

从攀枝花钒钛磁铁矿中回收钪研究进展

王录锋, 闫月娥

(攀枝花学院钒钛学院, 钒钛资源综合利用四川省重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

摘要: 综述了攀枝花钒钛磁铁矿中钪以类质同象置换 Mg-Fe 的方式存在, 储量丰富, 潜在回收价值可观。以尾矿、废渣和废液为主要回收对象, 总结了提取钪工艺以焙烧-浸出-萃取法和浸出-萃取法为主。提出以钛白废酸浸出选钛尾矿和氯化渣及烟尘全面回收钪的新途径; 为攀枝花“三废”治理提供新的思路。

关键词: 钪; 浸出; 钒钛磁铁矿; 钛尾矿

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.04.005

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2022) 04-0021-06

钪在新材料开发应用日益突出, 主要在太阳能电池材料、超导材料、宇航发射材料和铝合金等方面。钪的提取研究水平一直处于低迷状态, 究其因, 钪属于稀散金属, 含量低, 分散广, 几乎没独立矿物^[1-2], 突破此瓶颈, 开辟新的钪回收途径。

我国钪的资源异常丰富, 已探明的铝土矿、贵州织金新华、开阳和瓮福磷矿、华南钨矿及稀土矿、内蒙古白云鄂博稀土矿和四川攀枝花钒钛磁铁矿矿床等均含有钪。研究表明, 攀枝花、太和和白马三大矿区的矿石中, 均含有稀散金属-钪; 攀枝花矿区为例钪平均含量为 27~32 g/t^[2], 以密地桥选厂处理 1350 万 t/a 钒钛磁铁矿, 可达

到钪产量 432 t, 攀西地区钒钛磁铁矿初步统计储量 100 亿 t, 如此丰富钪资源, 亟待开发利用。本文对攀枝花钒钛磁铁矿中的钪回收工艺现状总结, 并提出了回收主产品钒铁钛同时, 以废治废回收钪同时高效利用钒钛磁铁矿资源。

1 钪的资源状况

攀西地区钒钛磁铁矿储量丰富, 现已确定攀枝花钒钛磁铁矿中存在钪在 20~60 g/t, 钪的储量 $1.88 \times 10^5 \sim 5.65 \times 10^5$ t^[3]。已查明的钒钛磁铁矿含有 57 种矿物中主要含有钪的矿物为普通辉石、钛铁矿、钛铁矿、角闪石、斜长石和绿泥石^[4], 统计结果见表 1。

表 1 含钪矿物
Table 1 Scandium among the various types of minerals

名称	含量/%	钪含量/(g·t ⁻¹)	钪分布率/%	主要成分
普通辉石	30.58	128	60.0	SiO ₂ Fe ₂ O ₃ MgO
钛铁矿	15.68	101	15.09	Fe ₂ O ₃ TiO ₂
钛磁铁矿	18.30	24.2	6.30	Fe ₂ O ₃ TiO ₂
角闪石	6.50	38.2	6.70	SiO ₂ CaO
斜长石	5.10	2.0	0.15	SiO ₂ Al ₂ O ₃
绿泥石及其他	20.00	15.0	11.80	SiO ₂ CaO Fe ₂ O ₃ Al ₂ O ₃

黄霞光等^[5] 研究结果表明攀枝花钒钛磁铁矿中无钪的独立矿物存在, 钪以 Mg-Fe 以类质同象

置换的方式而赋存于辉石、钛铁矿和角闪石中, 以 Mg-Fe-Sc 形式分散于硅酸盐和钛铁矿中,

收稿日期: 2020-05-11; 改回日期: 2020-06-12

基金项目: 攀枝花市平台建设资助项目 (20180816); 2017 级校级资助项目 (035000861); 钒钛资源综合利用四川省重点实验室 [2021]01 号 (2021FTSZ14)

作者简介: 王录锋 (1983-), 男, 硕士, 讲师, 主要长期从事钒钛磁铁矿中稀贵金属提取工作。

例如在钛普通辉石中， Sc^{3+} 以异价类质同象方式置换 Fe^{2+} 与 Mg^{2+} ，电价平衡依靠 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 替代 Si^{4+} 实现，置换式为 $Sc^{3+}+Al^{3+} \rightarrow (Fe^{2+}, Mg^{2+})+Si^{4+}$ ；钛铁矿中钪的类质同象置换式为 $Sc^{3+}+(Fe^{3+}+Al^{3+}) \rightarrow (Fe^{2+}, Mg^{2+})+Ti^{4+}$ 。因钪的地球化学特征三价钪与三价铁和二价镁的离子半径相近，故三价钪代替三价铁和二价镁，钪元素较明显的亲氧性和亲钛性，常以氧化物和硅酸盐形态存在，如在高炉渣和氯化烟尘中富集丰富的钪。

2 钪的选冶走向

钪在钒钛磁铁矿中具有含量低、形态分散广和置换方式等的特征，但是随着主成分铁钒钛的回收，钪呈现方向性的逐层富集趋势，这为回收钪提供了条件。现以攀钢集团回收铁钒钛流程分

析钪的走向^[6]，见图 1。根据钪的赋存状态及单向逐层富集，结合图 1 钪在选冶过程中，绝大部分富集在固废和废液中^[7]，见表 2。

炼铁过程中钪被还原挥发气态进入烟尘，在冷却过程被氧化，水洗后进入瓦斯泥；在氯化法制钛白粉，钪被高温氯化变成三氯化钪并富集到氯化烟尘中，含量高、易回收和成本低是回收钪的重要来源，但产量低，经济效益不高。硫酸法制钛白粉过程中，含钪矿物被硫酸分解为 Sc^{3+} 离子存于溶液中。从表 1 可知，唯独尾矿中的钪赋存在矿物中，而其他都是钪的氧化物、氯化物和离子型，辉石和角闪石都属于硅酸盐类矿物，结构稳定，难分解，钪提取难度较大。相对于尾矿其他储量较少，矿物成分也较单一，故回收钪的主要来源是尾矿。

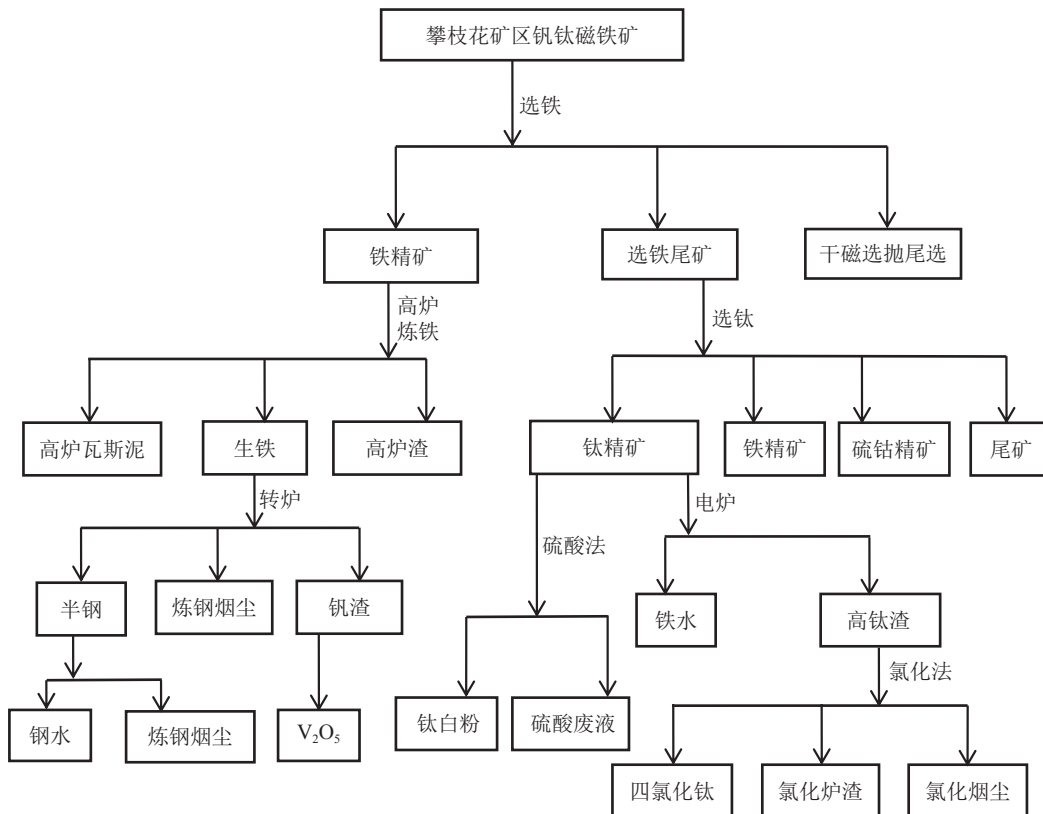


图 1 攀钢集团铁钒钛回收流程

Fig.1 Recovery process of iron, vanadium and titanium at Panzhihua steel & iron group corporation

表 2 钪在三废中含量

Table 2 scandium content in three wastes

名称	高炉渣	高炉瓦斯泥	氯化渣	钒渣	氯化烟尘	硫酸废液	尾矿
含量/(g·t ⁻¹)	34	12.8	65.8	3.3	384	80.8	128.3
存在形态	Sc ₂ O ₃	Sc ₂ O ₃	Sc ₂ O ₃	Sc ₂ O ₃	ScCl ₃	Sc ³⁺	辉石、钛铁矿和角闪石

3 钪的潜在价值

目前，攀钢尾矿储量近1亿t，并且每年以600万t速度递增。硫酸废液每年300万t速度增加，但是企业都对废酸液进行了初步加工回收。攀枝花钒钛磁铁矿中存在大量的有价元素^[8]，若能回收钪、钒、钽、铌等多种有色金属和稀有金属，则能带来可观的经济效益。并以2020年99.99%的金属钪价格为例，稀有金属潜在价值见表3。

表3 金属潜在价值
Table 3 potential value of metals

名称	钪	钒	钽	钪	铌	合计
价值(亿元)	4.83	3.19	1.18	18.4	0.44	28.04

从表3可知，稀有金属不回收，攀枝花损失28.04亿，其中钪的损失占66%，而钪主要赋存在尾矿和回收钪和钒的渣中，钪的价值对未来攀枝花发展具有重要意义。

4 从铁、钒和钛回收产生的废渣和废液中回收钪

根据攀钢炼铁炼钢、提钒和制钛过程，高炉渣、高炉瓦斯泥、钒渣、氯化渣和硫酸废液中均可以提取钪。目前研究较多的是从氯化烟尘和硫酸废液中提取钪，而从高炉渣、高炉瓦斯泥和钒渣提取钪报道较少，其固相成分复杂且含量低，建议高炉瓦斯泥中提取钪同时回收钪。

4.1 氯化炉渣和氯化烟尘中提取钪

钛铁矿精矿电炉熔炼高钛渣时，因钪的氧化物生成热高，不稳定，易被还原，存在于高钛渣中。在氯化法制备TiCl₄时，高温下大部分的钪以ScCl₃形式被富集在氯化烟尘中，还有少部分Sc₂O₃和ScCl₃存留在炉渣中，氯化烟尘中钪含量高、成分单一和易溶解，成为提取的主要来源。

对于从氯化渣和氯化烟尘中提取钪研究可分为三个阶段：

第一阶段，柯家骏等^[9]研究人员为代表，上世纪八十年代因国际市场对钪的需要，国内对钪提取研究出现遍地开花，攀枝花氯化烟尘提钪即从该阶段开始。氯化烟尘具有成分相对单一、易溶于水放热、温度低和杂质含量低等优点，成为钪提取重要来源，发展了提钪的相应的工艺流程，主要包含水浸出，溶剂萃取，柯家骏研究由攀枝

花钛精矿的氯化烟尘中提取氧化钪的扩大试验，想尽快实现钪的工业化生产。许绍权^[10]研究钪的萃取体系从氯化高钛渣烟尘中提取钪，草酸沉淀和灼烧基本工艺过程，得到氧化钪产品纯度99%以上，钪回收率约60%。这时期氯化烟尘提钪基本处于探索阶段，研究重点是钪萃取剂，以TBP+仲辛醇+煤油组成萃取体系。

第二阶段，孙本良、杨智发和何锦林等为代表，以东北大学的孙本良^[11]为主，探索研究从氯化烟尘提钪条件实验基础上，提出钪沉淀与铁、钪元素分离再萃取钪的工艺，萃取率99.7%以上。杨智发^[12]使用新型P₅₀₇₉-N₂₃₅-煤油萃取体系应用从氯化烟尘中提取钪，重点研究了萃取参数，结果Sc³⁺与Fe³⁺、Ti⁴⁺、Al³⁺、Mn²⁺、Ca²⁺等在萃取过程实现分离。何锦林^[13]以P₂₀₄-TBP为萃取剂对氯化烟尘酸浸出液进行两步萃取，离子交换和草酸沉淀处理萃取液，经煅烧得到纯度为99.5%的Sc₂O₃，钪的回收率达56%。这时期呈现出在萃取过程先分离杂质元素再提取钪的特点。

第三阶段，攀枝花学院的李亮^[14]和刘松利^[15]分别从氯化渣和氯化烟尘提钪条件实验，研究重点钪的浸出条件参数，分别以酸种类、粒度、温度、时间、浓度和液固比为浸出条件进行了探索。对于选用酸浸出剂，李亮以氯化渣为原料认为硫酸的浸出效果较好，其次为盐酸。而刘松利以氯化烟尘为原料则刚好是相反结论。因氯化烟尘相比氯化炉渣成分和组成结构简单许多。浸出率都可达到90%以上，说明氯化烟尘和氯化渣都是钪回收的重要来源，氯化烟尘和氯化渣回收钪的基本工艺流程，见图2。

氯化烟尘和氯化渣中回收钪，对浸出参数优化、萃取体系药剂制度和制取精矿过程研究较详，每个阶段呈现出不同的特点。钪浸出率达到90%以上，产品Sc₂O₃纯度达到99%以上。不足之处是氯化烟尘和氯化渣中钪的浸出机理几乎没有人研究，成本和污染还是主要瓶颈问题，产量少，难以产业化。

4.2 钛白废酸中回收钪

钛白粉废酸相比从氯化烟尘中提取钪研究相对工艺要成熟，而且已产业化，长沙的东方铝业已经工业化从现有钛白粉厂废液中回收氧化钪。液相与固相相对提取钪来技术难度低、成本低和污染轻的特点。

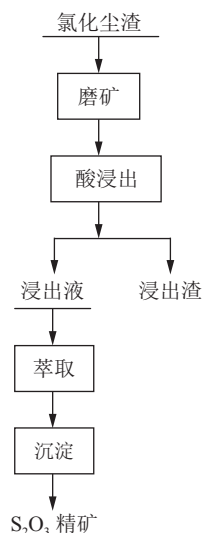


图2 氯化尘渣提钪工艺流程

Fig.2 process flow chart of extracting scandium from chloride dust

硫酸法是生产钛白粉的经典方法，每生产 1 t 钛白粉可产 6~7 t 浓度约 22% 的废酸，钪含量约为 17 mg/L，以攀枝花地区为例每年产生上百万吨钛白废酸，具有良好的回收价值。

钛白废酸是制造钛白粉工艺中产生的一种主要含有硫酸和亚硫酸的混合体的废液，其中含 4%~5% 的铁、大约 0.5% 的钛及其他金属离子，含金属离子多而复杂，钪含量较低。提钪方法主要有溶剂萃取法、离子交换法、萃取法和离子交换法相结合法、少量报道乳状液膜提钪方法。萃取法具有产物稳定，选择性高，萃取率高等优势是后续主要提取钪的方法。

萃取法提取钪发展过程呈现工艺特点是，早期直接提钪，后萃取率提高慢因杂质离子干扰，先除杂再提钪，随萃取剂研发进步，选择性高和专一性强钪萃取剂，直接提钪。其特点是钪萃取体系研发进步较快，其次是工艺条件参数优化改进，萃取设备的发展较缓慢。

钪萃取剂研究经过单一到组合萃取剂过程，何永富等^[16]采用单一 P_{204} -煤油溶液为萃取剂主直接从硫酸体系中萃取钪，获得 Sc_2O_3 纯度大于 99.9%。聂利等^[17]采用萃取剂 P_{5707} 和 P_{5709} 组合，两段萃取，一段是 P_{5707} -癸醇-煤油体系，分离钛和其他杂质，二段采用 P_{5707} -TBP-煤油体系使钪和钛分离，产品纯度在 99.0%~99.9% 之间。冯彦琳^[18]等采用 P_{507} - N_{7301} -煤油混合萃取剂从钛白废液中提钪，使用 H_2O_2 在酸性条件下抑制钛的萃取钪，萃

取率可达 95.0% 以上。李勇明等^[19]对二(2-乙基己基)磷酸(P_{204})-磷酸三丁酯(TBP)-煤油体系中确定 TBP 较佳含量，TBP 能有效分离钛和钪，能除去 95% 以上的钛等杂质。逐步形成以二元萃取剂协同萃取，稀释剂为煤油的萃取体系。

以 P_{204} -TBP-煤油萃取体系，萃取流程方面提取钪研究报道较多。刘卫等^[20]等在硫酸加双氧水除钛法以洗涤段为 6 级，负载有机相除钛率为 99.67%，确定较佳除钛参数。李玉华^[21]，以串级逆流萃取流程，提出 EL 洗脱机除去负载有机相中的钛，EL 三级逆流洗脱，钛洗脱率为 98%，钪损失率为 4%。卢阶主^[22]等提硫酸钛白废液一次萃取钪-水解除钛-二次萃取富集钪工艺。碱饼水解除钛，较传统连续十几级洗除钛和铁缩短流程，且降低成本，二次萃取钪干扰较少，萃取率高达 99.87%。

钪的萃取设备开发及研究报道较少，Hongbin Qiu^[23]，先预富集-净化-萃取工艺，萃取采用振荡器组装有分液漏斗完成，取得 Sc_2O_3 纯度为 99.9%，回收率达 98%。

通过上述对从钛白废酸中回收钪研究，特别是 P_{204} -TBP 二元萃取体系研究取得较好成绩，但是也存在问题，萃取剂在液-液萃取过程中长期稳定性差，而离子交换剂相对稳定且流动性差，故进一步研究具有稳定和流动性强的钛白废酸高效绿色组合萃取剂；萃取设备有待加强研究和开发。

5 尾矿中回收钪

攀枝花尾矿中存在大量的有价元素，若能从尾矿中回收钛、钪、钒、钴等多种有色金属和稀有金属，带来较可观的经济效益^[24]。

林维聪^[25]，从广西钒钛磁铁矿尾矿中采用强磁选富集钪-盐酸浸出-萃取工艺提取钪， Sc_2O_3 纯度为 99.80%，毛建军^[26]采用钠盐焙烧-盐酸分解-萃取法工艺研究从攀枝花钒尾矿回收钪，钠盐焙烧-盐酸分解钪的分解率 89.8%， P_{204} -煤油溶液萃取钪萃取率 95%。张总华等^[27]通过对选钛尾矿强磁选和加剂处理电选工艺，得到含钪 121 g/t 和 114 g/t 的钪精矿，再用含有溶剂的盐酸作浸出剂浸出，TBP 作为萃取剂萃取钪，经 NaOH 反萃， CaC_2O_4 精制，得 99.9% 的 Sc_2O_3 产品。刘猛^[28]初步选矿获得钪精矿，采用 PX 药剂，焙烧-盐酸浸出，优

化焙烧参数和浸出参数，钪的浸出率达91%~93%，浸出渣中三氧化钪的品位为0.0005%。

6 结 论

(1) 攀枝花钒钛磁铁矿中钪赋存状态复杂，现有回收铁钒钛工艺条件下，钪在尾矿、废液、废渣中的含量高，总量大，具有较高潜在回收价值。从钛白废酸中回收钪技术较为成熟，已产业化，尾矿中回收钪处在实验室研究阶段。因产量少的氯化渣和烟尘回收钪技术研究不深入。

(2) 单方面提钪，局限性较大，钪的总回收率偏低。建议以尾矿为主原料，回收铁钒钛同时，采用焙烧-酸浸出-萃取工艺，以废渣和废液为浸出剂，废液+废固化学反应为原理，对钒钛磁铁矿产生的“三废”进行深加工，充分利用钒钛磁铁矿中可用资源。

(3) 针对现行工艺二次污染大、成本太高、回收率低、工艺单一且复杂。开发低成本高容量、选择性高，相容性强和可再生的萃取剂，综合回收钪等稀有金属新工艺势在必行。

参考文献：

[1] 赵芝, 王登红, 张国华, 等. 钪-稀土家族中的稀土家族中的贵族[J]. 国土资源科普与文化, 2019(3):15-17.
ZHAO Z, WANG D H, ZHANG G H, et al. The nobles in the rare earth family in the scandium-sparse family[J]. Popular Science and Culture of Land and Resources, 2019(3):15-17.

[2] 王勋, 韩跃新, 李艳军, 等. 钒钛磁铁矿综合利用研究现状[J]. 金属矿山, 2019(6):33-37.
WANG X, HAN Y X, LI Y J, et al. Research status of comprehensive utilization of vanadium titanomagnetite[J]. Metal Mines, 2019(6):33-37.

[3] 谭其尤, 陈波, 张裕书, 等. 攀西地区钒钛磁铁矿资源特点与综合回收利用现状[J]. 矿产综合利用, 2011(6):6-10.
TAN Q Y, CHEN B, ZHANG Y S, et al. The characteristics of vanadium titanomagnetite resources and the status quo of comprehensive recovery and utilization in Panxi area[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2011(6):6-10.

[4] 陈露露. 我国钒钛磁铁矿资源利用现状[J]. 中国资源综合利用, 2015, 33(10):31-33.
CHEN L L. Current situation of vanadium titanomagnetite resource utilization in my country[J]. China Comprehensive Utilization of Resources, 2015, 33(10):31-33.

[5] 黄霞光, 罗国清, 李亚平. 攀西钒钛磁铁矿中钪的赋存状态研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2016(6):1-4.
HUANG X G, LUO G Q, LI Y P. Study on the Occurrence State of Scandium in Panxi Vanadium-Titanium Magnetite[J]. Nonferrous Metals (Processing Section), 2016(6):1-4.

[6] 柯家骏. 攀枝花矿中钪在选冶流程中的走向和冶炼提取的研究[J]. 钢铁钒钛, 1982(4):1-10.
KE J J. Research on the trend and smelting extraction of scandium in the beneficiation and smelting process in Panzhihua Mine[J]. Iron, Steel, Vanadium and Titanium, 1982(4):1-10.

[7] 吕宪俊, 程希翱, 周国华. 攀枝花铁矿钪的分布特征及其综合回收研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 1991(4):460-466.
LV X J, CHENG X A, ZHOU G H. Study on the distribution characteristics of scandium in Panzhihua iron ore and its comprehensive recovery[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology(Natural Science Edition), 1991(4):460-466.

[8] 徐本平. 攀枝花钒钛磁铁矿冶炼过程中主要稀土元素分布走向研究[J]. 材料与冶金学报, 2018, 17(2):94-100.
XU B P. Research on the distribution trend of main scattered elements in the smelting process of Panzhihua vanadium titanomagnetite[J]. Chinese Journal of Materials and Metallurgy, 2018, 17(2):94-100.

[9] 柯家骏, 陆正亚, 涂桃枝, 等. 从钛氯化烟尘中提取氧化钪的研究[J]. 稀有金属, 1983(2):1-6.
KE J J, LU Z Y, TU T Z, et al. Study on extraction of scandium oxide from titanium chloride fume[J]. Rare Metals, 1983(2):1-6.

[10] 许绍权. 关于钪提取工艺的研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 1984(2):24-30.
XU S Q. Research on scandium extraction technology[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 1984(2):24-30.

[11] 孙本良, 田彦文, 翟玉春, 等. 从含钪氯化烟尘中提取钪[J]. 东北大学学报(自然科学), 1997, 18(6):606-609.
SUN B L, TIAN Y W, ZHAI Y C, et al. Extraction of scandium from chlorinated smoke containing scandium[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 1997, 18(6):606-609.

[12] 杨智发, 孙世清, 李道纯. 溶剂萃取法从氯化烟尘中提取钪[J]. 稀有金属, 1989(3):217-222.
YANG Z F, SUN S Q, LI D C. Extraction of scandium from

- chlorinated fume by solvent extraction[J]. *Rare Metals*, 1989(3):217-222.
- [13] 何锦林, 谭红, 蔡汝义, 等. 冶炼钛氯化烟尘提取钪的工艺研究[J]. *稀土*, 1989(6):59-61.
- HE J L, TAN H, CAI R Y, et al. Study on the technology of extracting scandium from smelting titanium chloride fume[J]. *Rare Earth*, 1989(6):59-61.
- [14] 李亮. 从氯化渣中浸出钪的研究[J]. *钢铁钒钛*, 2011, 32(2):15-19.
- LI L. Study on leaching scandium from chloride slag[J]. *Iron and Steel Vanadium Titanium*, 2011, 32(2):15-19.
- [15] Liu Songli. Experimental study of leaching scandium from chloride dust[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 548:305-308.
- [16] 何永富, 卢保琦, 洪同治, 等. 从钛白水解母液中回收氧化钪试验[J]. *矿产综合利用*, 1983(3):1-6.
- HE Y F, LU B Q, HONG T Z, et al. Experiment of recovering scandium oxide from titanium dioxide hydrolysis mother liquor[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 1983(3):1-6.
- [17] 聂利, 李道纯, 李伟宣. 从钛白厂废酸中萃取回收钪的研究[J]. *矿冶工程*, 1991(2):53-56+60.
- NIE L, LI D C, LI W X. Study on extraction and recovery of scandium from waste acid in titanium dioxide plant[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 1991(2):53-56+60.
- [18] 冯彦琳, 王靖芳, 王海林. 用萃取法从硫酸法钛白废酸中提取钪[J]. *稀土*, 1997(2):48-49+62.
- FENG Y L, WANG J F, WANG H L. Extraction of scandium from titanium dioxide waste acid in sulfuric acid process by extraction method[J]. *Rare Earth*, 1997(2):48-49+62.
- [19] 李勇明, 陈建军. 对钛白水解母液中提钪工艺流程的改进研究[J]. *稀有金属与硬质合金*, 1997(1):1-4.
- LI Y M, CHEN J J. Research on the improvement of the process flow of extracting scandium from titanium dioxide hydrolysis mother liquor[J]. *Rare Metals and Cemented Carbide*, 1997(1):1-4.
- [20] 刘卫, 杨决, 崔小震. 钛白废酸提钪工艺中钪分离的研究[J]. *稀土*, 2014, 35(6):79-83.
- LIU W, YANG Y, CUI X Z. Study on the separation of zirconium and scandium in the process of extracting scandium from waste titanium dioxide[J]. *Rare Earth*, 2014, 35(6):79-83.
- [21] 李玉华, 李青刚, 张贵清, 等. 钛白水解废酸中钪的回收[J]. *化工学报*, 2017, 68(7):2818-2825.
- LI Y H, LI Q G, ZHANG G Q, et al. Recovery of scandium from titanium dioxide hydrolysis waste acid[J]. *Chinese Journal of Chemical Industry*, 2017, 68(7):2818-2825.
- [22] 卢阶主, 张亮玖. 硫酸法钛白废液萃取富集钪[J]. *山西冶金*, 2019, 42(2):10-12.
- LU J Z, ZHANG L J. Extraction and enrichment of scandium from titanium dioxide waste liquid by sulfuric acid method[J]. *Shanxi Metallurgy*, 2019, 42(2):10-12.
- [23] Hongbin Qiu, Mengliang Wang, Yingming Xie, et al. From trace to pure: Recovery of scandium from the waste acid of titanium pigment production by solvent extraction[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 121:118-124.
- [24] 黄雯孝, 卢可可. 攀西钒钛磁铁矿尾矿中钪的提取工艺研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(2):135-139.
- HUANG W X, LU K K. Study on scandium extraction technology for Panxi vanadium titanium magnetite tailings[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(2):135-139.
- [25] 林维聪, 温涛, 刘起明, 等. 从广西某钒钛磁铁矿选钛尾矿中回收钪的试验研究[J]. *矿产综合利用*, 1986(2):16-19+44.
- LI W C, WEN T, LIU Q M, et al. Experimental study on recovery of scandium from titanium tailings of a vanadium-titanium magnetite in Guangxi[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 1986(2):16-19+44.
- [26] 毛建军, 范剑琴, 余宗华. 攀枝花选钛尾矿提钪工艺的研究[J]. *矿冶工程*, 1996, 16(4):48-52.
- MAO J J, FAN J Q, SHE Z H. Study on the technology of extracting scandium from titanium tailings in Panzhihua[J]. *Mining and Metallurgy Engineering*, 1996, 16(4):48-52.
- [27] 张总华, 张桂芳. 选钛尾矿分选钪实验研究[J]. *中国矿业*, 2003(11):36-38.
- ZHANG Z H, ZHANG G F. Experimental study on the separation of scandium from titanium tailings[J]. *China Mining Industry*, 2003(11):36-38.
- [28] 刘猛. 攀西钒钛磁铁矿中钪浸出实验研究[J]. *山东化工*, 2017, 46(11):47-48.
- LIU M. Experimental study on scandium leaching from Panxi vanadium titanomagnetite[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2017, 46(11):47-48.