

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2020.06.017

赤泥提钛技术研究现状与展望

李博琦^{1,2,3} 谢 贤^{1,2,3} 纪翠翠^{1,2,3} 朱 辉^{1,2,3} 黎 洁^{1,2,3} 康博文^{1,2,3}

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 昆明 650093;

3. 云南省金属矿尾矿资源二次利用工程研究中心, 昆明 650093)

摘 要: 赤泥是铝土矿提取氧化铝工业生产流程中排放出的固体废弃物。随着铝产业的快速发展, 大量赤泥排放堆积, 占用大量土地资源, 对自然生态环境造成了严重污染。铝工业因生产工艺的差异会产出不同类型的赤泥, 但产出的赤泥中均含有钛、钪、铁、铝等多种有价金属, 是一种重要的可利用二次资源。重点综述了湿法、火法—湿法联合及选冶联合回收钛技术的原理及特点, 展望了我国从赤泥中高效综合利用回收钛技术的前景。

关键词: 氧化铝生产; 赤泥; 综合利用; 回收钛

中图分类号: TF09; TQ175.9

文献标志码: A

文章编号: 1005-7854(2020)06-0087-07

Research status and prospect of titanium extraction from red mud

LI Bo-qi^{1,2,3} XIE Xian^{1,2,3} JI Cui-cui^{1,2,3} ZHU Hui^{1,2,3} LI Jie^{1,2,3} KANG Bo-wen^{1,2,3}

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming 650093, China;

3. Yunnan Province Engineering Research Center for Reutilization of Metal Tailings Resources, Kunming 650093, China)

Abstract: Red mud is a solid waste discharged from the production process of alumina extraction from bauxite. With the rapid development of aluminum industry, a large amount of red mud is discharged and piled up, occupying a lot of land resources, causing serious pollution to the natural ecological environment. Different types of red mud will be produced in aluminum industry due to different production processes. However, the red mud produced contains many valuable metals such as titanium, scandium, iron and aluminum, which is an important secondary resource. The principles and characteristics of titanium recovery technologies, including hydrometallurgy, pyrometallurgy and hydrometallurgy combination, and combined technique of beneficiation-metallurgy the prospect of titanium recovery from red mud in China are reviewed.

Key words: alumina production; red mud; comprehensive utilization; titanium recovery

赤泥是采用铝土矿生产氧化铝过程中产出的强碱性固体粉状废弃物, 其粒度细、外观呈红色或褐色。据统计, 我国铝土矿工业生产中每生产 1 t 氧化铝, 大约产出 1.0~2.5 t 赤泥^[1]。近年来, 我

国对铝的市场需求量呈递增趋势, 随着原料铝土矿矿石品位的逐渐降低, 赤泥产量逐年增多。目前我国赤泥堆存量已超过 3 亿 t^[2], 但我国对赤泥的综合利用率仅为 4%^[3]。赤泥的堆存不仅占用了大量土地资源, 而且对自然生态环境也产生了严重影响。而且, 赤泥中富含多种有价金属和非金属元素, 是一种可综合利用的二次资源。其中, 赤泥中的钛含量为 1.9%~21.2%^[4-5], 具有回收提取价值。国内外对赤泥提钛进行了大量的科学研究, 主

收稿日期: 2020-03-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51764025)

第一作者: 李博琦, 硕士研究生, 研究方向为矿产资源综合利用、浮选理论与工艺。E-mail: 393455368@qq.com

通信作者: 谢贤; E-mail: kgxianxie@126.com

要回收工艺可归结为三种：直接湿法冶金提钛、火法—湿法联合提钛和选冶联合回收钛工艺。赤泥提钛工艺的发展使得赤泥作为二次资源得以高效回收利用，不仅可解决由其带来的环境污染问题，而且可创造较高的经济效益，有望对我国制铝工业的可持续发展产生深远影响。

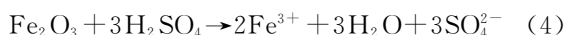
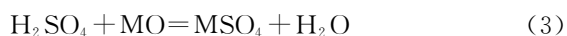
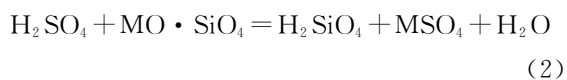
1 赤泥提钛技术研究现状

1.1 湿法冶金提钛

湿法冶金提钛技术是利用溶液中的酸与赤泥中的氧化物、硅酸盐发生化学反应生成可溶性盐及含钛沉淀物，将钛进行初步富集，之后再通过水解或焙烧等方法进行二次富集，主要可归纳为硫酸浸出、盐酸浸出和其他酸浸。

1.1.1 硫酸浸出提钛

很多学者对硫酸浸出提钛做了大量的试验研究，通过控制浸出条件，寻求最大的浸出率。如李轶韬等^[6]将赤泥置于 SO_2 气氛中，使其充分吸收，既降低了赤泥的碱性，也减少了后续试验的酸用量。在浸出过程中，赤泥中的 TiO_2 与 H_2SO_4 反应生成 $\text{Ti}(\text{SO}_4)_2$ 进入溶液，Fe、Na、K 也生成可溶性盐进入溶液。而 CaO 、 $\text{MO} \cdot \text{SiO}_4$ （复合硅酸盐）则生成 CaSO_4 和 H_2SiO_4 沉淀，从而实现钙、硅等杂质的分离，主要发生的化学式见式(1)~(6)，试验结果表明，在硫酸浓度 7 mol/L、温度 90 °C、浸取时间 2.5 h、液固比 3 : 1 条件下，赤泥中钛的浸出率高达 85% 以上。试验中通过酸浸—焙烧—再酸浸的工艺大大降低了硅胶对过滤和吸附环节的影响。

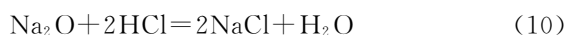
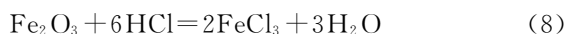
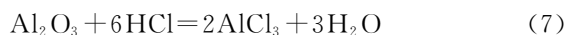


ZIMMER 等^[7]用浓硫酸对赤泥酸浸提钛进行了研究，首先用过量为 98% 的硫酸在 250 ~ 350 °C 气氛下对赤泥酸浸 1.5 h，加水稀释后，加入 NaOH 或 CaO 调节溶液 pH 值至 1 左右，最后对溶液加热至沸腾，沸腾持续时间 5 h，沉淀物中钛的富集率达 97%，再经后续回收处理得到二氧

化钛。AGATZINI 等^[8]研究了在常温下用稀硫酸直接对赤泥进行酸浸提钛，通过统计分析大量试验数据得出结论：在液固比 20 : 1、温度为 60 °C 的情况下，用浓度 3 mol/L 的稀硫酸对其进行酸浸，此时钛的浸出率达 64.5%。该方法虽浸出温度低，但酸用量较大，浸出率较低。朱晓波等^[9]用硝酸、盐酸、硫酸三种酸分别作浸出剂对赤泥中的钛进行提取，探索了影响钛浸出率的诸多因素。通过分析大量试验数据得出，硫酸作为浸出剂回收赤泥中的钛效果最佳，在浸出温度为 100 °C、液固比为 6 : 1 的最佳条件下，用浓度 40% 的硫酸对赤泥浸出 1 h，浸出率可达到 90%，分析表明：与酸反应溶解的含钛矿物为板钛矿和钙钛矿。加入适量柠檬酸作酸浸赤泥提钛助浸剂，可大大提高钛的浸出率，降低硫酸的消耗^[10]。

1.1.2 盐酸浸出提钛

盐酸浸出提钛是利用 Al、Fe、Na、K 等与盐酸反应溶解进入溶液，钛因不与盐酸反应而赋存于浸出渣中，再进行固液分离实现钛的富集。THAKUR 等^[11]研究了用盐酸处理赤泥回收钛，首先使用盐酸在低温条件下对赤泥进行酸浸，赤泥中 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 Na_2O 、 CaO 等氧化物与盐酸发生反应生成可溶性盐进入溶液中，反生的化学反应为(7)~(10)，钛因不溶解而富集于浸渣中，其含量从 31% 大幅度提高到 58%。曹利军等^[12]研究了拜耳赤泥酸浸回收二氧化钛的工艺，通过单因素试验和正交试验探索了影响二氧化钛品位因素，表明浸出温度差异对所回收的二氧化钛品位影响较大。在温度为 90 °C、酸过量系数为 1 的最佳条件下，用浓度 6.5 mol/L 的盐酸对赤泥浸出 1.5 h，浸渣中二氧化钛品位达到 28%。



1.1.3 其他酸浸及多段酸浸提钛

除硫酸、盐酸常用浸出酸外，磷酸、硝酸、草酸等也用于赤泥酸浸提钛^[13]，酸的类型和反应条件的不同直接影响赤泥中各金属组分的回收，针对赤泥中特定组分使用特定的酸浸出溶解，除杂更加彻底。将不同的酸按一定比例混合溶解就得到了一种选择性浸出剂，浸出效率大大提高。李望等^[14]将硫酸溶液、草酸与酒石酸按照质量比为

(6~8):(1~2):(1~2)混合溶解,得到了选择性浸出药剂。碎磨后的赤泥颗粒在液固比 2~4 mL/g、浸出温度为 120~180 °C 和浸出压力为 1.5~3 MPa 的条件下进行搅拌浸出,获得了钛浓度高和杂质含量低的酸浸液,通过调节 pH 值 2.2~2.8 后水解,水解产物在合适的煅烧条件下进行煅烧,获得了纯度大于 99.6% 的钛白粉产品,钛回收率大于 90%。

多酸分段浸出提钛工艺改善了酸浸选择性,部分铁、铝等金属元素也得以回收。先盐酸后硫酸两段酸浸工艺^[15-17]应用尤为广泛,赤泥中的铝硅酸盐、铁氧化物和铝酸钠与盐酸反应后溶解,钛因不与盐酸反应而富集于浸出渣中,然后用硫酸对浸出渣中的钛进行酸浸,再经过加热水解、焙烧得到钛产品。PRADEEP^[18]采用先盐酸后硫酸两段酸浸工艺对赤泥中的钛进行回收。首先将温度条件控制在 90~95 °C 内,让赤泥与稀盐酸混合相互反应,然后将沉积物用浓度 20%~25% 盐酸进行再处理,分离出氯化铝和氯化铁,最后将沉积物在温度 150~280 °C 的条件下使用硫酸进行处理,沉积物中的钛与硫酸发生反应生成硫酸钛,然后对硫酸钛加热水解后的产物在 1 000 °C 下进行焙烧。张丽^[19]也采用先盐酸后硫酸两段酸浸工艺对赤泥中的钛进行回收,盐酸浸出段铝的浸取率达到 93.35%,铁的浸出率达到 95.76%。二段酸浸条件:硫酸浓度为 8 mol/L、液固比 6:1、浸出温度 90 °C、浸出时间 2.5 h,钛的浸出率高达 80%。

姜梅等^[20]用浓度 2%~6% 的盐酸对赤泥进行酸浸,将得到的浸出渣再用浓度 16%~22% 的盐酸进行二次酸浸,浸出液经过萃取、焙烧等一系列工序处理获得氧化钛,最后用浓度 80%~90% 硫酸对浸渣进行三次酸浸,浸出液内加入铁粉发生还原反应,降温得到 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 晶体,过滤后得到酸钛浸液,向其内加碱,再经过加热水解、焙烧得到氧化钛。杨志华^[21]利用三段酸浸工艺提取赤泥中的钛,最终得到纯度为 95% 的二氧化钛。

湿法提钛简化了赤泥提钛的工艺流程,节约能耗。酸浸介质主要有硫酸、盐酸、硝酸和磷酸等,通过单酸酸浸或多酸多段酸浸,均可有效地回收赤泥中的钛,且浸出率较高。但酸浸提钛条件较为苛刻,分离过程复杂,条件控制不当就会直接影响钛的浸出,而且酸浸没有选择性,一些金属元素溶于酸液中难以分离,导致资源浪费,同时也会产出大

量废酸。

1.2 火法—湿法联合回收钛

火法—湿法联合提钛技术是在酸浸作业前进行焙烧预处理。先将赤泥与焦炭等还原剂或铵盐、碳酸盐混合,在一定温度气氛下进行焙烧,除去部分杂质而富集钛,然后对剩余残渣进行酸浸处理,进而对钛再次富集,最后通过水解、焙烧等方法得到最终钛产品。

王红伟等^[22]采用焙烧—酸浸工艺对赤泥中的钛进行提取。首先将赤泥与铵盐混合进行焙烧,使 Fe、Al、Ca、Ti 等金属元素转化为易进入液相的化合物,焙烧产物经过水浸后,Ca 含量明显降低,Fe 和 Al 含量减少,Ti 含量基本不变,Ti 和 Si 则富集在浸出渣中,然后经过酸浸,得到富集钛的浸出液,之后采用先中和后水解的方法处理浸出液得到二氧化钛。在浸出液中加入饱和碳酸钠溶液调节 pH 值至 4.0,然后加入少量锐钛矿,在 100~110 °C 的气氛下水解 2.5 h,得到二氧化钛沉淀物,再通过静置、反复洗涤、过滤,最终得到较纯净二氧化钛沉淀物, TiO_2 含量达到 74.10%。RAGHAVAN 等^[23]将赤泥与石灰和碳酸钠混合,在温度 900~1 100 °C 的气氛下焙烧 3 h,焙烧后加水浸出,得到的浸出渣用硫酸进行酸浸,生成 $\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ 和 $\text{Ti}(\text{SO}_4)_3$ 的混合溶液,然后经过水解、过滤得到二氧化钛,滤液高温焙烧后得到 FeSO_4 。该流程有效地回收了赤泥中的钛,回收率为 74.81%。

南斯拉夫研究者对赤泥提钛做了大量的科学研究^[24]。首先将赤泥与焦炭、石灰石混合造块,然后进入电弧炉进行还原熔炼,炉渣经粉碎后用硫酸进行酸浸。浸出条件:液固比 6:1、温度 80~90 °C、浸出时间 30~60 min。使炉渣中的铝、钛、钽等有价值金属进入溶液得以回收,经过滤处理后,溶液稀释加入 5% 的二磷酸、2% 的 2-乙基己醇和煤油作萃取剂进行多级逆流萃取,使 99.5% 的有价值组分转入有机相,然后使用 10% 的碳酸钠溶液对其进行反萃,再对水相溶液进行水解分离出氢氧化钛,经焙烧后得到二氧化钛。加拿大 MARVIN 等^[25]将赤泥在 800~1 000 °C 的气氛下进行焙烧,除去 CO_2 、 H_2O ,然后将焙烧后产物内加入焦炭或煤炭等作为还原剂,在 1 545~1 850 °C 的气氛下进行还原焙烧,回收铁。随后剩余残渣经过细磨过

筛,用浓度60%的硫酸酸浸得到浸渣,往其内加入铝屑进行还原反应,用浓度60%硫酸对生成物洗涤,得到 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 和 $\text{Ti}(\text{SO}_4)_3$ 富集于溶液中,溶液冷却至20~25℃得到 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 晶体,溶液再经加热水解得 TiO_2 ,回收率高达93%。

不论是湿法提钛工艺,还是火法—湿法联合提钛工艺,均可达到回收钛的目的。火法—湿法联合工艺首先对赤泥进行高温焙烧,使其矿物结构发生改变,提高浸出选择性,进而达到富集的目的,在回收钛的同时,其他有价金属元素也得以富集,但工艺较为复杂、能耗较大,且过程中也会产生废渣。

1.3 选冶联合法回收钛及其他有价金属

选冶联合法回收钛技术是一种将酸浸工艺、焙烧工艺与传统选矿工艺(重、磁、浮)相结合的赤泥提钛新方法。它在回收钛的同时可以兼顾其他有价金属的回收,可通过酸浸—浮选、焙烧—磁选—酸浸、焙烧—磁选—重选—酸浸等工艺逐级回收各种有价金属。

HUANG等^[26]利用酸浸—浮选联合工艺回收钛,首先经焙烧等工序回收铁,然后使用酸对除杂后的炉渣进行酸浸,最后对浸渣进行浮选处理,得到的尾矿中富含大量钛,再对其提取回收钛。研究过程中还发现浓硫酸萃取铝、铁,钛等十分有效,但高温不利于钛的提取,此工艺可以回收92.7%的钛。龙琼等^[27]通过单因素试验分析了磁场强度、硫酸浓度、液固比、温度、浸出时间对酸浸赤泥浸出钛的影响。实验结果表明:在磁感应强度0.41 T,液固比3:1的条件下,用浓度5 mol/L的硫酸在90℃气氛下对赤泥浸出2 h,钛的浸出率高达85.15%,在无磁场条件下钛的浸出率略低。美国矿物局采用还原焙烧—磁选—酸浸联合工艺回收钛,首先将赤泥与石灰石、碳酸钠和煤混合在一定温度下进行还原焙烧,然后进行粉碎、水浸、过滤后去除可溶铝盐,再利用高梯度磁选机对浸渣进行分选,回收磁性铁元素,非磁性部分用硫酸进行酸浸,生成钛氧硫酸盐富集于浸出液中,经水解、焙烧得到纯度为87%~89%的二氧化钛^[28]。

董红军等^[29]研究了一种焙烧—磁选—碱洗—酸浸回收钛和其他有价金属的联合工艺。将赤泥与煤灰混合进行磁化焙烧,通过磁选得到磁性铁精矿和非磁性产品,其非磁性产品经过稀碱溶出氧化

铝,洗涤渣配成矿浆,吸收燃煤烟气中的 SO_2 ,洗涤渣中的碱被 SO_2 中和溶解,pH值可以降到5左右,向洗涤渣中加入浓度90%的 H_2SO_4 进行酸解,溶出钎、钛于酸解液中,酸解残渣含有 SiO_2 ,可直接用于水泥和耐火材料的生产。酸解液加热到90~100℃,加入偏钛酸晶种,钛以偏钛酸的形式通过水解析出,偏钛酸经过滤洗涤再经煅烧制得二氧化钛,二氧化钛的回收率达到89%。

刘保伟等^[30]研究了一种从赤泥炉渣中回收钛的方法,工艺流程如图6所示。首先回收氧化铝工业固体废弃物赤泥中的铁,把回收铁后的炉渣与浓硫酸混合进行硫酸化焙烧,通过水浸出后,得到含偏钛酸的混合溶液,再加入氨水除铝使钛液得到净化,然后进行水解得到偏钛酸结晶沉淀,最后将偏钛酸进行煅烧得到二氧化钛,成功将赤泥还原铁炉渣中的钛进行回收,钛回收率可达70%以上,且纯度较高。

选冶联合法回收钛工艺在湿法工艺和火法—湿法联合工艺的基础上进行了优化升级,与传统选矿工艺(重、磁、浮)相结合,通过多段选别作业,逐级回收各种有价金属元素,大大提高分离效率,降低能耗,同时对其他有价金属也进行了高效回收。工艺可实现规模化、产业化,使赤泥资源得以高效综合利用,创造更大的经济效益。

2 结论与展望

近年来,随着铝产业的大力发展,工业生产过程中产生的大量赤泥堆积对环境产生了严重影响。赤泥提钛是一种有效解决手段,不仅使二次资源得以高效利用,还可以解决环境污染和钛资源短缺等问题。

湿法提钛工艺采用单酸浸出或多酸多段浸出工艺对赤泥中的钛进行高效回收,浸出率较高、能耗低,但酸用量较大,浸出条件较为苛刻,控制不当就会直接影响最终产品质量,且酸浸过程没有选择性,导致其他有价金属溶解难以从酸液中分离。火法—湿法提钛工艺首先对赤泥进行高温焙烧,通过改变矿物的结构,提高浸出选择性,从而富集钛金属,同时其他有价金属元素也得以富集,但工艺较为复杂、能耗较大。选冶联合法回收钛优化了湿法、火法工艺,使其与传统选矿工艺(重、磁、浮)相结合,大大提高了钛的回收率,同时也对其他有

价金属进行了高效回收。该工艺可实现规模化、产业化,使赤泥资源得以高效地综合利用。

目前,选冶联合法虽然可高效回收赤泥中的钛和其他有价金属,创造了一定的经济效益,同时可缓解其对环境的影响,但仍存在着工艺流程复杂、耗能大等问题。未来赤泥的综合利用应突破固有的应用结构和途径,秉持着绿色、经济、低耗、可持续发展的理念,开发更精细化、高端化和高附加值的综合利用新途径,优化产业结构,形成赤泥综合利用产业链,实现赤泥最大限度的开发和利用,积极为我国铝工业绿色、可持续发展奠定坚实的基础。

参考文献

- [1] 常军,邵延海,李硕,等.赤泥中有价金属元素综合回收研究现状及进展[J].矿冶,2017,26(3): 59-63.
CHANG J, SHAO Y H, LI S, et al. Current situation of comprehensive recovery and utilization of valuable elements in red mud[J]. Mining and Metallurgy, 2017, 26(3): 59-63.
- [2] 赵恒,李望,朱晓波,等.赤泥提钛研究现状与展望[J].河南化工,2018,35(6): 3-8.
ZHAO H, LI W, ZHU X B, et al. Research status and prospect on extracting titanium from red mud[J]. Henan Chemical Technology, 2018, 35(6): 3-8.
- [3] 廖仕臻,杨金林,马少健,等.赤泥综合利用研究进展[J].矿产保护与利用,2019,39(3): 21-27.
LIAO S Z, YANG J L, MA S J, et al. Research progress in the comprehensive utilization of red mud[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(3): 21-27.
- [4] 南相莉,张延安,刘燕.我国主要赤泥种类及其对环境的影响[J].过程工程学报,2009,9(1): 459-464.
NAN X L, ZHANG Y A, LIU Y. Main categories of red mud and its environmental impacts[J]. Journal of Process Engineering, 2009, 9(1): 459-464.
- [5] 韩东战,尹中林.赤泥提钛研究现状[J].矿产综合利用,2017(3): 33-37.
HAN D Z, YIN Z L. Research status of titanium extraction from red mud[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017(3): 33-37.
- [6] 李轶韬,李军旗,肖伟.赤泥酸浸回收钛的实验研究[J].云南化工,2009,36(6): 18-20.
LI Y T, LI J Q, XIAO W. Experimental investigation on leaching titanium from red mud with acid[J]. Yunnan Chemical Technology, 2009, 36(6): 18-20.
- [7] ZIMMER E, NAFISSI A, WINKHAU G. Reclamation treatment of red mud; US4119698[P]. 1978-10-10.
- [8] AGATZINI L S, OUSTADDAKIS 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): 579-586.
- [9] 朱晓波,管学茂,李望.赤泥酸浸提钛实验研究[J].稀有金属与硬质合金,2015,43(2): 11-13.
ZHU X B, GUAN X M, LI W. Experimental research on titanium recovery from red mud by acid leaching[J]. Rare Metals and Cemented Carbide, 2015, 43(2): 11-13.
- [10] ZHU X B, LI W, GUAN X M. Kinetics of titanium leaching with citric acid in sulfuric acid from red mud[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(9): 3139-3145.
- [11] THAKUR R S, DAS S N. Red mud analysis and utilization[J]. Wiley Eastern New Delhi, 1994(2): 18-20.
- [12] 曹利军,李军旗,徐本军.赤泥盐酸浸出富集钛的实验研究[J].中国稀土学报,2008,26(专辑): 819-821.
CAO L J, LI J Q, XU B J. Experimental research on the enrichment of titanium from red mud by hydrochloric acid leaching[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2008, 26(Special issue): 819-821.
- [13] PEPPER R A, COUPERTHWAITES J, MILLAR G J. Comprehensive examination of acid leaching behaviour of mineral phases from red mud: Recovery of Fe, Al, Ti and Si[J]. Minerals Engineering, 2016, 99: 8-18.
- [14] 李望,赵恒,朱晓波,等.一种赤泥选择性浸出提取钛的方法:CN107475521A[P]. 2017-12-15.
LI W, ZHAO H, ZHU X B, et al. A method for selective extraction of titanium from red mud: CN107475521A[P]. 2017-12-15.
- [15] 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,2003,21(1): 28-30.
ZHANG J J. Preliminary study recovery titanium dioxide from red mud of industry slag[J]. Comprehensive Utilization of Resources in China, 2003, 21(1): 28-30.

- [16] 李亮星, 黄茜琳. 从赤泥中回收铁的试验研究[J]. 湿法冶金, 2011, 30(4): 323-325.
LI L X, HUANG Q L. Experimental study on iron recovery from red mud[J]. Hydrometallurgy, 2011, 30 (4): 323-325.
- [17] 姜平国, 王鸿振. 从赤泥中浸出钛的研究[J]. 中国有色冶金, 2008, 37(2): 52-54.
JIANG P G, WANG H Z. Study on titanium recovery from red mud [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2008, 37(2): 52-54.
- [18] PRADEEP K M. Recovery of TiO_2 from red mud for abatement of pollution and for conservation of land and mineral resources [J]. Light Metals, 1994, 78(3): 78159-165.
- [19] 张丽. 利用赤泥制备絮凝剂及提取钛的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
ZHANG L. The use of red mud preparing flocculent and study on the extraction of titanium [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [20] 姜梅, 杨智华, 郑秀芳, 等. 从赤泥中提取金属钪、钛的方法: CN101182601[P]. 2007-05-21.
JIANG M, YANG Z H, ZHENG X F, et al. Method for extracting scandium and titanium from red mud: CN101182601 [P]. 2007-05-21.
- [21] 杨志华. 从富矿赤泥中提取钪、钛的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
YANG Z H. Research on extraction of scandium and titanium from rich red mud [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010.
- [22] 王红伟, 马科友, 秦凤婷, 等. 烧结法赤泥中有价金属分离试验研究[J]. 湿法冶金, 2014, 33(3): 192-195.
WANG H W, MA K Y, QIN F T, et al. Separate of valuable metals from red mud off sintering method[J]. Hydrometallurgy, 2014, 33(3): 192-195.
- [23] RAGHAVAN P K N, KSHATRIYA N K, KATARZYNAW. Recovery of metal values from red mud[J]. Light Metals, 2011(6): 103-106.
- [24] 徐进修, 罗修莲. 赤泥的综合利用和有价金属的回收工艺综述[J]. 广西冶金, 1994(4): 19-29.
XU J X, LUO X L. Summary of comprehensive utilization of red mud and recovery process of valuable metals[J]. Guangxi Metallurgy, 1994(4): 19-29.
- [25] MARVIN J U, NIAGARA A. Process for the separation and recovery of Fe, Ti, and Al values from ores and waste materials containing same: US2830892[P]. 1958-06-18.
- [26] HUANG Y, CHAI W, HAN G, et al. A perspective of stepwise utilization of Bayer red mud: step two- extracting and recovering Ti from Ti-enriched tailing with acid leaching and precipitate flotation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 307 (10): 318-327.
- [27] 龙琼, 路坊海, 周登凤, 等. 磁场下硫酸浸出赤泥回收钛的研究[J]. 广东化工, 2016, 43(17): 32-33.
LONG Q, LU F H, ZHOU D F, et al. Experimental investigation on leaching titanium from red mud by sulphuric acid under magnetic fields[J]. Guangdong Chemical Industry, 2016, 43 (17): 32-33.
- [28] LUIGE P, FAUSTO P, LUISA S. Recovering metals from red mud generate during alumina production[J]. Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, 1993, 45(11): 54-59.
- [29] 董红军, 甘霖, 张正林, 等. 从赤泥中综合回收铁、铝、钪、钛、钒等有价值金属的方法: CN103898330A[P]. 2014-07-02.
DONG H J, GAN L, ZHANG Z L, et al. Method for comprehensive recovery of valuable metals such as iron, aluminum, scandium, titanium, vanadium, etc. from red mud: CN103898330A[P]. 2014-07-02.
- [30] 刘保伟, 甘霖, 张正林, 等. 从赤泥炉渣中回收钛的方法: CN103589872A9[P]. 2014-02-19.
LIU B W, GAN L, ZHANG Z L, et al. Method for recovering titanium from red mud slag: CN103589872A9[P]. 2014-02-19.
- [31] 张少华, 赵秀芳, 张淑珍. 两组分富矿烧结赤泥中提取有价元素的技术路线[C] // 济南: 全省有色金属学术交流会, 2007: 23-28.
ZHANG S H, ZHAO X F, ZHANG S Z. Technical route for extracting valuable elements from two-component rich sintered red mud [C] // Jinan: Provincial Nonferrous Metal Academic Exchange Conference, 2007: 23-28.
- [32] 吴世超, 朱立新, 孙体昌, 等. 赤泥综合利用现状及展望[J]. 金属矿山, 2019, 48(6): 38-43.
WU S C, ZHU L X, SUN T C, et al. Comprehensive utilization status and prospect of red mud[J]. Metal Mine, 2019, 48(6): 38-43.
- [33] 包惠明, 傅涛. 赤泥的综合利用现状分析[J]. 矿产综合利用, 2018(5): 6-12.
BAO H M, FU T. Analysis of comprehensive utilization of red mud[J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 2018(5): 6-12.

- [34] 王璐, 郝彦忠, 郝增. 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): 1697-1710.
WANG L, HAO Y Z, HAO Z. Progress in valuable metal element recovery and utilization of red mud[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28 (8): 1697-1710.
- [35] ENES S, BAYRAMOGLU M. Statistical modeling of sulfuric acid leaching of TiO_2 from red mud[J]. Hydrometallurgy, 2000, 57(2): 181-186.
- [36] NARAYANAN R P, KAZANTZIS N K, EMMERT M H. Selective process steps for the recovery of scandium from Jamaican bauxite residue (red mud) [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2017, 6(1): 1478-1488.
- [37] 李冬, 潘利祥, 赵良庆. 赤泥综合利用的研究进展[J]. 环境工程, 2014, 32(1): 616-618.
LI D, PAN L X, ZHAO L Q. Advance research of utilization technology of red mud[J]. Environmental Engineering, 2014, 32 (1): 616-618.
- [38] 李彬, 张宝华, 宁平. 赤泥资源化利用和安全处理现状与展望[J]. 化工进展, 2018(2): 714-723.
LI B, ZHANG B H, NING P. Current status and prospects of red mud resource utilization and safe treatment [J]. Progress in Chemical Industry, 2018(2): 714-723.
- [39] 朱晓波, 李望, 管学茂. 赤泥中有价金属提取的研究现状及建议[J]. 稀有金属与硬质合金, 2015, 43(6): 28-32.
ZHU X B, LI W, GUAN X M. Research status and suggestions on the extraction of valuable metals from red mud[J]. Rare Metals and Cemented Carbide, 2015, 43(6): 28-32.
- [40] 高建阳, 杜善国. 高铁赤泥提取 TiO_2 试验研究[J]. 有色冶金节能, 2017, 33(4): 20-23.
GAO J Y, DU S G. Experimental research on extraction of high-speed red mud[J]. Non-ferrous Metallurgy Energy Saving, 2017, 33 (4): 20-23.
- [41] 樊艳金, 梁焕龙, 黄泰元. 用钛白废酸浸出赤泥的试验研究[J]. 湿法冶金, 2014, 33(5): 375-377.
FAN Y J, LIANG H L, HUANG T Y. Experimental research on leaching red mud with titanium white waste acid [J]. Hydrometallurgy, 2014, 33 (5): 375-377.

(上接第 61 页)

- [10] 梅光贵, 王德润, 周敬元, 等. 湿法炼锌学[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2001.
MEI G G, WANG D R, ZHOU J Y, et al. Zinc Hydrometallurgy [M]. Changsha: Central South University Press, 2001.
- [11] 俞小花, 谢刚, 王吉坤. 从含镉加压浸出液中和沉淀镉[J]. 有色金属, 2008, 60(1): 71-73.
YU X H, XIE G, WANG J K. Indium deposition by neutralization from oxygen pressure leaching solution with high indium content [J]. Nonferrous Metal, 2008, 60(1): 71-73.
- [12] 彭建蓉, 王吉坤, 杨大锦, 等. 从含镉加压浸出溶液中回收镉试验[J]. 中国稀土学报, 2010, 28: 755-759.
PENG J R, WANG J K, YANG D J, et al. Experimental research of recovering indium from oxygen pressure leaching solution with high indium content[J]. Journal of Chinese Rare Earths Society, 2010, 28: 755-759.