

铝灰中铝及其氧化物回收方法现状*

梁诚, 彭建平, 狄跃忠, 王耀武, 冯乃祥

(东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110189)

摘要: 铝灰主要由氧化铝(Al_2O_3)、金属铝(Al)、氮化铝(AlN)、镁尖晶石(MgAlO_4)、方镁石(MgO)、石英(SiO_2)和含有少量碳化物和氮化物的盐熔剂组成。总结了铝灰的形成过程和环境危害。概述了火法冶金方法和湿法冶金方法在回收铝和氧化铝方面的应用,以期提高铝及氧化铝的回收率,从而最大程度地减少铝灰的污染,实现铝灰资源化。

关键词: 铝灰;火法冶金;湿法冶金;回收方法

中图分类号: X758 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2019)03-0037-05

DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2019.03.006

Research Status of Recovery Methods of Aluminum and Its Oxide in Aluminum Ash

LIANG Cheng, PENG Jianping, DI Yuezhong, WANG Yaowu, FENG Naixiang

(School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110189, Liaoning, China)

Abstract: Aluminum dross is composed mainly of alumina(Al_2O_3), metal aluminum(Al), Aluminum nitride(AlN), magnesium spinel (MgAlO_4), Periclase (MgO), quartz (SiO_2) and molten salt, which contains a small amount of carbides and nitrides. The formation process and environmental hazards of aluminum dross are outlined. The application of pyrometallurgical method and hydrometallurgical method in the recovery of aluminum and alumina is summarized in order to improve the recovery rate of aluminum and alumina, reduce the pollution of aluminum dross to a greatest extent and realize the recycling of aluminum dross.

Key words: aluminum dross; pyrometallurgy; hydrometallurgy; recovery methods

引言

铝灰产生于金属铝的熔炼或电解铝工艺中,由铝熔体表面的不熔混合物及其与添加剂反应生成的物质组成^[1-5]。根据欧洲危险废物目录^[6],铝灰被归类为有毒和危险废物。直接堆存铝灰不但占用大量耕地,而且其盐分会缓慢积聚在土壤而导致盐碱化,扰乱周围植物根系正常生理活动^[7]。铝灰中的钡、铬、铅也会导致土壤重金属超标,污染地下水。

因为铝灰中含有大量 AlN ,与水反应会产生氨气,污染空气^[8-9]。

铝灰的分类及其组成参见表1^[10]。铝灰组成非常复杂,主要含有 Al 、 Cl 、 Na 、 N 等元素。铝灰包括一次铝灰和二次铝灰,一次铝灰可作为二次铝工业的原料,二次铝灰可以从各种铝的废弃物中提取铝后得到^[11-12]。与一次铝灰相比,二次铝灰中金属铝的含量较低,氟和氯含量较高,环境危害更大,二次铝灰的无害化处理和回收尤为重要。

* 收稿日期:2019-03-07

基金项目:国家重点研发项目(2018YFC1901905);国家自然科学基金项目(51774080)

作者简介:梁诚(1996-),男,硕士研究生,主要从事铝灰综合利用研究,Email: 2825965334@qq.com。

通信作者:彭建平(1979-),男,博士,副教授,主要从事轻金属冶金节能减排方面研究, E-mail: pengjp@mail.neu.edu.cn。

表1 铝灰的类型和组成

Table 1 Type and composition of aluminum dross

铝灰类型	金属铝含量/%	氧化铝含量/%	盐含量/%
一次铝灰	15~80	20~85	< 5
二次铝灰	7~50	30~50	30~50

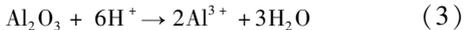
不同于其他重金属熔炼产生的炉渣,铝灰一般呈松散的灰状^[1]。当铝灰中存在的金属高于70%时,铝灰由松散转变为致密状^[13]。Meshram等^[10]研究了铝灰混合物的渗透性以及体积收缩率等物理性能,使用50%~90%一次铝灰、膨润土和一定比例水混合而成砖样品。实验结果证明了铝灰混合物的渗透率随着颗粒尺寸的减小而增加^[14],而体积收缩率最大为15%,已经满足耐火砖的使用要求。

铝灰的化学性质比较活泼,既可以与酸发生反应,又可以与碱发生反应,这也为湿法处理铝灰提供了多种选择。湿法处理铝灰相关的化学反应如下:

(1) 金属铝与酸和碱发生的反应^[15]:



(2) Al_2O_3 是两性金属氧化物,既可以与酸反应,也可与碱反应:



在溶液环境下:



在熔融环境下:

表2 铝金属的提取方法(火法)

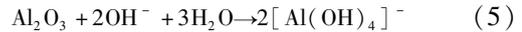
Table 2 Method of extracting aluminum metal (pyrometallurgical method)

处理技术	回收方法	优缺点
炒灰回收法 ^[18]	利用铝灰自身热源和外部热量使铝逐步聚集	有害气体多、污染环境
倾动回转窑法	利用大型回转窑加热,使铝熔融汇集	操作简便、回收率低、成本高
压榨回收法 ^[19]	直接加入热铝灰,施加压力将熔融铝挤压出来	操作环境好、自动化程度高、回收率低

等离子体技术是新发展的技术。Gomez等^[20]利用等离子体技术回收铝灰中的金属铝,该方法的优势在于等离子炉中的火焰温度很高,而且废气量明显减少。因为炉温很快达到金属铝熔出温度,金属铝的烧损减少^[21]。等离子体技术的缺点在于其设备复杂且耗电量大,大规模铝灰的等离子体处理在经济上是否可行还有待研究^[22]。

1.2 筛分法

由于金属铝质地较软,通过粉碎和筛分可以回收粗金属铝,通过精细研磨和筛分回收更细的金属



(3) AlN 的水解反应: AlN 与水生成 $\text{Al}(\text{OH})_3$ ^[15]:

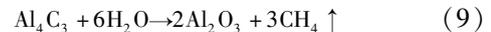
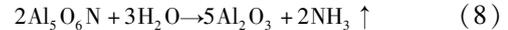
当 $\text{pH} < 8$ 时:



当 $\text{pH} > 8$ 时:



(4) 铝灰中存在少量的 $\text{Al}_5\text{O}_6\text{N}$ 和 Al_4C_3 等物质,都可以与水发生反应产生大量气体^[16]:



1 回收金属铝

一次铝灰中金属铝含量较高,一般在30%以上。从铝灰中回收Al有着可观的经济效益。目前可用于从铝灰中回收金属铝的方法包括火法回收、筛分法、电选法和碱性浸出法。

1.1 火法回收

火法回收铝的原理是基于金属铝的熔点较低,当温度超过金属铝的熔点时,金属铝被熔化成铝液,铝灰中其他物质为固相,在重力作用下实现金属铝的分离^[17]。目前通常采用的方法有炒灰回收法^[18]、倾动回转窑法、压榨回收法^[19]。表2列举了几种常见的方法及其特点。

铝^[15]。该法优点是工艺成熟,设备简单,但是筛分法生产效率低,对环境污染很严重。基于金属铝含量和晶粒尺寸之间关系的筛选技术可以使铝灰残余物的金属铝含量提高,同时降低铝灰残留物的AlN和 AlCl_3 含量。常规方法设计的滚筒筛的筛孔尺寸,没有充分考虑残余物的粒度分布。Hiraki等^[23]通过实验发现大于200 μm 的铝灰残留物具有较高的金属铝含量,而其AlN和 AlCl_3 含量较低。如果在筛选过程中使用250 μm 尺寸的滚筒筛,铝灰残余物中的金属铝质量分数提高了50%,而AlN和 AlCl_3 质量分数都减少了60%。

1.3 电选法

电选技术已在再生金属领域广泛应用,电选法回收金属铝的原理是利用铝灰中各物质的电性质差异来实现物料分离。通过对电选设备的转鼓施加高压直流电流的方式使铝灰中的各组分带电荷。由于 Al 比其他组分更容易带电,使得铝颗粒得到的更多的电荷,受电场力作用粘附于转鼓。转入地线后,铝颗粒因为失去电荷而脱离转鼓,从而实现 Al 的分离。

Mah 等^[24]将渣滓粉碎至 $-840\ \mu\text{m}$ 后,使用静电分离器来回收金属铝,其回收率达到 70%。Hwang 等^[25]则采用涡流电分离法,实现对 6~10 目尺寸金属铝的回收,但是 Al 的总回收效率还需要进一步提高。

1.4 碱性浸出法

二次铝灰中的 Al 含量较低,一般采取湿法回收金属铝。Murayama 等^[26]用浓度为 2 mol/L 的 NaOH 浸出铝灰 5 h,浸出液中 Al 的相对质量分数为 96%,但是 Al 的浸出率仅为 36%。Tsakiridis 等^[27]通过碱性高压浸出的方法,对二次铝灰进行破碎、筛分、水浸操作后,将铝灰在 240 °C 下与 260 g/L 的 NaOH 反应 100 min,浸出物中 Al 的质量分数仅为 57.5%,残渣中主要成分是 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 MgAl_2O_4 、 $\text{NaAl}_{11}\text{O}_{17}$ 和 $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$ 。碱性高压浸出液中硅的含量提高,去除杂质硅也会增加成本^[28]。

为了进一步提高 Al 的提取效率,郭学益等^[29]采用低温碱性熔炼法提取铝灰中的 Al。在一定的温度下,铝灰中的含铝组分与添加剂 Na_2O_2 反应生成可溶于水的碱式盐,达到 Al 与铝灰中其它物质的分离。优化工艺参数:碱灰质量比 1:3,盐灰质量比 0.4,熔炼温度为 500 °C,熔炼时间为 60 min,此时 Al 浸出率可高达 92.76%。

从酸性溶液中得到金属铝难度较大,而碱性浸出液可以直接利用拜耳法回收 Al。因此通常采用碱性浸出法来提取二次铝灰中的 Al。

2 回收氧化铝

Al_2O_3 因为硬度高、耐磨性好等优异性能一直备受关注^[30-32]。目前商业生产 Al_2O_3 大部分是使用铝土矿材料,通过拜耳工艺生产^[33]。而铝灰中的 Al_2O_3 含量较高,具有很大的利用价值。提取 Al_2O_3 的路线包括酸性浸出法和碱性提取法。酸浸出剂和碱浸出剂都可将铝灰中的金属铝及其化合物转化为

Al^{3+} 或 AlO_2^- ,通过向溶液中加入双氧水、碳酸铵、碳酸氢铵、氨水等物质与 Al^{3+} 或 AlO_2^- 生成 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 沉淀,后者经过煅烧生成 Al_2O_3 。

2.1 酸性浸出法

酸性浸出法广泛应用于铝灰回收 Al_2O_3 中,其中常用的酸浸出剂有硫酸溶液和盐酸^[34]。

Saifur 等^[35]使用 HCl 作为浸出剂,成功从铝灰中回收 Al_2O_3 。在 4 mol/L 盐酸、120 min 浸出时间和 100 °C 温度的最佳条件下,回收率最高可达到 71%, Al_2O_3 的纯度高达 99%。

刘晓红等^[36]首先在铝灰中加入 H_2SO_4 溶液获得 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$,然后加入 NH_4HCO_3 溶液生成碳酸铝铵,最后经过干燥焙烧后得到纳米级别的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。在 20% 质量分数 H_2SO_4 溶液,80 °C 浸出温度,3 h 浸出时间的最佳条件下,Al 的浸出率可达 91.5%。该方法工艺简单,不会产生新的废渣。

Dash 等^[37]通过筛选和筛分的方法初步回收铝灰中的金属铝,接着加入一定浓度的 H_2SO_4 溶液将剩余的 Al 和 Al_2O_3 均转变 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 溶液。 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 与氨水发生反应得到无定型的 $\text{Al}(\text{OH})_3$,最后对 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 进行高温煅烧处理,得到具有高附加值的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。该研究发现存在于铝灰中的盐会影响 Al 的浸出。在水浸出除去这些盐后,可以用 15% 的 H_2SO_4 溶解 85% 左右的 Al_2O_3 。将 H_2SO_4 浓度增加至 50% 时,可以溶解 95% 的 Al_2O_3 。

Mahinroosta 等^[38]采用新型五步浸出工艺,分别是盐酸浸出、共沉淀、纯化、再沉淀和煅烧,第一步加入 NaOH 溶液,得到富含 NaAlO_2 的溶液。第二步,通过加入一定量的 HCl 溶液得到 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 沉淀,最后洗涤 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 并在 700°C 下煅烧获得 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。在 38 mm~75 mm 铝灰粒径,120 min 浸出时间,85 °C 浸出温度,5 mol/L 盐酸,20 ml/g 液固比的最佳条件下, Al_2O_3 提取率约为 83%。实验得到的 Al_2O_3 具有纳米尺寸,并且具有高活性,可以应用于吸附和催化等方面。相对于硫酸和硝酸,盐酸与铝灰的反应较为温和。但是不足之处在于其工艺相对复杂,成本较高。酸性浸出法可以合成具有高附加值的 Al_2O_3 。与传统拜耳法从高硅原料中提取 Al_2O_3 相比,酸性浸出法的 Al 浸出率更高。

2.2 碱性提取法

目前世界上 90% 以上的 Al_2O_3 是由拜耳法生

产^[39]。其中常用于碱性提取法的浸出剂是 NaOH。

Davies 等^[40]利用拜耳法,首先进行水浸操作回收易溶的盐,如 NaCl 和 KCl。实验使用 150 g/L NaOH,分别在 100 °C 和 145 °C 下处理铝灰 15 min,结果表明铝灰中的 AlN 全部溶解。Al₂O₃ 总萃取率约为 42%。但是拜耳法液体对于铝灰中的微量杂质很敏感,且 Al₂O₃ 的提取率较低。

Guo 等^[41]将铝灰进行水浸预处理,使用一定浓度的 NaOH 溶液,通过碱性焙烧的方法从铝灰中回收 Al 并用其合成 γ -Al₂O₃。实验同时也证明了铝灰中氯化物的存在会降低 Al 的提取效率,而水浸预处理会降低铝灰中 NaCl 和 KCl 的含量,将 Al 的提取率从 85% 提高到 96%。因为铝灰中的 Al₂O₃ 大部分都是以 α -Al₂O₃ 的形式存在^[42],这种结构晶型完整,活性较低,在常温下难以与酸碱浸出剂发生反应。因此为了提高 Al₂O₃ 的提取率,欧玉静^[43]等将脱盐铝灰和 NaOH 溶液混合置于坩埚中,在 500 ~ 800 °C 下烧结,得到的 NaAlO₂ 熟料加水溶解,然后过滤得到 NaAlO₂ 溶液,通过 EDTA 返滴定法计算出 Al₂O₃ 的提取率高达 93.26%。在利用碱性提取法回收铝灰中的 Al₂O₃ 时,可以先经过水浸预处理降低其氯化物的含量,从而促进 Al₂O₃ 的浸出。碱性提取 Al₂O₃ 的优点是流程相对简单,作业方便,Al₂O₃ 产品质量高。

3 结论

铝灰是一种工业固体废物,与此同时也是一种富铝资源,可以作为回收 Al 及 Al₂O₃ 的原料。铝灰中 Al 和 Al₂O₃ 两种物料含量一般达到 70% 以上,所以对两种物质回收利用的研究具有很大的经济价值。

回收铝灰中的金属铝时,电选法在国内还不成熟,特别是在提高 Al 的提取率和减少污染方面。对于一次铝灰中 Al 的回收,火法回收目前仍是最高效最经济的途径,其中等离子技术污染小,Al 的回收效率高,有着很大的发展前景。二次铝灰中 Al 的含量相对较低,对于二次铝灰中 Al 的回收,一般选择碱性浸出法。另外,使用湿混料可以促进 Al 的浸出,还可以通过加入添加剂来提高 Al 的浸出率,常见的添加剂有 NaNO₃、Na₂O₂。

用湿法路线回收铝灰的 Al₂O₃ 是可行的,且回收得到的 Al₂O₃ 基本都达到了纳米尺寸,这使其在催化剂、生物载体材料等领域有着广泛的应用。与传统拜耳法从高硅原料中提取 Al₂O₃ 相比,酸浸法

回收 Al₂O₃ 的效率更高。在不超过浸出剂沸点的温度范围内,可以采用高温烧结法来提高 Al₂O₃ 的提取率。无论是碱性提取法还是酸性浸出法,铝灰经过水浸出后,铝灰中氯化物含量会降低,Al 的浸出率及 Al₂O₃ 的回收率会大大提高。

参考文献:

- [1] 吴艳,辛海霞,陈若平,等. 铝灰碱浸提取铝工艺研究[C]// 2010 年全国冶金物理化学学术会议专辑(下册). 马鞍山,2010.
- [2] 吴龙,胡天麒,郝以党. 铝灰综合利用工艺技术进展[J]. 有色金属工程,2016,6(6):45-49.
- [3] 马英,杜建伟,项赟,等. 铝灰渣中回收氧化铝的研究现状和进展[J]. 轻金属,2017(2):29-33.
- [4] 王劲松. 浸取熔炼法提取铝灰中铝的技术研究与应用[J]. 世界有色金属,2013(8):72-73.
- [5] 耿培久,白斌. 从铝灰中回收金属铝的生产工艺浅析[J]. 有色冶金节能,2013,29(4):4-7.
- [6] Environmental Protection Agency. European waste catalogue and hazardous waste list[M]. Ireland: Environmental Protection Agency, 2002.
- [7] Shinzato M. C., Hypolito R. Effect of disposal of aluminum recycling waste in soil and water bodies[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(7): 628.
- [8] Guo J. Recycling and utilization of the electrolytic aluminium ash and slag[J]. Materials Review, 2013, 40(1): 40-82.
- [9] 倪红军,陈祥,吕帅帅,等. 铝渣合成无机材料的研究现状及进展[J]. 现代化工,2015(11):19-22.
- [10] Meshram A., Singh K. K. Recovery of valuable products from hazardous aluminum dross: A review[J]. Resour. Conserv. Recycl., 2018, 130: 95-108.
- [11] Shinzato M. C., Hypolito R. Solid waste from aluminum recycling process: characterization and reuse of its economically valuable constituents[J]. Waste manage., 2005, 25(1): 37-46.
- [12] Hazar A. B. Y., Saridede M. N., çığdem M. A study on the structural analysis of aluminium drosses and processing of industrial aluminium salty slags[J]. Scand. J. Metall., 2005, 34(5): 213-219.
- [13] Manfredi O., Wuth W., Bohlinger I. Characterizing the physical and chemical properties of aluminum dross[J]. JOM, 1997, 49(11): 48-51.
- [14] Adeosun S. O., Sekunowo O. I., Taiwo O. O. Physical and mechanical properties of aluminum dross. [J] Adv. Mater., 2014, 3(2), 6-10.
- [15] Bruckard W. J., Woodcock J. T. Recovery of valuable materials from aluminium salt cakes[J]. Int. J. Miner. Process., 2009, 93(1): 1-5.
- [16] Tsakiridis P. E. Aluminium salt slag characterization and utilization - A review[J]. J. Hazard. Mater., 2012, 217-218 (none): 1-10.
- [17] 张宁燕,宁平,谢天鉴,等. 铝灰有价值组分回收及综合利用研究进展[J]. 硅酸盐通报,2017,36(06):1951-1956.

- [18] 郑磊. 铝灰高效分离提取及循环利用研究[D]. 长沙:中南大学,2010.
- [19] 李艳,夏毅敏. 热铝炉渣处理及高效冷却压滤机研制[J]. 湖南有色金属,2004,20(5):46-50.
- [20] Gomez E., Rani D. A., Cheeseman C. R., et al. Thermal plasma technology for the treatment of wastes; A critical review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 161(2-3): 614-626.
- [21] 李玲玲,宋明,靳强. 铝灰回收利用的研究进展[J]. 无机盐工业,2018,50(8):6-10.
- [22] Beheshti R., Moosberg-Bustnes J., Akhtar S., et al. Black dross: processing salt removal from black dross by thermal treatment[J]. JOM, 2014, 66(11): 2243-2252.
- [23] Hiraki T., Nagasaka T. An easier upgrading process of aluminum dross residue by screening technique[J]. Journal of material cycles and waste management, 2015, 17(3): 566-573.
- [24] Mah K., Toguri J. M., Smith H. W. Electrostatic separation of aluminum from dross[J]. Conservation & Recycling, 1986, 9(4): 325-334.
- [25] Hwang J. Y., Huang X., Xu Z.. Recovery of metals from aluminum dross and saltcake[J]. Journal of minerals and materials characterization and engineering, 2006, 5(1): 47-62.
- [26] Murayama N., Maekawa I., Ushiro H., et al. Synthesis of various layered double hydroxides using aluminum dross generated in aluminum recycling process[J]. International journal of mineral processing, 2012(110): 46-52.
- [27] Tsakiridis P. E., Oustadakis P., Agatzini-Leonardou S.. Aluminium recovery during black dross hydrothermal treatment [J]. Journal of environmental chemical engineering, 2013, 1(1-2): 23-32
- [28] 徐士尧,陈维平,万兵兵,等. 废铝再生熔炼中铝渣的回收处理工艺进展[J]. 特种铸造及有色合金,2016,36(9):934-938.
- [29] 郭学益,李菲,田庆华,等. 二次铝灰低温碱性熔炼研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(3):809-814.
- [30] Hassanzadeh-Tabrizi S. A., Taheri-Nassaj E., Sarpoolaky H.. Synthesis of an alumina-YAG nanopowder via sol-gel method [J]. Journal of alloys and compounds, 2008, 456(1): 282-285.
- [31] Yoon T. R., Rowe S. M., Jung S. T., et al. Osteolysis in association with a total hip arthroplasty with ceramic bearing surfaces[J]. JBJS, 1998, 80(10): 1459.
- [32] 冯凌云,陈晓明. 生物陶瓷材料的生物学性能评价[J]. 武汉工业大学学报,1996(2):124-126.
- [33] Silva M. P., Talbot D. E. J. Essential readings in light metals[M]. Springer international publishing, 2016.
- [34] Kelmers A. D., Canon R. M., Egan B. Z., et al. Chemistry of the direct acid leach, calciner, and pressure digestion-acid leach methods for the recovery of alumina from fly ash [J]. Resources and conservation, 1982, 9(82): 271-279.
- [35] Sarker M. S. R., Alam M. Z., Qadir M. R., et al. Extraction and characterization of alumina nanopowders from aluminum dross by acid dissolution process[J]. International journal of minerals, metallurgy, and materials, 2015, 22(4): 429-436.
- [36] 刘晓红,刘守信,邹美琪,等. 浸取铝灰制取纳米氧化铝新工艺[J]. 无机盐工业,2009,41(8):52-54.
- [37] Dash B., Das B. R., Tripathy B. C., et al. Acid dissolution of alumina from waste aluminium dross[J]. Hydrometallurgy, 2008, 92(1-2): 48-53.
- [38] Mahinroosta M., Allahverdi A.. A promising green process for synthesis of high purity activated-alumina nanopowder from secondary aluminum dross[J]. Journal of cleaner production, 2018, 179: 93-102.
- [39] 许文强,郭建强. 拜耳法溶出技术及装备的比较选择[J]. 有色矿冶,2007,23(6):55-57.
- [40] Davies M., Smith P., Bruckard W. J., et al. Treatment of salt cakes by aqueous leaching and Bayer-type digestion[J]. Minerals engineering, 2008, 21(8): 605-612.
- [41] Guo H., Wang J., Zhang X., et al. Study on the extraction of aluminum from aluminum dross using alkali roasting and subsequent synthesis of mesoporous γ -alumina[J]. Metallurgical and materials transactions B, 2018, 49(5): 2906-2916.
- [42] EI-Katatny E. A., Halawy S. A., Mohamed M. A., et al. Recovery of high surface area alumina from aluminium dross tailings[J]. Journal of chemical technology & biotechnology, 2000, 75(5): 394-402.
- [43] 欧玉静,李小龙,智鹏阔,等. 铝灰中 Al_2O_3 的回收工艺[J]. 化工科技,2018,26(6):31-36.

引用格式:梁诚,彭建平,狄跃忠,等. 铝灰中铝及其氧化物回收方法现状[J]. 矿产保护与利用,2019,39(3):37-41.

LIANG Cheng, PENG Jianping, DI Yuezhong, et al. Research status of recovery methods of aluminum and its oxide in aluminum ash [J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2019, 39(3):37-41.