

# 赤泥综合利用研究进展\*

廖仕臻, 杨金林, 马少健

(广西大学 资源环境与材料学院, 广西 南宁 530004)

**摘要:**赤泥是生产氧化铝过程中产生的固体废渣,由于工艺原因,赤泥的总量大,而且其元素成分又极其复杂,无法得到有效的利用,导致赤泥占用大量的土地,既浪费了资源,又污染了环境。本文总结了赤泥利用的研究现状,分析了赤泥的应用前景,并提出建议,为相关赤泥的研究提供思路。

**关键词:**赤泥;结构材料;吸附药剂;金属回收

中图分类号:X758 文献标识码:A 文章编号:1001-0076(2019)03-0021-07

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2019.03.004

## Research Progress in the Comprehensive Utilization of Red Mud

LIAO Shizhen, YANG Jinlin, MA Shaojian

(College of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** Red mud is a solid waste generated in the process of producing aluminum oxide. Due to technological reasons, the total amount of red mud is large, and its elemental composition is extremely complex and can not be effectively used. As a result, red mud has to occupy a large amount of land, which is not only waste of resources, but also pollutes the environment. This paper summarizes the research status of the use of red mud, analyzes the application prospects of red mud, and puts forward suggestions for the study of red mud.

**Key words:** red mud; structural material; adsorption agent; metal recycling

我国是铝制造大国,氧化铝和电解铝产量均占世界50%以上,每年产生大宗危废赤泥约1亿t,而我国赤泥综合利用率仅为4%。赤泥是氧化铝生产排放的强碱性固体废弃物,每生产1t氧化铝就要附带产生赤泥1~1.5t,低成本、无害化大宗消纳利用赤泥是亟待解决的世界性难题。赤泥的堆置不但浪费土地资源,由于其高碱性的性质,赤泥的化学成分还会渗入土壤和地下水中,严重污染赤泥堆置场地周边的生态环境<sup>[2]</sup>。国内外赤泥综合利用的研究主要集中在生产建筑、陶瓷、吸附、新型功能材料和回收铁、铝、钛、钠及稀有金属等。赤泥的减量化、

资源化、无害化及全组分利用,不仅能解决上述危废堆存导致的严重环境污染,还可缓解我国铝土矿和铁矿石高度依赖进口的困局,同时可满足生态文明建设与保障资源安全供给的国家重大战略需求。

## 1 赤泥的性质

赤泥为碱性固体废弃物,其颗粒直径一般为0.088~0.25mm,密度2700~2900kg/m<sup>3</sup>,容重800~1000kg/m<sup>3</sup>,熔点1200~1500℃。其pH值的范围为10.29~11.83,属于强碱性土<sup>[3]</sup>。赤泥中主要的矿物为方解石和文石,还含有蛋白石(SiO<sub>2</sub>·

\* 收稿日期:2019-04-03

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1901905,2018YFC1901901)

作者简介:廖仕臻(1994—),男,广西南宁人,在读硕士研究生,从事矿物加工方面研究,E-mail:492300968@qq.com。

通信作者:杨金林(1975—),副教授,博士,主要从事矿物加工及复杂难选矿产资源高效处理方面研究。

$n\text{H}_2\text{O}$ )、三水铝石( $\text{Al}(\text{OH})_3$ )、针铁矿( $\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$ )等矿物,其矿物成分较为复杂<sup>[4]</sup>。由于其金属含量较低,直接利用赤泥回收有价金属如铁和铝等从经济效益来看并不划算。赤泥颗粒非常细,比表面积很大,很适合用来制作吸附剂,国内外很多学者也做了这方面的研究,赤泥作为吸附剂使用虽然效果较好,但工业用量太少。如今能够大批量利用赤泥的方法一般是将赤泥作为结构材料,例如利用赤泥制作路基材料、用于生产水泥和制作免烧砖等,但由于赤泥碱性较强且难以脱碱,作为结构材料在建材领域利用时,容易出现泛霜现象,同时赤泥中的锆石和独居石等还具有放射性,若要直接用于路基等建材会导致辐射超标,降低赤泥辐射又存在成本太高的问题。

根据铝工业生产工艺的不同,会得到不同类型赤泥,如拜耳法赤泥、烧结法赤泥和联合法赤泥。赤泥的主要化学成分为 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 和 $\text{TiO}_2$ 。不同类型的赤泥各组分含量如表1所示<sup>[5]</sup>。

表1 不同类型赤泥的化学成分 /%  
Table 1 Chemical compositions of different types of red mud

Red mud types	Bayer red mud	Red mud by sintering process	Red mud by combined process
$\text{SiO}_2$	3~20	20~23	20.0~20.5
$\text{CaO}$	2~8	46~49	43.7~46.8
$\text{Al}_2\text{O}_3$	10~20	5~7	5.4~7.5
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	30~60	7~10	6.1~7.5
$\text{MgO}$	-	1.2~1.6	-
$\text{Na}_2\text{O}$	2~10	2.0~2.5	2.8~3.0
$\text{K}_2\text{O}$	-	0.2~0.4	0.5~0.7
$\text{TiO}_2$	0.1~10	2.5~3.0	6.1~7.7
Loss of ignition	10~15	6~10	-

## 2 赤泥综合利用

在优质资源日益衰竭的今天,研究利用赤泥可有效缓解资源衰竭的压力,同时从根本上解决因赤泥堆放所引发的环境问题。当前,学者们在赤泥的综合利用方面进行了大量的研究,主要集中在以下三个方面:作为结构材料,用在道路建设和建筑领域中;改性后作为矿物材料,对某些反应催化和对某些污染物降解;分解提炼其中的有价金属等。但由于成本利润问题,很多研究还只停留在实验室阶段,还没有工业化的应用。

### 2.1 作为结构材料

目前消纳赤泥最多的方式是用作结构材料,对赤泥整体进行利用。常见的研究有利用赤泥制备水泥、免烧砖和微晶玻璃等建材,把赤泥作为路基或堤坝的填充材料等。作为结构材料能最大限度地利用赤泥,是大批量消纳赤泥最好的方法。

#### 2.1.1 制备水泥

赤泥中含较多的 $\alpha$ -硅酸二钙,它是水泥中的主要物相之一,而且赤泥有较好的水硬性质,故可作为混凝土的原料,应用于道路和建筑工程中。颜祖兴<sup>[6]</sup>研究结果表明,水泥中掺杂赤泥的量最佳为20%~25%,此时得到的赤泥混凝土其变形性能和普通混凝土基本一致,耐磨性和普通水泥也基本相同。Kong Ing等<sup>[7]</sup>对赤泥酸化,对锯末碱化,然后把处理过的赤泥和锯末混合,得到了8.3MPa~138MPa高抗压强度的复合材料,其强度与水泥(抗压强度9MPa~20.7MPa)相当。黄鹏<sup>[8]</sup>研究了大剂量掺杂赤泥的混凝土制备方法,应用超细水泥、物化激发混合材活性、蒸压石灰水浴和优化集料四种手段,最终配制出强度能够达到120MPa以上,同时赤泥含量高达70%的混凝土,实现了大规模利用赤泥。Wan等<sup>[9]</sup>发现经过热处理的赤泥可改善黄土硅酸盐的凝胶力学性能。热处理的赤泥不但拥有良好的凝胶性能,从而改善材料的力学性能,同时由于赤泥的碱性成分,在早期可以促进钙矾石生成而有利于水泥材料的早期强度。研究表明,当赤泥掺杂量为5%时,材料力学性能改善效果最好。

#### 2.1.2 制备建筑材料

由于赤泥颗粒非常细,粘结度比较低,成型性能较好,加入其他辅料和成孔剂后可以使材料内部形成互相独立的气孔,起到较好的保温作用。由于赤泥拥有细密的结构,添加其他辅料经过烧结后会更容易产生位错等晶格缺陷,增强材料的强度,这也是赤泥能作为一种潜在建材使用的基础。王清涛等<sup>[10]</sup>利用赤泥作为主要原料,添加其他建筑废料后成功制备了一种保温建筑材料,其体积密度为 $0.26\text{g/cm}^3$ ,抗压强度达到7.83MPa;其孔隙率为73.28%,闭气孔率达到90.52%,保温效果良好。Nguyen Hoc Thang等<sup>[11]</sup>利用ASTM C109/C109M99模型,将赤泥和稻壳灰两种废料混合并填充到 $5\text{cm}^3$ 的立方模具中,然后在室温下固化28d,最终得

到抗压强度为 6.8 ~ 15.5 MPa, 在 1 000 °C 下耐热 2 h 的高耐热材料。杨芳<sup>[12]</sup>考察了用赤泥制备免烧砖的最佳原料配比, 可利用 33% ~ 37% 的赤泥作为原料制备抗压强度符合 JC/T 422 - 2007《非烧结垃圾尾矿砖》标准的免烧砖。拜耳法赤泥含碱量较高, 作为建筑耗材容易出现泛碱问题, 刘海锋等<sup>[13]</sup>利用 70% ~ 80% 的赤泥, 通过与其他材料如水玻璃、微硅粉等搅拌挤压压制成型, 最后在 0.8 ~ 1.2 MPa 的压力下养护 2 ~ 4 h, 获得了性能稳定、抗压强度高、不泛碱的免烧砖。Deihimi Nazanin 等<sup>[14]</sup>利用赤泥和废弃玻璃两种固体废物, 配合 NaOH 成功制备了抗压强度高达 45 MPa 的材料, 同时赤泥利用率达到了 60%。Yanbing Z 等<sup>[15]</sup>将赤泥引入到传统制备陶瓷工艺中, 通过在钢渣中加入不同比例的赤泥, 优化陶瓷的性能。在最佳烧结温度 1 140 °C 下制备了 40% 赤泥的陶瓷, 所制备的陶瓷抗弯强度大于 93 MPa。此外, 赤泥还能作为某些合金的复合材料, 增强材料的某些力学特性。如 Siva Karuna G 等<sup>[16]</sup>利用赤泥作为铝 2024T351 的增强相, 在铝合金内融入 3% 的赤泥后材料的抗压强度得到明显提高。张培新等<sup>[17]</sup>利用赤泥为主要原料, 制备了抗压强度高、化学稳定性强的微晶玻璃, 其中钙铁透辉石 (CaFe [Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>]) 为其主晶相, 由于成分中 Ca 含量较高, 其耐碱性比较好, 可以用于化工和冶金产业中的耐碱耐腐蚀材料。杨家宽等<sup>[18]</sup>研究了大比例利用废渣制备玻璃的方法, 综合利用赤泥和灰煤粉成功制备微晶玻璃, 利用赤泥达到 50% 以上, 废渣总量占比达到 90% 以上。当 CaO 的含量为 25% ~ 31%、SiO<sub>2</sub> 的含量为 31% ~ 44% 时, 玻璃的融化温度达到 1 380 °C。通过改性后的赤泥可以起到阻燃作用。宋剑峰等<sup>[19]</sup>利用表面改性赤泥作为协助阻燃剂, 配合膨胀型阻燃剂达到了良好的阻燃效果。在加入改性赤泥后, 阻燃剂的结构更加连续、密度更高, 材料极限氧指数达到 32.2, 达到 V-0 级抗燃等级。

### 2.1.3 作为填充材料

赤泥作为填充材料的利用率是最大的, 但赤泥碱性较高, 还含有放射性元素, 作为基建材料使用时要考虑对周边环境的影响, 在必要的时候要预先对赤泥做降碱降辐射处理, 以达到使用要求。齐建召等<sup>[20]</sup>从尽可能利用废弃原料角度出发, 将 70% ~ 85% 的赤泥, 5% ~ 15% 的石灰和 10% ~ 20% 的粉煤灰用于公路基层材料填充, 所建成的赤泥道路基

层 7 d 抗压强度达到 2 MPa 以上, 28 d 强度达到 3 MPa 以上, 达到高等级公路的国家标准要求。刘晓明等<sup>[21]</sup>利用拜耳法赤泥、煤灰粉和煤矸石作为公路路基的基本材料, 并对路基 7 d 养护后做了无侧限抗压实验, 其抗压强度大于 6 MPa, 经过干湿循环、冻融循环后其抗压强度均满足国家标准, 并具有良好的耐久性。陈蛟龙等<sup>[22]</sup>利用赤泥与其他工业固体废物做膏体填充材料, 赤泥含量接近 50%, 固相占比 70%, 28 d 单轴抗压强度达到 5.49 MPa。材料随着水化反应的进行, 其内部晶体结构由针状逐渐变为棒状, 这一结构转变使材料结构随水化反应的进行而增强。赤泥由于其碱性过高而限制其作为河堤等建筑的结构材料, Panda Ipsita 等<sup>[23]</sup>利用微生物降低赤泥的碱性, 往赤泥中添加乳制品废物等有机废物使微生物附着, 将赤泥从高碱度 (pH = 10.06) 降低到低碱度 (pH = 7.5), 同时经过生物处理后的赤泥的无侧抗压强度增加了 162.1 kPa。因此, 经过微生物处理的赤泥能更好地用于建设河堤与路基。

## 2.2 吸附污染物

### 2.2.1 吸附水中的污染物

赤泥本身具有活性高和比表面积大的特点, 所以可以利用改性后的赤泥作为某些离子的吸附材料, 用以吸附污染物, 焙烧或酸化等方法可增强赤泥对某一种元素的吸附量, 并且可返回重复利用, 最终达到以废治废的目的。鲁桂林等<sup>[24]</sup>使用赤泥制备聚合氯化铝铁 (PAFC) 用以处理废水中的高岭土, PAFC 适合在弱酸到碱性的环境下处理废水, 在废水中, 当高岭土浓度大于 100 mg/L 时, 使用 0.15 ~ 0.17 g/L 的 PAFC 处理废水, 其最佳处理温度为 25 °C。Zhang Yutao 等<sup>[25]</sup>利用焙烧活化后的赤泥吸附水中的 Hg, 研究表明, 在 pH 值 3.5 ~ 6.5 的环境下, 500 °C 下焙烧 4 h 的赤泥对对 100 ng/g 的 Hg 溶液有最大吸附量, 达到 96.7 ng/g。对吸附 Hg 后的赤泥加热后, 可以完全清除赤泥中的 Hg, 吸附剂可以二次使用, 并且吸附效率不会降低。Lakshmi Narayanan S 等<sup>[26]</sup>利用酸化处理后的活性赤泥吸附水体中的 Pb(II), 从 Langmuir 等温线可看出, 改性后的赤泥适合用来吸附 Pb(II), 其每克吸附物的最大吸附量比其他吸附剂要多 27.02 mg。Guo Tengfei<sup>[27]</sup>利用酸活化赤泥使其比表面积增加 10 ~ 28 m<sup>2</sup>/g,

经过酸活化后的赤泥用以吸附溶液中的磷酸盐,其吸附量为 1.92 mg/g。其吸附规律遵循 Langmuir 伪二阶模型。Belviso Claudia 等<sup>[28]</sup>利用赤泥和胶体二氧化硅替代铝源成功制备了具有羊毛球状结构的沸石,由于用作铝源的赤泥含有  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  等磁性混合物,较容易借助外部磁场分离,故所制备的沸石可用于废水吸附。张翅鹏<sup>[29]</sup>等利用赤泥高碱性的特性,对赤泥采用焙烧改性和盐水焙烧联合改性后,加入废水中。该改性赤泥有效提高了废水的 pH 值,同时对  $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$  和  $\text{Ni}^{2+}$  等重金属污染物的吸附能力较未经改性的赤泥有明显提高。

### 2.2.2 吸附气体污染物

赤泥除具有较大比表面积外,还富含  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$  和  $\text{MgO}$  等碱性物质,与某些酸性污染气体如 ( $\text{NO}_2$  和  $\text{SO}_2$  等)反应较为剧烈,故赤泥可用于吸附气体污染物。如 Nath H 等<sup>[30]</sup>研究了赤泥吸附铝工业中产生的氟化物废气的效果,发现在 300 °C 左右下赤泥中的金属组分与  $\text{AlF}_3$ 、 $\text{FeF}_2$ 、 $\text{FeF}_3$  和以  $\text{NaF}$  形式存在的气体氟化物发生了反应。杨国俊等<sup>[31]</sup>利用赤泥的高碱性特点,将其作为脱硫剂使用,以吸附废气中的  $\text{SO}$  和  $\text{SO}_2$  等酸性气体。用吸收塔上的喷淋管喷嘴将赤泥雾化喷出,与烟气充分接触反应。南相莉等<sup>[32]</sup>利用赤泥作为二氧化碳的固化剂,同时利用超声波和机械搅拌设备强化焙烧改性赤泥对低浓度二氧化碳的吸收。当超声波功率为 600 W、反应温度为 25 °C、固液比为 1:6、气体流量为 0.025  $\text{m}^3/\text{h}$ 、搅拌叶轮转速为 150 r/min 时,最大固碳量超过了 71.72 g/kg。

### 2.2.3 改良土壤

由于赤泥含有植物所需的 P、Ca 和 Mg 等元素,可以为农作物的生长提供必要的营养,改良土壤土质。同时赤泥还含有大量的 Fe、Al、Ca 和 Ti 的氧化物,可以用以制备某些重金属元素的吸附剂。通过改性可以让赤泥在吸附土壤重金属的同时改善土壤环境。Wang Yangyang 等<sup>[33]</sup>利用赤泥修复受重金属污染的土地,将 5% 的赤泥加入土壤中后,土壤的 pH 值提高了 0.5,同时 Cd、Pb、Cu 和 Zn 的稳固率分别达到了 67.95%、64.21%、43.73% 和 63.73%,小麦中的 Cd、Pb、Cu 和 Zn 含量分别减少了 24.38%、49.20%、19.42% 和 8.89%,最终小麦增产 24.66%。R. Zhou 等<sup>[34]</sup>研究了赤泥对被重金属污染的土地

中 Cd 和 Pb 的固化效果,加入赤泥后土壤的 pH 值明显提高,添加 5% 的赤泥后,土壤中游离 Cd 和 Pb 分别下降了 90% 和 72%;不同剂量的赤泥对小麦根系生长有不同的影响,小剂量(3%)的赤泥有利于在污染土壤中小麦根系的生长。Luo Huili 等<sup>[35]</sup>用磷酸盐活化赤泥,用于稳固土壤中的镉,在水稻盆栽实验中,往土壤中加入 3% 的改性赤泥,可以使水稻根中镉的含量增加 53.87%,而大米中镉的含量下降 24.17%,实现了对镉元素的控制。

## 2.3 分解提炼赤泥中有价金属

### 2.3.1 提炼铝和铁

赤泥作为氧化铝工业生产的废弃物,由于工艺所限,有很多铝元素和铁元素还残留在赤泥中,一般是以氧化铝和氧化铁等碱金属的形式存在,若不回收直接排放,不仅浪费了铝铁资源,还会因碱性污染了土地。于是很多学者探寻通过合适的方法从赤泥中回收提炼铝和铁。Wang Yanxiu 等<sup>[36]</sup>利用钙化-碳化法从赤泥中回收氧化铝,并且降低赤泥的 pH 值,经过钙化-碳化处理后的赤泥,可以回收 46.5% 的氧化铝,并且产物中  $\text{Na}_2\text{O}$  的含量降至 0.3% 以下,大大降低了赤泥的碱性。拜耳法赤泥的含铁量为 20%~45%,也是一种铁资源,Agrawal Shrey<sup>[37]</sup>使用微波辅助还原法富集赤泥中的铁,添加 8%~12% 还原剂,在 1000 °C 微波下照射 10 min,可以达到 95% 的铁回收率。Sadangi JK<sup>[38]</sup>采用磁化焙烧和磁选相结合的方法成功回收了赤泥中的铁元素。磁化焙烧中赤泥中的针铁矿转化为磁铁矿和金属铁,可以用磁选方法回收。在最佳焙烧温度 1150 °C、焙烧时间 60 min、磁选机磁场磁感应强度为 0.18 T 条件下,获得铁精矿铁回收率为 61.85%,铁含量为 65.93%。Sumedh Gostu 等<sup>[39]</sup>对赤泥经过低温处理,利用  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2$  的混合物对赤泥进行还原处理,将赤泥中的赤铁矿还原成磁铁矿,再用磁选机回收,其最佳还原条件为焙烧温度  $540 \pm 10$  °C,  $\text{CO}$  和  $\text{CO}_2$  分压为  $0.070 \pm 0.001$  atm (bar),焙烧时间 30 min。针对高铁赤泥中含有 50% 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,张颖异等<sup>[40]</sup>先通过直接还原法将铁元素分离,得到的残渣为  $\text{C}_{12}\text{A}_7$ ,再对  $\text{C}_{12}\text{A}_7$  进行氧化铝浸出。当  $\text{C}_{12}\text{A}_7$  的碱度为 3.75 时,铁的回收率达到 90%,回收效果明显。刘万超等<sup>[41]</sup>用焙烧还原方法,在焙烧温度 1300 °C、碳粉与赤泥质量比为 18:100、添加

剂和赤泥质量比为 6 : 100 的条件下焙烧 110 min, 经过磁选回收铁精矿, 回收率达到 81.40%, 所得精矿可作为海绵铁炼钢的原材料。

### 2.3.2 回收赤泥中的稀土元素

根据铝工业工艺的不同, 残留在赤泥中的稀土元素含量也不一样, 钪的氧化物 ( $\text{Sc}_2\text{O}_3$ ) 的含量为 40 ~ 100  $\mu\text{g/g}$  不等, 稀土元素总量为 300 ~ 1 500  $\mu\text{g/g}$  不等。稀土元素主要以类质同像的方式分散在其他矿物的晶胞中。Zhaobo Liu 等<sup>[42]</sup>对赤泥硫化后, 将得到的产物在 750  $^\circ\text{C}$  下高温焙烧 40 min, 可以得到不含  $\text{Fe}^{3+}$  的  $\text{Sc}^{3+}$ , 在焙烧过程中包括  $\text{NaFe}(\text{SO}_4)_2$  和  $\text{NaAl}(\text{SO}_4)_2$  在内的亚硫酸盐会被分解为  $\text{SO}_2$  和  $\text{SO}_3$  等产物, 以作为制作硫酸的原料。Rivera Rodolfo Marin 等<sup>[43]</sup>利用干消法, 经过水浸出后提取赤泥中的稀土元素, 在室温下用 HCl 干燥消化赤泥然后水浸, 在浓度为 6 ~ 8 mg/L 的溶液中回收了 40% 的 Sc。Zhaobo Liu 等<sup>[44]</sup>使用液-液萃取法从拜耳法赤泥中回收 Sc, 在硫酸盐浸出焙烧后的拜耳法赤泥浸出液中, 使用有机磷萃取剂能有效地回收浸出液中的 Sc, 在温度 15  $^\circ\text{C}$ 、 $V(\text{有机溶剂}) : V(\text{水}) = V(10) : V(1)$  的条件下, Sc 的回收率达 97%。在铝工业中, 由于氧化铝含量较高的赤泥在冶炼过程中需要大量的阻燃剂, 大大增加了铝工业生产系统的能耗, 为整个工艺流程增加了成本。Borra 等<sup>[45]</sup>在熔炼之前通过碱焙烧回收赤泥中的氧化铝, 但由于碱焙烧过程中产生了不溶于酸的钙钛矿相, 导致赤泥的稀土元素回收率大幅下降。但对得到的炉渣进行淬火后, 其钙钛矿也能被酸溶出, 解决了稀土元素回收率低的问题。

## 3 结论与建议

赤泥的综合利用与处理已经引起学者们的重视, 前人已经做了大量的研究工作, 但由于赤泥的特殊性质, 在其综合利用方面还存在不少问题。例如, 作为结构材料, 赤泥由于含碱量较高, 作为建材使用时会导致泛霜现象的产生而影响其性能和美观; 赤泥作为吸附剂处理污水, 由于其本身含有重金属离子, 可能会导致赤泥中重金属溶入水体中引起二次污染; 以及回收其中有价金属存在成本高等问题。针对这些问题, 提出如下建议:

(1) 在结构材料中掺杂赤泥的工艺, 要保证成

品原料中有害元素清除干净, 达到国家标准; 保证材料强度达到使用要求; 同时对强碱性的赤泥进行酸化处理, 防止泛霜现象的产生。

(2) 使用赤泥作为吸附剂处理污水时, 应该评估赤泥所含重金属元素对水体的影响。同时可通过焙烧等方式对赤泥进行改性, 增大其比表面积和孔隙率, 以增强其吸附效果。

(3) 赤泥有价金属的回收研究大部分还停留在实验室阶段, 其主要原因是不同工艺甚至不同厂商得到的赤泥组分差异大, 适应性差、实际应用较难。因此, 对于赤泥有价金属回收的研究应更侧重于基础性研究, 例如弄清金属元素的赋存状态, 元素的迁移形式等。

(4) 要以赤泥的减量化、高值化、无害化、全组分利用为目标, 将矿物加工、冶金和材料等多学科深度交叉, 通过基础理论研究—关键共性技术与装备开发—技术集成创新—应用示范的全链条系统研究, 攻克赤泥有价组分协同提取高值利用新技术及装备等世界性难题, 为加快我国铝工业可持续健康发展和支撑生态文明建设提供科技保障。

### 参考文献:

- [1] 袁向红, 许晓路. 炼铝废渣的综合利用试验[J]. 环境污染与防治, 2000(1): 37-39.
- [2] 何伯泉, 周国华, 薛玉兰. 赤泥在环境保护中的应用[J]. 轻金属, 2001(2): 50-55.
- [3] 赖兰萍, 周李蕾, 韩磊, 等. 赤泥综合回收与利用现状及进展[J]. 四川有色金属, 2008(1): 43-48.
- [4] 张彦娜, 潘志华. 不同温度下赤泥的物理化学特征分析[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2005, 19(4): 293-297.
- [5] 南相莉, 张廷安, 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, 9(s1): 459-464.
- [6] 颜祖兴. 水泥赤泥混凝土开发应用研究[J]. 混凝土, 2000(10): 18-20.
- [7] Ing K, Min K K, Oliver B, et al. Synthesis and characterization of red mud and sawdust based geopolymer composites as potential construction material[J]. Materials science forum, 2018, 923: 130-134.
- [8] 黄鹏. 大掺量混合材高强混凝土制备技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- [9] Wan J H, Sun H H, Wang Y Y, et al. Effect of red mud on mechanical properties of loess - containing aluminosilicate based cementitious materials[J]. Materials science forum, 2009, 610-613: 155-160.

- [10] 王清涛,李森,于华芹,等. 利用赤泥制备轻质高强保温装饰一体化建筑材料[J]. 硅酸盐通报,2018,37(4): 274-279.
- [11] Thang N H, Nhung L T, Quyen P V T H, et al. Development of heat resistant geopolymer-based materials from red mud and rice husk ash [C]. American institute of physics conference series, Proceedings of the 2nd international conference on applied sciences (ICAS-2), 2018.
- [12] 杨芳,韩涛,靳秀芝,等. 赤泥粉煤灰制备免烧砖的配方研究[J]. 建材技术与应用,2015(2):1-3.
- [13] 刘海锋,巢启,程峰,等. 一种用赤泥制备的免烧砖: CN201310652096.5[P]. 2014-03-19.
- [14] Deihimi N, Irannajad M, Rezai B. Characterization studies of red mud modification processes as adsorbent for enhancing ferricyanide removal[J]. Journal of environmental management, 2018, 206: 266-275.
- [15] Yanbing Z, Wenhui C, Yong F, et al. Complementation in the composition of steel slag and red mud for preparation of novel ceramics[J]. International journal of minerals, metallurgy, and materials, 2018, 25(9): 1010-1017.
- [16] Siva K G, Gopala S S V, Swami N G. Effect of blast furnace slag and red mud reinforcements on the mechanical properties of aa2024 hybrid composites [J]. Advanced materials research, 2018, 1148: 29-36.
- [17] 张培新,林荣毅,阎加强. 赤泥微晶玻璃的研究[J]. 有色金属,2000,52(4):77-79.
- [18] 杨家宽,张杜杜,肖波,等. 高掺量赤泥-粉煤灰微晶玻璃研究[J]. 玻璃与搪瓷,2004,32(5):9-11.
- [19] 宋剑峰,李曼,梁小良,等. 改性赤泥协同膨胀型阻燃剂阻燃聚乙烯[J]. 化工进展,2018,37(11):297-303.
- [20] 齐建召,杨家宽,王梅,等. 赤泥做道路基层材料的试验研究[J]. 公路交通科技,2005,22(6):30-33.
- [21] 刘晓明,唐彬文,尹海峰. 赤泥-煤矸石基公路路面基层材料的耐久与环境性能[J]. 北京科技大学学报, 2018(4):438-445.
- [22] 陈蛟龙,张娜,李恒,等. 赤泥基似膏体充填材料水化特性研究[J]. 工程科学学报,2017(11):37-43.
- [23] Panda I, Jain S, Das S K, et al. Characterization of red mud as a structural fill and embankment material using bioremediation [J]. International biodeterioration & biodegradation, 2017, 119: 368-376.
- [24] 鲁桂林,于海燕,迟松江,等. 赤泥制备的聚合氯化铝铁处理高岭土废水[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010,31(12):1749-1752.
- [25] Zhang Y, Zhang X, Zhou S, et al. Removal of mercury in waste water using activated red mud[J]. IOP conference series earth and environmental science, 2018, 121: 20-27.
- [26] Narayanan SL, Venkatesan G, Potheher IV. Equilibrium studies on removal of lead (II) ions from aqueous solution by adsorption using modified red mud[J]. International journal of environmental science and technology, 2018, 15(8): 1687-1698.
- [27] Guo T, Yang H, Liu Q, et al. Adsorptive removal of phosphate from aqueous solutions using different types of red mud[J]. Water science and technology, 2017, (2): 570-577.
- [28] Belviso C, Kharchenko A, Agostinelli E, et al. Red mud as aluminium source for the synthesis of magnetic zeolite [J]. Microporous and mesoporous materials, 2018, 270: 24-29.
- [29] 张翅鹏,吴攀,张瑞雪,等. 改性拜耳赤泥淋滤处理矿山酸性废水实验研究[C]. 上海:中国环境科学学会学术年会,2010.
- [30] Nath H, Sahoo A. Red mud and its applicability in fluoride abatement[J]. Materials today: proceedings, 2018, 5(1): 2207-2215.
- [31] 杨国俊,张文帅,李威,等. 赤泥烟气脱硫生产工艺中循环泵入口处滤网的设计[J]. 有色金属,2010,62(3): 152-155.
- [32] 南相莉,李凤华,胡恩柱. 基于超声波机械搅拌耦合作用下赤泥对二氧化碳的固化封存[J]. 环境工程学报, 2018,12(10):263-269.
- [33] Wang Y, Li F, Song J, et al. Stabilization of Cd-, Pb-, Cu- and Zn- contaminated calcareous agricultural soil using red mud: a field experiment[J]. Environmental geochemistry and health, 2018, 40: 2143-2153.
- [34] Zhou R, Wei J, Luo L, et al. Effects of red mud addition on fractions of Cd, Pb and wheat root growth in calcareous soil [J]. Chinese journal of environmental engineering, 2017, 11(4): 2560-2567.
- [35] Luo HL, Zhu Q, Zhou Y, et al. Stabilization of Cd in ore soil using modified red mud materials[J]. Advanced materials research, 2017, 1142: 296-299.
- [36] Wang Y, Zhang T A, Lyu G, et al. Recovery of alkali and alumina from bauxite residue (red mud) and complete reuse of the treated residue [J]. Journal of cleaner production, 2018, 188: 456-465.
- [37] Shrey A, Veeranjanyulu R, Nikhil D. Microwave reduction of red mud for recovery of iron values[J]. Journal of sustainable metallurgy, 2018, 4: 427-436.
- [38] Sadangi J K, Das S P, Tripathy A, et al. Investigation into recovery of iron values from red mud dumps [J]. Sepa-

- ration science and technology, 2018, 53: 1-6.
- [39] Gostu S, Mishra B, Martins GP. Low temperature reduction of hematite in red - mud to magnetite[J]. The Minerals, Metals & Materials Society, 2017, 67-73
- [40] 张颖异,徐洪军,程相利,等. 高铁型铝土矿和高铁赤泥的综合利用[J]. 矿业研究与开发,2015(6):30-35.
- [41] 刘万超,杨家宽,肖波. 拜耳法赤泥中铁的提取及残渣制备建材[J]. 中国有色金属学报,2008,18(1):187-192.
- [42] Liu Z, Li H, Zhao Z. Selective recovery of scandium from sulfating roasting red mud by water leaching[M]// Switzerland: Rare Metal Technology 2017. Springer International Publishing, 2017, 255-264.
- [43] Rivera R M, Ulenaers B, Ounoughene G, et al. Extraction of rare earths from bauxite residue (red mud) by dry digestion followed by water leaching[J]. Minerals engineering, 2018, 119: 82-92.
- [44] Liu Z, Li H, Jing Q, et al. Recovery of scandium from leachate of sulfation - roasted bayer red mud by liquid - liquid extraction[J]. JOM, 2017, 69(7): 1-6.
- [45] 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.

引用格式: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 Shizhen, YANG Jinlin, MA Shaojian, et al. Research progress in the comprehensive utilization of red mud[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2019, 39(3):21-27.

投稿网址:<http://kebh.cbpt.cnki.net>

E-mail:[kcbh@chinajournal.net.cn](mailto:kcbh@chinajournal.net.cn)