

Extraction and Recovery of Valuable Elements in the Red Mud

Chengyun Zhou, Yanjun Zhao*, Jianmin Zeng

College of Material Science and Engineering, Guangxi University, Nanning Guangxi
Email: zcyun92@163.com, *zhaoyanjuan71@gmail.com

Received: May 20th, 2016; accepted: Jun. 17th, 2016; published: Jun. 20th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Red mud is a strong basicity solid waste residue of the digestion of bauxite ores with caustic soda for alumina production. This paper gives an overview of the basic characteristics of red mud and also puts great emphasis on the recycling technologies both at home and abroad, which mainly deal with those valuable metals come from red mud, such as Fe, Al, Ti and RE elements. And last, this paper points out there is a high trend towards the comprehensive utilization of red mud, hence, it is a booming prospective concerning the productive process of preparing iron nickel alloy by the smelting of red mud and lateritic nickel ore.

Keywords

Red Mud, Valuable Metals, Recovery, Extraction

赤泥中有价元素的提取和回收

周成云, 赵艳君*, 曾建民

广西大学, 材料科学与工程学院, 广西 南宁
Email: zcyun92@163.com, *zhaoyanjuan71@gmail.com

收稿日期: 2016年5月20日; 录用日期: 2016年6月17日; 发布日期: 2016年6月20日

* 通讯作者。

摘要

赤泥是氧化铝生产过程中的强碱性固体粉末状废弃物，本文简要概述了赤泥的基本特性，着重阐述了国内外从赤泥中回收有价金属元素铁、铝、钛和其他稀土元素的工艺，并对其进行了评析。最后对赤泥的综合利用进行了展望，而赤泥与红土镍矿制备铁镍合金的方法前景广阔。

关键词

赤泥，有价金属，回收，提取

1. 引言

随着氧化铝工业的高速发展，我国已成为全球第二大氧化铝生产国和第一大原铝生产国。赤泥是铝土矿生产 Al_2O_3 过程中产生的粉泥状强碱性固体废弃物，由于其富含 Fe_2O_3 (20%~50%) 呈红褐色，故称之为赤泥[1]。赤泥主要成分为 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Na_2O 、 TiO_2 、 K_2O 和 CaO ，并含有少量的钪，钇，铈，铀等元素和微量稀土元素[2]。赤泥的产出量因矿石品位、生产方法和技术水平而异。而每生产一吨氧化铝，大约产生赤泥 0.8~1.5 吨。据估计，全世界氧化铝工业每年产生的赤泥超过 6×10^7 t，2007 年我国赤泥年排放量达到 4000 万 t，累积赤泥堆量已达几亿吨[3]。随着全球对铝产品需求的日益增加，按照目前的增长速度，估计到 2015 年全球赤泥的产量将超过 40 亿吨[4]。赤泥的二次利用与处理成为了当今社会的关注热点。由于目前的技术限制，绝大部分赤泥是通过堆放处理的。赤泥的堆放不仅占用大量土地，耗费较多的堆场建设和维护费用，而且存在于赤泥中的碱会向地下渗透，造成地下水体和土壤污染。裸露的赤泥形成的粉尘随风飞扬，污染大气，对人类和动植物的生存造成负面影响，严重的恶化生态环境[5]。2010 年 10 月 4 日，匈牙利 Ajkai 氧化铝厂发生赤泥堆场决堤，100 万立方米的赤泥外泄，将附近 7 个村庄瞬间“染红”，造成 9 人死亡，3 人失踪，150 多人受伤。7 日，赤泥开始流入多瑙河，顺水蔓延引发欧洲多国恐慌[6]。因此为了实现赤泥的资源化、减量化和综合化的利用，国内外的学者进行了大量研究，主要包括三个方面：① 提取赤泥中的有用成分，回收高价金属，如 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 和 SiO_2 回收等；② 将赤泥作为一般矿物原料，整体利用，如用来做水泥、砖和微晶玻璃等；③ 赤泥在环保领域中的应用，如吸附和除去废水中的重金属离子等。本文在概述赤泥基本特性的基础上，综述了赤泥中有价金属元素铁、钛、铝和稀土元素的综合回收利用现状以及存在的问题。

2. 赤泥的基本特性

赤泥的基本特性包括赤泥的化学成分、矿物组成和物化性质。

1) 赤泥的化学成分

赤泥的化学组成取决于铝土矿的成分、氧化铝的生产方法及生产过程中所加入的添加剂等。表 1 表明了不同赤泥的化学成分，国外赤泥大部分为拜耳法赤泥，国内拜耳法赤泥主要在广西平果，其它大部分地区为烧结法或联合法赤泥。从表中可知赤泥中均含有一定量 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、和 TiO_2 等有价金属，拜耳法产生的赤泥中 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 含量比烧结法或联合法赤泥高；而烧结法或联合法产生的赤泥中 SiO_2 、 CaO 含量比拜耳法赤泥高。

2) 赤泥的矿物组成

赤泥的矿物组成同样因氧化铝生产方法的不同而异。然而，很多专家在这方面做了大量的研究。景

Table 1. The basic chemical composition of red mud, % [7]
表 1. 赤泥的基本化学成分, % [7]

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	SiO ₂
烧结法赤泥	16.11	7.38	8.30	33.20	0.43	2.00	2.92	0.84
拜耳法赤泥	17.87	32.66	20.30	3.18	—	2.07	8.06	0.080
联合法赤泥	20.50	6.10~7.50	5.40~7.50	44.00~47.00	—	6.00~7.00	2.80~3.00	0.50~0.73

注：所列为代表成分，实际因铝土矿品位、生产工艺而不同。

英仁[8]等利用扫描电镜、差热分析、X 射线衍射和红外吸收光谱等方法对赤泥的矿物成分进行了测定分析。结果表明，赤泥的主要矿物为：文石和方解石，含量为 60%~65%；其次是蛋白石、三水铝石、针铁矿；还有少量的钛矿物、菱铁矿、天然碱、水玻璃、铝酸钠和火碱。

3) 赤泥的物理、化学性质

赤泥是一种胶结的多孔结构，具有较大的内表面积，有较强的吸附性。粒径 $d = 0.005\sim 0.075$ mm 的粒组，含量在 90% 左右；比表面积 $64.09\text{ m}^2/\text{g}\sim 186.9\text{ m}^2/\text{g}$ ，孔隙比 2.53~2.95。赤泥的含水量 86.01%~89.97%，饱和度 94.4%~99.1%，持水量 79.03%~93.23%；塑性指数 17.0~30.0；相对密度 2.7~2.9，容重 0.8~1.0；熔点 $1200^\circ\text{C}\sim 1250^\circ\text{C}$ [8]。

3. 赤泥中有价金属元素的提取和回收

氧化铝制备的主要方法有拜耳法、烧结法和联合法，由此得到不同种类的赤泥，不同类别的赤泥利用率也各不相同。印度、西班牙、牙买加、加拿大和土耳其等国的赤泥多为拜耳法赤泥，而我国赤泥除广西平果为拜耳法赤泥外，山西、河南以混联法赤泥为主，山东和贵州以烧结法赤泥为主[9]-[12]。赤泥的资源化研究与开发一直是氧化铝行业的热点与难点，下面阐述赤泥中有价元素铁、铝、钛和钪的提取与利用现状。

3.1. 赤泥中铁的回收

拜耳法赤泥是高铁赤泥，而 Fe 在赤泥中主要以 Fe₂O₃ 赋存，少量以 FeO 存在。随着铁矿产资源的枯竭，高铁赤泥的利用成为了铁矿产的重要来源，但对赤泥进行脱碱工序是进行综合回收利用的必要条件。张成林[13]等表明，赤泥的脱碱方法有水洗脱碱法、石灰脱碱法、盐类脱碱法、悬浮碳化脱钠和石灰-硫酸联合脱碱法等。但这些方法各有所缺，如水洗法脱碱效果差，时间长，水耗量大等。朱晓波[14]在总结脱碱工艺所存在问题的基础上，提出了宝贵的建议，即在水洗脱碱工艺之前，先进行中温焙烧作业，预先破坏含有结构碱物质的晶体结构，使结构碱得以活化，然后再采用水浸作业予以脱除。此外，张延安[15]等提出了“钙化-碳化法”处理拜耳法赤泥的新方法，回收赤泥中的氧化铝和碱，使赤泥可以直接利用；工艺和设备简单，在铝工业的可持续发展领域实现重大突破。冯延磊[16]等发明的赤泥脱碱综合处理装置利用脱碱赤泥生产水泥，烧成温度低，能够降低热耗，而且节约资源，可实现资源的充分利用。古明远[17]等公开了一种综合利用赤泥的系统，该系统可以实现赤泥的高效脱碱，并且可以将赤泥转化为高附加值的水渣渣，从而从根本上解决赤泥这种工业废弃物利用率低和长期堆存的难题。脱碱技术不断的革新给赤泥中有价金属的提取奠定了坚实的基础。国外在拜耳法赤泥综合利用方面研究较早，Xiang [18]等研究了从赤泥中低温还原-磁选分离铁工艺，采用煤、碳、锯木屑、干蔗渣作固相还原介质，还原温度可降低到 350°C ，还原后的赤泥经磁选回收铁。前苏联、日本、美国、德国等均做了大量的研究，其原理主要是加入还原剂，将赤泥中的弱磁性的赤铁矿和针铁矿还原烧成磁铁矿[19]，匈牙利·托拉斯工程和

发展中心[20]和土耳其的 E.Ercagt [21]等进行过电弧熔炼赤泥和炉渣湿法冶炼试验研究,其工艺过程包括赤泥焙烧预处理、电弧炉熔炼得炼钢生铁和炉渣,此熔炼出的生铁可用于合金钢的制造。国内通常先采用还原焙烧使 Fe_2O_3 转变为 Fe_3O_4 ,然后磁选出 Fe_3O_4 ;或将赤泥直接用电炉熔炼出生 Fe 或先将赤泥还原成海绵 Fe,后用电炉熔炼出钢[22]。朱德庆[23]等研究了高铁赤泥添加碳酸钠直接还原磁选的方法回收铁,磁选精矿达到 90.87%,铁回收率达到 95.76%。管建红[24]采用脉动高梯度磁选机对平果铝厂的赤泥中铁进行了回收实验,取得了较好的效果。杨文[25]提出了碳热还原-碱石灰烧结联合回收铁和氧化同时回收铁和氧化铝,铁和氧化铝的回收率都大于 80%,而且磁选的铁精矿品位大于 50%,可以用于高炉炼铁。并且为进一步回收钛、稀贵金属创造有利的条件。广西大学曾建民[26]等研发了一种利用赤泥和红土镍矿制备铁镍合金的方法,所述方法包括如下步骤:步骤一、配料选取赤泥、红土镍矿和焦粉,配加膨润土、聚乙烯醇、纸浆废液、糖蜜废液的一种或几种为球团原料,赤泥和红土镍矿提供铁和镍,其中赤泥和红土镍矿的质量配比为:赤泥:红土镍矿 = 10~100:100~60;以按上述比例混合配比好的赤泥和红土镍矿混合物作为新的配比基准,按如下重量份数添加焦粉及其它添加剂组分:焦粉: 3~20,膨润土: 0~5,聚乙烯醇: 0~5,纸浆废液: 0~3,糖蜜废液: 0~3;步骤二、混料,制团,干燥将按上述配料比例备好的原材料均匀混合,然后将混合料制备成团块,所制团块大小以适于矿热炉还原熔炼为宜,之后将团块干燥;步骤三、矿热炉还原熔炼将干燥后的团块送入矿热炉内还原熔炼,团块经预热、分解、部分还原后在电弧下及附近的高温区进行造渣、熔化,完成还原、渣铁分离等过程,最终聚集在炉膛形成铁镍合金液层和炉渣层,铁镍合金和炉渣定期从铁口、渣口分别放出。这种方法给赤泥制高附加值产品提供了宝贵的经验。此外,还可采用酸浸出-提取工艺对铁等有价金属元素进行提取回收[27]-[29]。

3.2. 赤泥中铝的回收

赤泥中 Al_2O_3 的含量也是较高的,以拜耳法赤泥为首。目前,提取 Al 使用普遍的方法是碱-石灰烧结法。周秋生[30]等利用氧化铝热力学数据库,对高铁赤泥炉料烧成过程中的相关化学反应进行热力学计算,得出了高铁赤泥炉料的最佳配料是:熟料中 $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 质量分数为 10%~12%,钙铁摩尔比 1.0~1.2;烧成工艺条件是:温度为 $1000^\circ\text{C}\sim 1050^\circ\text{C}$,烧成时间为 30~40 min。在最佳配料和烧成工艺条件下,当熟料中氧化铝含量为 15%左右时,熟料中 Al_2O_3 回收率可达 85%~90%。李军旗[31]等利用添加石灰和纯碱烧结法针对高钙高铝拜耳法赤泥进行了研究,考察了钙比、碱比、烧结温度和烧结时间对氧化铝溶出率的影响,得出烧结法处理赤泥提取铝的最佳工艺:钙比为 2.40,碱比为 1.96,烧结温度为 1030°C ,烧结时间为 40 min,在最佳条件下氧化铝溶出率可达 83.12%。郑秀芳[32]研究了低温拜耳法赤泥掺杂硅渣对氧化铝回收率的影响,研究表明,掺杂的低温拜耳法赤泥在适当条件烧结后,氧化铝的溶出率更高。Zhong Li [33]等进行了采用湿法冶金工艺从赤泥中提取氧化铝用以铝酸钠水合物生产的研究,赤泥中 Al_2O_3 和 Na_2O 的提取率分别为 87.8%和 96.4%。

3.3. 赤泥中钛的回收

赤泥中 Ti 以 TiO_2 状态赋存,矿物组成上表现为锐钛矿和金红石,而钛的提取普遍采用的是酸浸出法。张江娟[34]提出了赤泥两段酸浸工艺,得出了一段 HCl 浸出和二段 H_2SO_4 酸解的方法,并对酸解液进行水解得到了合格的钛白,其纯度在 95%以上,钛的总回收率为 91%。赤泥中回收钛的工艺流程为:首先用较低浓度的 HCl 选择性浸取赤泥,而钛不溶于低浓度 HCl 富集于残渣中,再用高浓度 H_2SO_4 酸解残渣,然后对酸解液进行水解得偏钛酸,煅烧偏钛酸制得二氧化钛。李亮星[35]考察了酸解温度、酸解时间、浸出时间和水浸液固体积质量比对钛浸出率的影响,得到最佳浸出条件为:酸渣质量比 1.4:1,酸解温度 300°C ,酸解时间 2.0 h,浸出时间 1.0~1.5 h,水浸液固体积质量比 10:1 最佳条件,钛浸出率达 97%,

浸出液中钪的质量浓度为 29.9 g/L。此外, Luige Piga [27]等报道了用盐酸处理制取冰晶石并回收铝、铁和钪工艺。Cengloglu Y. [29]等研究赤泥经盐酸溶解后用离子交换膜回收和富集铝、钪和铁等。

3.4. 赤泥中稀土金属元素的回收

赤泥中含有丰富的稀土元素, 而我国稀土金属的矿产资源分散, 因此从赤泥中提取稀土金属, 对保护环境, 特别是提高矿产资源的综合利用率有着重要的意义。近些年, 国内外应用成熟的是酸浸-提出工艺提取赤泥中的稀土金属印度学者 Ghosh I [36]等提出采用硫酸浸出工艺从赤泥中回收 La 和 Ce。Ochsenkuhn-Petropoulou [37]等研究了用稀硝酸浸出赤泥, 采用离子交换法从浸出液中分离钪、镧系元素, 确定了酸浸过程中固液比、硝酸的浓度和浸出酸度控制等参数, 而且进行溶剂萃取富集提纯钪和稀土的半工业化试验取得了成功。尹中林[38]对平果拜耳法赤泥进行了试验, 大致工艺流程为: 先用盐酸浸出赤泥, 然后用 P204 + 仲辛醇 + 煤油从酸浸液中萃取钪, 盐酸反萃取除杂后, 用 NaOH 溶液反萃取, 得氢氧化物沉淀; 再用盐酸溶解, TBP + 仲辛醇 + 煤油萃取钪, 经水反萃后, 加酒石酸 + 氨水进行沉淀, 将沉淀物灼烧得 Sc_2O_3 产品, 其产品纯度可达 95.25%。姜平国[39]等提出先中温焙烧再进一步提取回收稀土金属的工艺, 沉淀中的稀土和钪的总含量比赤泥中的含量提高了 1 万倍, 浓缩富集特别有效。胡璇[40]等研发的电感耦合等离子体原子发射光谱法测定赤泥浸出液中稀土元素会给赤泥中稀土元素提取新工艺研发带来重要的辅助作用。

4. 总结

赤泥的综合回收利用能否实现产业化的关键是技术能否达到所需的环境效益和经济效益。目前, 赤泥中有价元素提取和回收的技术工艺实现工业化的困难在于以下几方面: ① 有价元素提取技术工艺不能单工艺提取和回收多种有价元素, 工艺周期长, 经济效益低; ② 不同品位的铝土矿产生不同种类的赤泥, 赤泥种类的多样性对回收利用技术也不一样, 对选矿技术的要求自然较高。如烧结法赤泥 CaO 含量高的特性一般适用于作为矿物原料整体利用如水泥等方面的利用, 而平果拜耳法赤泥高铁高铝的特点适用于有价金属的提取回收利用, 因而制取赤泥高附加值产品的同时能否进行低附加值产品的制取以提高经济效益这是问题所在。③ 生产工艺的复杂性导致生产成本低, 如提取铁的焙烧-磁选工艺等, 此外, 酸浸提取工艺的废酸循环使用及酸浸液的杂质离子增多给后序工艺增难等问题都是亟待解决的。氧化铝行业是金属冶炼行业的第二大产业, 与国民生活息息相关。而大量赤泥的二次资源化利用也是氧化铝行业的攻关难题。针对拜耳法赤泥, 有价元素的提取和回收主要是有价金属铁、铝和钪, 稀土元素钪等。铁的提取工艺研究首先在前苏联、美国等国家开启, 较成熟的工艺主要有焙烧还原-磁选工艺、直接还原焙烧工艺、酸浸出提取工艺等。而稀土元素如钪提取和回收的较成熟工艺是酸浸出法, 分为硝酸浸出法、硫酸浸出法和盐酸浸出法, 如先稀硝酸浸出赤泥, 再采用离子交换法从浸出液中分离钪。赤泥中有价元素的提取利用由于经济与技术上的冲突还没有实现工业化生产, 但赤泥与红土镍矿制备铁镍合金方法的研究成功给赤泥制高附加值产品提供了宝贵经验, 离赤泥的零排放更近了一步。

基金项目

广西科学研究与技术开发计划项目(桂科重 14122001-3); “广西生态型铝产业协同创新中心”资助项目。

参考文献 (References)

- [1] 张国立, 李绍纯, 张馨元, 等. 拜耳法赤泥水洗脱碱工艺的研究[J]. 青岛理工大学学报, 2012(4): 59-62.

- [2] Kalkan, E. (2006) Utilization of Red Mud as a Stabilization Material for the Preparation of Clay Liners. *Engineering Geology*, **87**, 220-229. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.07.002>
- [3] 南相莉, 张延安, 刘燕, 等. 我国赤泥综合利用分析[J]. 过程工程学报, 2010(1): 264-270.
- [4] Liu, Y. and Naidu, R. (2014) Hidden Values in Bauxite Residue (Red Mud): Recovery of Metals. *Waste Management*, **34**, 2662-2673. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.003>
- [5] 李小平. 平果铝赤泥堆场的边坡环境问题与治理对策研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2007(2): 29-31.
- [6] 杨征. “赤”色警报——匈牙利赤泥事件给中国敲响警钟[J]. 中国有色金属, 2010(22): 30-31.
- [7] 王健月, 倪文. 我国赤泥综合利用现状及发展前景[C]. 第五届尾矿与冶金渣综合利用技术研讨会, 2014.
- [8] 景英仁, 景英勤, 杨奇. 赤泥的基本性质及其工程特性[J]. 轻金属, 2001(4): 20-23.
- [9] 董学芝, 李德亮, 李东, 等. 中铝河南分公司赤泥中金属成分分析[C]. 中国环境科学学会学术年会论文集(第四卷), 2010.
- [10] 南相莉, 张延安, 刘燕, 等. 我国主要赤泥种类及其对环境的影响[J]. 过程工程学报, 2009(1): 459-464.
- [11] Justiz-Smith, N., Buchanan, V.E., et al. (2006) The Potential Application of Red Mud in the Production of Castings. *Materials Science and Engineering: A*, **420**, 250-253. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2006.01.038>
- [12] 于永波, 王克勤, 王皓, 等. 山西铝厂赤泥性质的研究. 太原理工大学学报, 2009(1): 63-66.
- [13] 张成林, 王家伟, 刘华龙, 等. 赤泥脱碱技术研究现状与进展[J]. 矿产综合利用, 2014(2): 11-14.
- [14] 朱晓波, 李望, 管学茂, 等. 拜耳法赤泥脱碱研究现状[J]. 硅酸盐通报, 2014(9): 2254-2257.
- [15] 东北大学. 东北大学特殊冶金团队喜获保尔森基金“2015年可持续发展规划项目”荣誉奖[EB/OL]. <http://neunews.neu.edu.cn/campus/news/2015-11-03/39459.html>, 2015-11-3.
- [16] 冯延磊, 丁丽, 张作才, 等. 一种赤泥脱碱综合处理装置[P/OL]. CN204454889U. 2015-07-08.
- [17] 古明远, 王敏, 任中山, 等. 综合利用赤泥的系统[P/OL]. CN204874678U. 2015-12-16.
- [18] Xiang, Q., Liang, X., Schleringer, M.E., et al. (2001) Low-Temperature Reduction of Ferric Iron in Red Mud. *Light Metals: Proceedings of Sessions, TMS Annual Meeting*, Warrendale, Pennsylvania, The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), January 2001.
- [19] Piga, L., Pochetti, F. and Stoppa, L. (1995) Application of Thermal Analysis Techniques to a Sample of Red Mud—A By-Product of the Bayer Process—For Magnetic Separation. *Thermochimica Acta*, **254**, 337-345. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-6031\(94\)01988-S](http://dx.doi.org/10.1016/0040-6031(94)01988-S)
- [20] 徐进修, 罗修连. 赤泥的综合利用和有价值金属的回收工艺综述(一) [J]. 广西冶金, 1994(2): 19-29.
- [21] Ercag, E. and Apak, R. (1997) Furnace Smelting and Extractive Metallurgy of Red Mud: Recovery of TiO_2 , Al_2O_3 and Pig Iron. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, **70**, 241-246. [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4660\(199711\)70:3<241::AID-JCTB769>3.0.CO;2-X](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1097-4660(199711)70:3<241::AID-JCTB769>3.0.CO;2-X)
- [22] 逯军正, 于先进, 张丽鹏. 从赤泥中回收铁的研究现状[J]. 山东冶金, 2007, 29(4): 10-12.
- [23] Zhu, D., Chun, T.J., Pan, J. and He, Z. (2012) Recovery of Iron from High-Iron Red Mud by Reduction Roasting with Adding Sodium Salt. *Journal of Iron and Steel Research, International*, **19**, 1-5. [http://dx.doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60131-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60131-9)
- [24] 管建红. 采用脉动高梯度磁选机回收赤泥中铁的试验研究[J]. 有色金属科学与工程, 2000, 14(4): 15-18.
- [25] 杨文. 从赤泥中回收铁和氧化铝的研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [26] 曾建民, 何奥平, 詹海鸿, 等. 一种利用赤泥和红土镍矿制备铁镍合金的方法[P/OL]. CN104178624A. 2014-8-25.
- [27] Piga, L., Pochetti, F. and Stoppa, L. (1993) Recovering Metals from Red Mud Generated during Alumina Production. *JOM*, **45**, 54-59. <http://dx.doi.org/10.1007/BF03222490>
- [28] Pankaj Kasliwal, P.S.T.S. (1999) Enrichment of Titanium Dioxide in Red Mud: A Kinetic Study. *Hydrometallurgy*, **53**, 73-87. [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-386X\(99\)00034-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-386X(99)00034-1)
- [29] Cengelöglu, Y., Kir, E. and Ersöz, M. (2001) Recovery and Concentration of Al, Fe, Ti, and Na from Red Mud. *Journal of Colloid and Interface Science*, **244**, 342-346. <http://dx.doi.org/10.1006/jcis.2001.7924>
- [30] 周秋生, 范旷生, 李小斌, 彭志宏, 刘桂华. 采用烧结法处理高铁赤泥回收氧化铝[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2008, 39(1): 92-97.
- [31] 李军旗, 龙琼, 徐本军. 烧结法处理赤泥回收氧化铝的研究[J]. 轻金属, 2009(11): 11-13.
- [32] 郑秀芳. 低温拜耳法赤泥回收铝、钠工艺研究[J]. 山东冶金, 2010, 32(1): 16-18.

- [33] Zhong, L., Zhang, Y.F. and Zhang, Y. (2009) Extraction of Alumina and Sodium Oxide from Red Mud by a Mild Hydro-Chemical Process. *Journal of Hazardous Materials*, **172**, 1629-1634. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.036>
- [34] 张江娟. 从赤泥中回收二氧化钛的初步研究[J]. 中国资源综合利用, 2003(1): 28-30.
- [35] 李亮星, 黄茜琳. 从赤泥中提取钛的试验研究[J]. 湿法冶金, 2011, 30(4): 323-325.
- [36] Ghosh, I., Guha, S., Balasubramaniam, R. and Ramesh Kumar, A.V. (2011) Leaching of Metals from Fresh and Sintered Red Mud. *Journal of Hazardous Materials*, **185**, 662-668. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.09.069>
- [37] Ochsenkühn-Petropoulou, M.Th., Hatzilyberis, K.S., Mendrinou, L.N. and Salmas, C.E. (2002) Pilot-Plant Investigation of the Leaching Process for the Recovery of Scandium from Red Mud. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **41**, 5794-5801. <http://dx.doi.org/10.1021/ie011047b>
- [38] 尹中林. 从平果铝矿的拜耳法赤泥中提取氧化钪的初步试验研究[J]. 铝镁通讯, 1995(3): 16-23.
- [39] 姜平国. 赤泥中回收稀土金属的综述[J]. 资源再生, 2005, 24(10): 8-9.
- [40] 胡璇, 刘万超, 石磊. 电感耦合等离子体原子发射光谱法测定赤泥浸出液中稀土元素[J]. 冶金分析, 2015, 35(12): 46-50.