(5): 33–37.)
- [13] Yang Subo, Luo Zezhong, Wen Yongcai, *et al.* Extraction and recovery of vanadium from vanadium-bearing converter steel slag[J]. *Iron and Steel*, 2005, 40(4): 72–75.  
(杨素波, 罗泽中, 文永才, 等. 含钒转炉钢渣中钒的提取与回收[J]. *钢铁*, 2005, 40(4): 72–75.)
- [14] Preblinger H. Vanadium in converter slags[J]. *Steel Research*, 2002, 73(12): 522–525.
- [15] Zhu Guilin, Sun Shushan, Zhao Qun, *et al.* Current situation and development trend of metallurgical slag resource utilization[J]. *Comprehensive Utilization of Resources in China*, 2002, 3(6): 29–32.  
(朱桂林, 孙树杉, 赵群, 等. 冶金渣资源化利用的现状与发展趋势[J]. *中国资源综合利用*, 2002, 3(6): 29–32.)
- [16] Gu Longjian. Progress and present situation of vanadium extraction by fire method in China[J]. *Vanadium Titanium*, 1992, 13(6): 29–36.  
(古隆建. 我国火法提钒技术的进展及现状[J]. *钒钛*, 1992, 13(6): 29–36.)
- [17] Tian Maoming, Tang Dajun, Zhang Qi. Vanadium extraction from vanadium bearing steel slag and its main technology[J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 11(2): 59–60.  
(田茂明, 唐大均, 张奇. 含钒钢渣提钒工艺及其主要技术[J]. *重庆科技学院学报(自然科学版)*, 2009, 11(2): 59–60.)
- [18] Liu Biao, Du Hao, Li Lanjie, *et al.* A method of extracting vanadium from vanadium containing steel slag by pressure strengthening: China, CN107236866B[P]. 2020-04-03.  
(刘彪, 杜浩, 李兰杰, 等. 一种含钒钢渣加压强化提钒的方法: 中国, CN107236866B[P]. 2020-04-03.)
- [19] Ding Shurong. Application of METSIM in hydrometallurgical design[J]. *Colored Equipment*, 2020, 34(4): 57–61.  
(丁淑荣. 全流程工艺计算模拟软件METSIM在湿法冶金设计中的应用实践[J]. *有色设备*, 2020, 34(4): 57–61.)
- [20] Xiao Peng, Wang Hongjun, Ye Fengchun, *et al.* Simulation and calculation of co-smelting process of selenium and tellurium based on METSIM[J]. *Nonferrous Metals (Smelting Part)*, 2020, (11): 55–59.  
(肖鹏, 王红军, 叶逢春, 等. 基于METSIM的硒碲协同熔炼工艺流程模拟计算[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2020, (11): 55–59.)
- [21] Wang Dehua. Application of METSIM software in vanadium extraction from vanadium slag[J]. *Energy Saving of Nonferrous Metallurgy*, 2016, 32(6): 19–22.  
(汪德华. METSIM软件在钒渣提钒中的应用[J]. *有色冶金节能*, 2016, 32(6): 19–22.)
- [22] Lv Yeqing, Zheng Shili, Wang Shaona, *et al.* Application of METSIM in clean production process design of vanadium slag from molten salt process[J]. *Journal of Process Engineering*, 2013, 13(2): 270–274.  
(吕页清, 郑诗礼, 王少娜, 等. METSIM在亚熔盐法钒渣清洁生产工艺流程设计中的应用[J]. *过程工程学报*, 2013, 13(2): 270–274.)
- [23] Cai Wang, Yuan Aiwu. Application of METSIM software in the process design of acid production from smelting flue gas[J]. *Sulfuric Acid Industry*, 2021, (4): 10–12.  
(蔡旺, 袁爱武. METSIM软件在冶炼烟气制酸工艺设计中的应用[J]. *硫酸工业*, 2021, (4): 10–12.)
- [24] Zhang Xiaodong, Zhao Feiyan, Wang Yongwang, *et al.* Application of METSIM in roasting magnesite from magnesite[J]. *Coal and Chemical Industry*, 2020, 43(6): 129–133.  
(张小东, 赵飞燕, 王永旺, 等. METSIM在菱镁矿焙烧氧化镁中的应用[J]. *煤炭与化工*, 2020, 43(6): 129–133.)
- [25] Cui Mu. Application of METSIM to the treatment of copper sludge and waste organic solvent by submerged combustion smelting technology[J]. *China's Comprehensive Utilization of Resources*, 2020, 38(1): 57–59.  
(崔沐. METSIM在浸没燃烧熔池熔炼技术处理含铜污泥及废有机溶剂上的应用[J]. *中国资源综合利用*, 2020, 38(1): 57–59.)