

赤泥中钪和钛的回收研究进展*

雷清源, 周康根*, 何德文, 张雪凯

(中南大学 冶金与环境学院, 湖南 长沙 410000)

摘要: 赤泥中富含铝、铁、钛等多种有价金属, 以及钪、钇、铈、镧等稀土元素, 是一种极具回收价值的二次资源。目前, 国内外钛被广泛应用于各个领域, 钪由于稀缺导致价格昂贵。赤泥作为碱性固体废弃物, 具有较高的钪钛含量, 可以加以回收利用, 缓解资源匮乏的同时又能改善环境。本文综述了目前国内外赤泥中钪和钛的回收研究现状, 并指出了各工艺存在的问题, 同时对赤泥中钪和钛的选择性回收提出了展望。

关键词: 赤泥; 钪; 钛; 回收; 二次资源

中图分类号: X758 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2019)03-0015-06

DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2019.03.003

Research Progress on the Recovery of Scandium and Titanium from Red Mud

LEI Qingyuan, ZHOU Kanggen*, HE Dewen, ZHANG Xuekai

(School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410000, China)

Abstract: As a secondary resource with high recycling value, red mud is rich in various valuable metals such as aluminum, iron and titanium, as well as many rare earth elements like scandium, yttrium, cerium and lanthanum. At present, the titanium is widely used in various fields at home and abroad, as well as the scandium is expensive due to its scarcity. As an alkaline solid waste, red mud is an important raw material containing scandium and titanium, which should be used to alleviate the lack of resources and improve the environment. In this paper, the current research status of the recovery of scandium and titanium in red mud at home and abroad was reviewed, and the problems of each process were pointed out. Meanwhile, the prospect of selective recovery of scandium and titanium in red mud was proposed.

Key words: red mud; scandium; titanium; recovery; secondary resources

1 前言

铝土矿渣又称赤泥, 是氧化铝生产过程中的一种典型副产物, 铝厂每生产 1 t 的氧化铝将产生 1 ~ 2 t 的赤泥。由于受到当地经济、环境和政策的限制, 大部分的赤泥主要通过堆存处理。在堆存过程中, 由于赤泥的高碱性, 不仅占用了大量的土地资源, 还污染了周围的土壤、水和空气, 造成了更为严重的环境污染^[1, 2]。随着环保意识的日益增加和固

废处理技术的不断进步, 禁止赤泥随意堆存的呼声也越来越高。寻求新型赤泥处理方法也越来越受到重视, 要求从处理方式、安全性等方面, 解决赤泥带来的环境安全问题。近年来, 资源的匮乏成为限制我国有色金属工业发展的因素之一, 矿产资源的有利用也逐渐成为研究热点。赤泥中富含大量的有价金属, 露天堆放的赤泥若加以利用, 在缓解资源匮乏的同时, 也能解决赤泥堆放带来的环境问题^[3-8]。

在元素周期表里, 有一系列性质非常接近的金

* 收稿日期: 2019-04-11

通信作者: 周康根(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事赤泥资源综合利用研究, E-mail: zhoukg63@163.com。

属元素被称为稀土元素,而钪(Sc)是稀土元素里面第七个被发现的。钪是一种非常活泼的金属元素,与其他元素化合时主要呈现出正三价,在空气中易被氧化生成氧化钪(Sc_2O_3)而失去金属光泽,目前钪在冶金、化工、电子等行业被广泛应用。赤泥也被认为是稀土元素生产的二次资源,尤其是钪。赤泥中钪的含量根据铝土矿的性质和加工工艺的不同,含量在0.004%~0.01%之间^[9-12]。钪作为稀土元素的一种,一般情况下若矿石中的钪含量能在0.002%~0.005%之间,则可以视作重要的钪资源。铝土矿中钪的含量一般超过0.004%,而赤泥经提铝后钪含量可富集至0.01%以上。

钛(Ti)作为一种分散的稀有金属,最有用的两个特性是:抗腐蚀性和金属中最高的强度-重量比。钛和钛的合金大量用于航空工业,有“空间金属”之称;除此之外,钛被广泛应用于化学工业、造船工业、制造机械部件、硬质合金等高科技领域。由于钛优异的物化性质,被很多发达国家如美国、法国等视为战略金属。由于氧化铝生产工艺和产地的不同,其中铝土矿渣中有价金属的含量也有不少差异,但是几乎每一个产地的赤泥中都含有高含量的二氧化钛(TiO_2),赤泥中二氧化钛含量一般在4%~12%之间,通常以锐钛矿、钙钛矿等形式存在^[13-18]。因此,从经济及环境保护方面来看,赤泥中提取钪和钛具有重要意义^[19,20]。

2 从赤泥中回收钪的研究现状

铝土矿中 Sc_2O_3 含量为20~150 $\mu\text{g/g}$,铝土矿经过生产氧化铝后,基本上98%的钪在赤泥中富集,所以赤泥是很好的提钪原料^[21,24]。通过研究分析证实,赤泥中的Sc不是离子吸附型,也不存在于新形成的铝硅酸盐矿物相中,主要以类质同象形式分散于铝土矿及其副矿物如金红石、钦铁矿、锐钦石、错英石、独居石等中^[10,25]。目前赤泥中提钪的工艺主要分为湿法冶金和火法-湿法冶金^[10,26]。

2.1 湿法冶金

湿法冶金的主要原理一般采用高浓度的酸(硫酸、盐酸或硝酸其中一种)浸出赤泥,赤泥中金属离子如铁、钠、铝、钪和钛等主要以金属氧化物的形式存在,与酸反应生成可溶性的金属阳离子进入溶液中,然后将酸浸液中钪进行溶剂萃取或离子交换回收。

罗宇智等^[24]研究赤泥分别在盐酸和硫酸体系

下浸出钪,其中在盐酸体系下钪的浸出率最高达94.66%;在硫酸体系下钪的浸出率略低,最高达到84.52%。但是缺点在于盐酸浸出钪的过程中,盐酸易于挥发导致酸耗较大;在硫酸体系下产生的浸出液存放时间短。后续采用赤泥硫酸熟化浸出正交试验确定了最优条件为:98%的硫酸加入量34 mL,熟化温度260 $^{\circ}\text{C}$,熟化时间60 min,浸出液固比4。在最优条件下钪浸出率可以达到91%以上,同时在浸出过程中钙和硅的浸出率较低,可以避免浸出液凝胶化,使得浸出液更长时间的保存。

Zhou等^[1]提出了一种从赤泥中选择性浸出钪和铁的新方法,选择EDTA作为络合剂,在浸出工程中重新分配钪和铁离子的种类,大大提高了钪对铁的选择性。最佳工艺参数为浸出剂($\text{HCl} + \text{H}_2\text{O}$):赤泥:EDTA为40 mL:10 g:2 g、盐酸用量为理论值的40%、温度为70 $^{\circ}\text{C}$ 、反应时间为4.0 h。在最佳条件下,钪和铁的浸出效率分别为79.6%和6.12%,Sc/Fe的浸出率比达到13.0,为不添加EDTA时Sc/Fe浸出率比的1倍。该方法不仅降低了酸的消耗,而且大大提高了Sc/Fe浸出率比,使后续的铁和钪分离更加容易。此外,这项工作为从固体废物中回收和分离有价金属提供另一种方法。

目前溶剂萃取法是钪分离与提纯过程中的一种重要方法,常用的萃取剂有P204、P507等,这一类萃取剂为酸性磷类萃取剂。Wang等^[22]研究在硫酸体系下从澳大利亚赤泥中提取钪,之后用溶剂萃取法从赤泥浸出液中回收钪。分别比较了三种酸性有机萃取剂的萃取效果,其中P204的萃取效果最好。在 $\text{pH} = 0.25$ 和40 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下,以0.05 mol/L P204和0.05 mol/L TBP组成的有机体系,在相比 $\text{O/A} = 1:5$ 条件下,钪的萃取率能达到99%以上,几乎不同时萃取铁和铝。最后在反萃过程中,向有机相加入5 mol/L氢氧化钠,有机相中的钪被分离,得到 $\text{Sc}(\text{OH})_3$ 产物。

徐璐等^[27]也采用了P204作为萃取剂,研究了盐酸浓度、浸出时间和液固比对拜耳法赤泥中钪萃取率的影响,在最优条件下,钪的萃取率可达到97.99%。溶剂萃取法回收赤泥中钪,具有萃取能力高、选择性高、分离效率高和富集能力强等优点,可从赤泥浸出液中大规模回收钪等微量稀有金属。同时萃取之后的反萃液可以循环使用,萃取性能基本上没有损失。缺点是萃取剂虽然对钪有较好的选择性,但是一部分钛、铁等杂质元素会被共萃,同时萃取剂成本偏高。

Onghena等^[23]采用硫化、焙烧和浸出相结合的

方法,先从赤泥中选择性地浸出钪。浸出方法采用多级浸出,最终浸出液中钪的浓度较单级浸出提高了三倍。然后用三氟甲基磺酰亚胺萃取,萃取时相比 O/A 为 1:5,从所得的硫酸盐滤液中纯化钪,提高了体系中钪的浓度。最后采用沉淀法从富钪溶液中回收并纯化。除钠等沉淀的主元素外,钪的纯度能达到 98%,具体工艺流程如图 1。

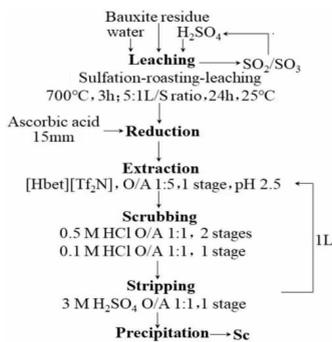


图 1 溶剂萃取回收钪的工艺流程图

Fig. 1 Process flowchart of scandium recovery by solvent extraction

湿法冶金将赤泥直接进行高浓度酸浸,使得酸耗大、处理环境差,此外酸浸液成分复杂,后续钪与其他金属离子的分离也会成为一大难题。优点就是钪的浸出率高、损失较少和处理流程简单。

2.2 火法-湿法冶金

火法-湿法冶金的主要原理将赤泥先焙烧还原除铁、炉渣提氧化铝后,赤泥中含量较高的金属元素如铁、铝等被分离回收,使得钪在渣中得到进一步富集,再用酸浸法将残渣中的钪转移到溶液中,最后将酸浸液中钪进行溶剂萃取或离子交换回收。

Shinde 等^[28]将赤泥、焦碳粉和石灰石放入电弧炉中进行还原熔炼,熔炼后的产物为生铁和含硅的残渣。残渣经过回收铁、铝等金属元素后,95%以上的钪进入浸出渣中,浸出渣中含钪量为赤泥的 2.65 倍,再用酸浸-萃取工艺从浸出渣中回收钪。该方法在回收钪的同时回收了氧化铝,所用原料比较常见且价格合理,缺点就是钪的回收率不高且能耗大,在工艺过程中产生的二氧化碳会对环境造成一定污染。

Borra 等^[29]研究了赤泥与碳酸钠在 950 °C 条件下焙烧 4 h,焙烧之后的残渣在 80 °C 下水浸 60 min,可去除 75% 的氧化铝,98% 以上的铁可以通过冶炼除去(回收)。矿渣在 90 °C 的酸液中浸出,钪的浸出率可达 80% 以上。该工艺用氢氧化钠替代碳酸钠,可降低焙烧温度,可回收大部分金属和稀土。具

体工艺流程如图 2。

Palant 等^[30]将赤泥与浓硫酸混合后,将其混合物充分搅拌后在 200 °C 下焙烧 1 h,得到的残渣用硫酸氨浸出。钪进入液相中,采用 P204 + 煤油组成的有机体系对浸出液进行萃取,可以得到富钪的有机相。稀盐酸反萃取钪,当钪富集一定浓度后用草酸与钪反应生成草酸钪沉淀,钪的综合回收率可达 90% 以上。该方法的工艺流程相对简单、钪的回收率高、工艺所需的试剂廉价易得等,不足之处就是能耗高、赤泥的综合利用率不高。

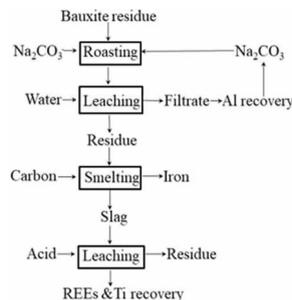


图 2 联合法回收钪的工艺流程图

Fig. 2 Process flowchart of scandium recovery by combined method

火法冶金的优点在于先将赤泥进行预处理,回收了高含量的金属元素如铁、铝等,使得钪在残渣中得到进一步富集,便于后续钪与其他金属的分离;缺点在于处理流程长、能耗高和设备投资大,此外不可避免损失一部分的钪,造成钪的综合回收率不高,产生大量废气造成二次污染等缺点。

综上所述,无论是湿法冶金还是火法-湿法冶金,两者的共同点都采用酸浸法将钪转移至溶液中,最后溶剂萃取或离子交换回收钪。湿法和火法-湿法回收钪目的都是出于提钪之前除去大量杂质离子,逐步将钪富集。酸浸法富集钪都是必不可少的一步,由于赤泥中金属种类多,钪与其他元素如铁、铝等相比属于微量,一些金属离子不可避免会被共沉淀下来。溶剂萃取法是目前应用最广泛的钪提取分离方法之一,该方法具有选择性高、处理量大、操作简便等优点,但是在有机相反萃过程中,也会造成酸耗大、处理流程长等缺点,不符合绿色环保的理念。

3 从赤泥中回收钛的研究现状

赤泥中钛的赋存状况比较复杂,并不是以单一的矿物形式存在,而是多种矿物共存。由于赤泥是铝土矿在强碱性介质及高温条件下排出的尾渣,其

中的钛多以钙钛矿和板钛矿的形式存在,结构稳定^[13]。目前将赤泥中的钛进行回收有两种方法,分别为火法冶金和湿法冶金。火法回收钛的原理一般是将赤泥烧结除去铁、铝、硅等,使钛于渣中富集,再将渣中的钛浸出。除火法外,还可采用湿法回收钛,则主要以酸性浸出工艺为主^[26]。

Kasliwal 等^[31]提出了一种富集赤泥中二氧化钛的新方法。通过分析赤泥中各组分的浸出动力学,表明随着酸与赤泥比的增大、浸出温度的升高以及焙烧温度的升高,赤泥中二氧化钛的分级富集量增大。为了提高二氧化钛的富集度,对浸出渣进行碳酸钠焙烧以去除铝,并且得到了最佳焙烧条件:温度 1 150 °C,反应时间 115 min。在最优焙烧条件下的最大富集量为 0.76 左右,而不焙烧条件下的最大富集量为 0.36。

Agatzini - Leonardou 等^[32]研究主要集中在从拜耳法氧化铝生产过程产生的赤泥中回收钛。浸出工艺是在常压条件下,不经任何预处理,用稀硫酸从赤泥中提取钛。采用统计设计和实验分析的方法,确定了酸正态性、温度、固液比等因素对浸出过程的主要影响及相互作用。在酸浓度为 6 mol/L、温度为 60 °C、固液比为 5% 的最佳条件下,钛的回收率达到 64.5%,铁的浸出率达到 46%,而铝的浸出率不超过 37%。

Piga 等^[33]将赤泥、煤、石灰和碳酸钠混合磨碎、焙烧,得到的焙烧产品在 65 °C 下水浸 1 h,之后进行磁选分离、硫酸浸出,钛的回收率可达 73% ~ 79%,具体工艺如图 3 所示。

王琪等^[34]研究了用硫酸浸出赤泥中铁、铝和钛。通过探讨多因素条件实验对赤泥中金属浸出率的影响,如反应时间、液固比、硫酸浓度、反应温度、赤泥的颗粒粒径等因素,从而确定铁、铝和钛的最佳条件。结果表明,颗粒粒径为 0.15 ~ 0.18 mm 的赤泥,在 600

°C 温度下焙烧 5 h 后,硫酸的浓度为 12 mol/L,反应温度控制在 60 °C,液固比控制在 5 的酸浸条件下反应 1 h,铁、铝和钛的浸出率分别为 46.7%、63.3% 和 54.3%。

廖春发等^[35]研究了在硫酸体系下赤泥中钛浸出的工艺条件,并且对浸出反应的动力学进行了研究。动力学分析表明,硫酸浸出是一级反应,浸出反应控制步骤为固膜扩散控制。浸出试验中,通过探讨硫酸浓度、浸出温度、浸出时间、搅拌速度对钛浸出率的影响,得出在赤泥平均粒度约为 74 μm、硫酸浓度 6 mol/L、时间 3 h、搅拌速度 100 r/min、温度 80 ~ 95 °C 的最佳浸出条件下,钛的浸出率可达 80% 以上。

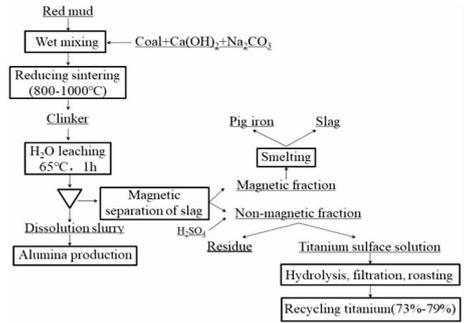


图 3 回收钛的工艺流程图

Fig. 3 Process flowchart of titanium recovery

目前从赤泥中提取钛的研究多为酸浸法,虽然该方法可以使得钛的浸出率较高,但是缺点也很明显,即酸的消耗量大和其他金属离子大量溶解浸出,这也就造成了后续处理流程长。因此该如何实现赤泥中钛和其他金属的有效分离,是一个值得研究和深入探讨的问题^[13,36]。

综上所述,回收赤泥中钪和钛这 2 种有价值金属的方法主要以湿法冶金和火法 - 湿法冶金为主,表 1 总结了钪和钛的部分冶金工艺以及该工艺的技术不足。赤泥中钪与钛的含量相比属于微量,在回收

表 1 从赤泥中回收钪和钛的工艺总结

Table 1 The process summary of scandium and titanium recovery from red mud

Valuable element	Method	Recovery rate	Lack of technology	Reference
Sc	Hydrometallurgy	99%	Other elements are extracted at the same time, such as titanium	[15]
		98%	Complex process and high cost of solvent	[16]
	Combined method	>80%	Recovery rate is low	[33]
		>90%	High energy consumption and low comprehensive utilization	[34]
Ti	Acid leaching	-	High energy consumption and waste gas pollution	[25]
		64.5%	The metal ion selectivity is poor by acid leaching	[26]
		73%	Long process and low recovery	[31]
		54.3%	Recovery rate is low	[27]
		>80%	High acid concentration and harsh treatment environment	[28]

钪的同时钛不可避免的会被提取,因此钪和钛选择性地分离回收将成为今后研究重点。

4 结语

从近几年的研究成果来看,从赤泥中回收钪和钛等有价金属是可行的。但是纵观近几年国内外的研究成果,从赤泥中提取钪的同时,不少杂质元素如钛不可避免地会被提取出来。这也就造成了钪的纯度达不到标准,影响了钪的价值。赤泥金属元素中钛的含量高,仅次于铁、铝、钙和钠。从目前国内外提钛工艺来看,钛的回收率不高,造成了大部分的钛损失,并且杂质元素偏多很难实现产业化。

目前,赤泥综合利用的处理方法中,生产建筑材料和土壤修复剂已在工业生产中得到应用。由于生产成本、设备要求等因素,有价金属的回收只停留在实验室研究阶段,未能广泛应用于工业生产,应尽量减少成本满足经济可行性。目前,无论是湿法冶金或火法—湿法冶金,钪和钛都能实现高效浸出,制约工业化的关键是钪和钛的纯度达不到要求。因此,酸浸液中钪和钛的高效分离与提纯将会是未来研究重点,采用合适的分离方法得到钪和钛产品,在提高钛回收率的同时实现钪和钛的选择性回收,“变废为宝”,这将对赤泥中有价金属的综合利用具有重大意义。

参考文献:

- [1] Zhou K G, Teng C Y, Zhang X K, et al. Enhanced selective leaching of scandium from red mud[J]. Hydrometallurgy, 2018, 182: 57–63.
- [2] Li G H, Ye Q, Deng B N, et al. Extraction of scandium from scandium-rich material derived from bauxite ore residues[J]. Hydrometallurgy, 2018, 176: 62–68.
- [3] 练佳佳,唐庆杰,吴文荣,等.赤泥在环境修复领域的应用综述[J].硅酸盐通报,2015(11):3236–3242.
- [4] Zhang X K, Zhou K G, Chen W, et al. Recovery of iron and rare earth elements from red mud through an acid leaching—stepwise extraction approach[J]. Journal of central south university, 2019, 26(2): 458–466.
- [5] 滕春英,周康根,宁凌峰,等.盐酸分级浸出赤泥中有价金属元素[J].环境工程学报,2018,12(1):310–315.
- [6] 林亮.赤泥建设材料衍生产品的安全性分析[J].中国安全生产科学技术,2014,10(1): 165–169.
- [7] 杨艳娟,李建伟,张茂亮,等.改性赤泥免烧砖的制备与放射性屏蔽机理分析[J].矿产保护与利用,2019,39(1):95–99.
- [8] 刘中凯,刘万超,王洋洋,等.赤泥土壤修复扩大实验及微生物修复技术[C]//2018中国环境科学学会科学技术年会论文集(第三卷).合肥,2018.
- [9] 刘奋照,王中慧,薛玫,等.赤泥利用及提炼钪综述[J].广东化工,2015,42(5):56–58.
- [10] 司秀芬,邓佐国,徐廷华.赤泥提钪综述[J].江西有色金属,2003,17(2):28–31.
- [11] 徐璐,罗宇智,史光大.从赤泥硫酸熟化浸出液中预富集钪[J].有色金属(冶炼部分),2018(11):39–41.
- [12] 杨绪平,邵志超,张晨.赤泥的资源化综合利用[J].现代冶金,2018,46(1):42–44.
- [13] 杨涛,王志坚,肖劲,等.赤泥和钛白废液中提钪的浸出工艺研究[J].矿冶,2015,24(5):37–40.
- [14] Bonomi C, Alexandri A, Vind J, et al. Scandium and titanium recovery from bauxite residue by direct leaching with a bronsted acidic ionic liquid[J]. Metals, 2018, 8(10): 834.
- [15] Wang W W, Pranolo Y, Cheng C Y. Recovery of scandium from synthetic red mud leach solutions by solvent extraction with D2EHPA[J]. Separation and purification technology, 2013, 108: 96–102.
- [16] Onghena B, Borra C R, Van G T, et al. Recovery of scandium from sulfation-roasted leachates of bauxite residue by solvent extraction with the ionic liquid betainium bis(trifluoromethylsulfonyl) imide[J]. Separation and purification technology, 2017, 176: 208–219.
- [17] 罗宇智,徐璐,史光大.硫酸熟化浸出赤泥中钪的研究[J].有色金属(冶炼部分),2017(4):45–47.
- [18] Nghiem V N, Lizuka A, Shibata E, et al. Study of adsorption behavior of a new synthesized resin containing glycol amic acid group for separation of scandium from aqueous solutions[J]. Hydrometallurgy, 2016, 165: 51–56.
- [19] 赵恒,李望,朱晓波,等.赤泥提钪研究现状与展望[J].河南化工,2018,35(6):3–12.
- [20] 刘卫,尹志芳,李国高,等.钛白废酸提钪工艺中除钪的研究[J].稀土,2016,37(6):86–89.
- [21] 韩东战,尹中林.赤泥提钪的研究现状[J].矿产综合利用,2017(3):33–37.
- [22] 朱晓波,李望,管学茂.赤泥循环酸浸提钪实验及动力学研究[J].稀有金属与硬质合金,2015(3):9–12.
- [23] 李冬,潘利祥,赵良庆,等.赤泥综合利用的研究进展[J].环境工程,2014(S1):616–618.
- [24] 李亮星,黄茜琳.从赤泥中提取钪的试验研究[J].湿法冶金,2011,30(4):323–325.
- [25] Kasliwal P, Sai P S T. Enrichment of titanium dioxide in

- red mud: a kinetic study[J]. *Hydrometallurgy*, 1999, 53(1): 73-87.
- [26] Agatzini - Leonardou S, Oustadakis P, Tsakiridis P E, et al. Titanium leaching from red mud by diluted sulfuric acid at atmospheric pressure [J]. *Journal of hazardous materials*, 2008, 157(2-3): 579-586.
- [27] 王琪, 姜林. 硫酸浸出赤泥中铁、铝、钛的工艺研究[J]. *矿冶工程*, 2011, 31(4): 90-94.
- [28] 廖春发, 姜平国, 焦芸芬, 等. 赤泥中钛硫酸浸出的工艺条件及动力学研究[J]. *矿业研究与开发*, 2008(2): 45-47.
- [29] 徐璐, 史光大, 李元坤, 等. 盐酸浸出拜耳法赤泥预富集钪的研究[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2015(1): 54-56.
- [30] Zhou G, Li Q, Sun P, et al. Removal of impurities from scandium chloride solution using 732 - type resin [J]. *Journal of rare earths*, 2017, 36(3): 311-316.
- [31] Piga L, Pochetti F, Stoppa L. Recovering metals from red mud generated during alumina production [J]. *Journal of the minerals, metals and materials society*, 1993, 45(11): 54-59.
- [32] 王璐, 郝彦忠, 郝增发. 赤泥中有价金属提取与综合利用进展[J]. *中国有色金属学报*, 2018, 28(8): 213-226.
- [33] Borra C R, Blanpain B, Pontikes Y, et al. Recovery of rare earths and major metals from bauxite residue (red mud) by alkali roasting, smelting, and leaching [J]. *Journal of sustainable metallurgy*, 2017, 3(2): 393-404.
- [34] Palant A, Petrova V A. Scandium extraction from hydrochloric acid solutions poly(2-ethylhexyl) phosphonitrilic acid [J]. *Russian journal of inorganic chemistry*, 1997, 42(6): 943-946.
- [35] Shinde V M, Bhilare N G. Extraction and separation of Sc salicylate with triphenylphosphine oxide [J]. *Fresenius journal of analytical chemistry*, 1997, 357(4): 402-407.
- [36] 肖金凯. 工业废渣赤泥中钪的分布特征[J]. *地质地球化学*, 1996(2): 82-86.

引用格式:雷清源, 周康根, 何德文, 等. 赤泥中钪和钛的回收研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(3): 15-20.

LEI Qingyuan, ZHOU Kanggen, HE Deyun, et al. Research progress on the recovery of scandium and titanium from red mud [J]. *Conservation and utilization of mineral resources*, 2019, 39(3): 15-20.