

拜耳法赤泥脱碱新工艺及其土壤化研究^{*}

曾华^{1,2}, 吕斐^{1,2}, 胡广艳^{1,2}, 唐鸿鹄^{1,2}, 王丽^{1,2}, 孙伟^{1,2}, 胡岳华^{1,2}

(1. 中南大学 资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 中南大学 战略含钙矿物资源清洁高效利用湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410083)

摘要: 赤泥是氧化铝生产过程中产生的一种强碱性工业固体废弃物。传统的筑坝堆存会对环境造成严重的危害。本文以山东某拜耳法氧化铝厂提供的赤泥作为研究对象, 开发出赤泥快速高效低成本脱碱新工艺, 即利用硫酸+含钙复盐 CAM 对赤泥进行脱碱, 并就脱碱赤泥进行了土壤化研究。结果表明, 赤泥中钠含量从 11.709% 降至 0.302%, 其脱碱率高达 97.42%, 脱碱后的赤泥可直接应用于土壤修复、建筑材料、尾矿充填等工业用途。SEM 分析和盆栽试验结果表明, 赤泥粒度从 1.25 μm 增加到 17.5 μm , 脱碱后团粒体结构变大, 土壤性能优良, 能够满足耐性植物的生长要求。复垦后的赤泥团粒体结构进一步变大, 可加速赤泥的土壤化进程, 为赤泥堆场原位生态修复提供技术支撑。

关键词: 赤泥; 脱碱; 酸浸; 土壤化

中图分类号: X758 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2019)03-0001-07

DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2019.03.001

Study on New Process of Removing Alkali from Red Mud by Bayer Process and Its Soil Formation

ZENG Hua^{1,2}, LYU Fei^{1,2}, HU Guangyan^{1,2}, TANG Honghu^{1,2}, WANG Li^{1,2}, SUN Wei^{1,2*}, HU Yuehua^{1,2}

(1. School of Mineral Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Laboratory of Hunan Province for Clean and Efficient Utilization of Strategic Calcium-containing Mineral Resources, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Red mud is a kind of strong alkaline industrial solid waste produced in alumina production process. Traditional dam construction and storage will cause serious harm to the environment. In this paper, the red mud provided by a Bayer alumina plant in Shandong Province was taken as the research object, and a new process of fast, high efficiency and low cost decalcification of red mud was developed, which was dealcalized by sulfuric acid + calcium-containing compound salt CAM, and the soil transformation of decalcified red mud was studied. The results show that the sodium content in red mud can be reduced from 11.709% to 0.302%, and the alkali removal rate is as high as 97.42%. The red mud after alkali removal can be directly used in soil remediation, building materials, tailings filling and other industrial uses. The results of SEM analysis and pot experiment showed that the aggregate structure of red mud became larger from 1.25 μm to 17.5 μm and the soil properties were excellent after alkali removal, which could meet the growth requirements of tolerant plants. After reclamation, the structure of red mud mass becomes larger, which can accelerate the process of soil formation of red mud and provide technical support for in situ ecological restoration of red mud yard.

* 收稿日期: 2019-04-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1901901); 战略含钙矿物资源清洁高效利用湖南省重点实验室(2018TP1002)

作者简介: 曾华(1995-), 男, 湖北荆州人, 硕士研究生, 主要从事固废的处理和浮选研究, E-mail: zenghua@csu.edu.cn。

通信作者: 孙伟(1973-), 男, 河北邯郸人, 博士, 教授, 主要从事矿物浮选, 选矿药剂设计开发, 选矿废水处理及复杂难选矿物分离研究工作, E-mail: sunmenghu@126.com。

Key words: red mud; dealkalise; acid lead; soil transformation

1 引言

赤泥是氧化铝生产过程中产生的一种强碱性工业固体废弃物。根据铝土矿类型的不同,每生产 1 t 氧化铝会产生 1 ~ 1.5 t 的赤泥^[1]。2015 年全球赤泥总量约 1.6 亿 t^[2]。作为最大的赤泥生产国,我国 2016 年的赤泥总产量约为 8 800 万 t^[2]。截至 2017 年,赤泥全球储量已达 39 亿 t^[3],其中我国已经累计超过 3.5 亿 t^[4]。然而赤泥的综合利用率很低,仅为 5.24%^[5]。

传统的赤泥处置方法是对其进行露天筑坝堆存^[6]。然而赤泥筑坝成本很高,约占氧化铝价格的 2%^[7];而且赤泥的细度和强碱性,会造成严重的空气污染^[8]、土地污染及水资源的污染^[7]。由于赤泥大规模堆存存在潜在的环境风险,国内外已有对赤泥堆场进行原位生态修复的研究。目前,常选用石膏、客土、生物质锯末、膨润土、泥炭^[9]等作为赤泥的改良剂对赤泥堆场进行生态修复。

同时,赤泥中含有大量的 Al、Fe、Ti 等有价值组分,属于潜在的二次固体资源。国内外学者围绕着赤泥的综合利用进行了大量的研究。截至目前,赤泥的综合利用主要包括:(1) 制备建筑材料,如砖^[10]、水泥^[11]、混凝土^[12]、路基材料^[13]、陶瓷^[14]等;(2) 制备吸附材料^[15, 16],用于废水处理等;(3) 提取有价值金属,包括铝^[17]、钛^[18]、铁^[19]、镓^[20]、钪^[21]等。

建筑材料吃渣量大且不会带来附加的环境污染^[22],将赤泥用于建筑材料是其大规模利用的重要途径。但是,为防止出现“泛霜”现象影响产品质量,通常要求制备建筑材料的原料中钠含量低于 0.5%^[23]。然而赤泥中 Na₂O 含量一般为 6% ~ 12%^[24],远高于建筑材料的要求,同时也远高于土壤的标准含盐量(0.3%),无法直接进行土壤化利用。因此,赤泥脱碱是制约其综合利用的关键因素,是其综合利用的必要前提^[23]。

常规的赤泥脱碱方法主要是水浸法、酸浸法、钙离子置换法和湿法碳化法。水浸法可去除赤泥中的游离碱且没有药剂消耗,但需要多次脱碱和长时间浸出^[23],会延长作业时间,影响后续赤泥综合利用的进行^[24]。酸浸法能够显著提高赤泥脱碱率,但是

脱碱过程中酸耗量过大^[24]。且脱碱后赤泥渣酸性强,不利于其筑坝堆存或制备建筑材料等综合利用。钙离子置换法能够显著地去除赤泥中的游离碱和结构碱,然而药耗量较大,且脱碱率一般低于 80%^[23]。湿法碳化法能有效去除赤泥中游离碱和结构碱且无药剂消耗,但浸出对浸出设备的要求较严苛^[24],且浸出过程条件较难控制,操作较繁琐^[23]。

本文提出了一种拜耳法赤泥快速高效低成本脱碱新工艺,使用硫酸 + 含钙复盐 CAM 对拜耳法赤泥进行联合脱碱,然后对脱碱赤泥进行土壤化改良,实现赤泥堆场的原位生态修复。赤泥处理技术路线见图 1。

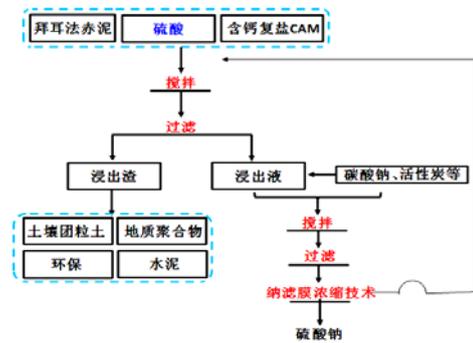


图 1 赤泥处理技术路线图

Fig. 1 Road map of red mud treatment technology

2 试验

2.1 试验原料

试验用赤泥来源于山东某拜耳法氧化铝厂。表 1 显示了赤泥的主要化学组成。由表可见,该赤泥主要由 Al、Fe、Si、Na 和 Ca 等元素组成,其中 Na₂O 含量高达 9.79%,可以看出该赤泥碱含量较高,如果不对该赤泥进行处理,会造成严重的环境污染且无法进行二次资源利用。

表 1 赤泥的主要化学组成

Table 1 Major chemical compositions of red mud

Element	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Na ₂ O	SiO ₂
Content/%	20.57	2.10	23.17	5.77	9.79	15.10

图 2 显示了赤泥的 XRD 分析图谱。从图中可以看出,该赤泥主要的物相组成为三水铝石、锐钛矿、赤铁矿、褐铁矿、方解石和石英等。其中,钠主要赋存于复杂的铝硅酸盐中。

试验过程中使用试剂均为分析纯,试验溶剂均为 RO 去离子水。

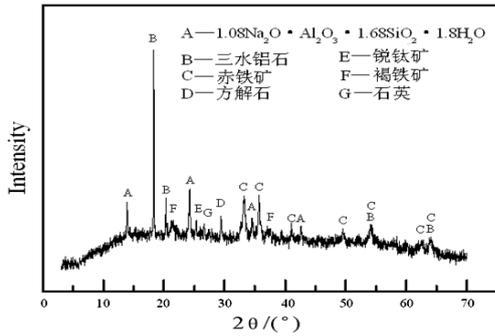


图2 赤泥 XRD 图谱

Fig.2 XRD patterns of red mud

2.2 试验仪器与设备

试验过程中所用的主要仪器设备见表2。

2.3 试验方案

表2 试验所用的主要仪器设备

Table 2 Main equipments in the experiment

设备名称	设备型号	生产厂家
电子天平	JY2002	上海精密仪器有限公司
磁力搅拌器	DF-101B	浙江乐清市乐成电器厂
循环水真空泵	SHZ-DIII	巩义市予华仪器有限责任公司
电感耦合原子发射光谱仪(ICP-OES)	SPECTRO BLUE SOP	德国斯派克分析仪器公司
X射线衍射仪(XRD)	D8 Advance	德国布鲁克公司
X射线荧光分析仪(XRF)	PANalytical Axios	荷兰帕纳科公司
扫描电子显微镜(SEM)	JSM-6490LV	日本电子株式会社
激光粒度分析仪	Mastersizer2000	英国马尔文

2.3.2 脱碱赤泥的土壤化研究

盆栽试验在四组不同基质中进行,第一组为未脱碱赤泥,第二组为硫酸脱碱赤泥,第三组为CAM改良赤泥,第四组为硫酸+2%CAM联合脱碱赤泥。盆栽植物选取高耐性的黑麦草,播种深度2cm左右,播种50颗种子后覆土压实,并浇水至最大持水率的60%~70%,20d后统计并计算发芽率。播种50d后,割取地表以上整株植株,洗净,晾干,随机取10株测量平均株高和整株植株平均湿重。然后将这10株放入烘箱,105℃下烘干,测量整株植株平均干重。同时对基质基本性能进行了相关测试。采用环刀法测定基质容重;采用DDS-307a型电导率仪测定基质电导率;采用PHS-25型酸度仪测定基质pH值;采用比重瓶法测定基质密度。

3 结果与讨论

3.1 确定酸的种类

图3显示了不同种类、浓度的酸对赤泥脱碱率

2.3.1 脱碱试验

按合适的液固比在赤泥中加入不同用量、种类的酸,在磁力搅拌器上进行酸浸,浸出时间为10~30min。试验结束后,将赤泥泥浆过滤分别得到浸出渣和浸出液。浸出渣烘干、消解、定容到250mL容量瓶中,采用电感耦合原子发射光谱仪测定钠离子的含量。按照公式(1)来计算赤泥的脱碱率:

$$W = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \quad (1)$$

式中:W为脱碱率,% ;C₀为赤泥中原有钠离子的含量,% ;C₁为脱碱后赤泥中钠离子的含量,%。对浸出渣和浸出液进行XRF全元素分析以分析赤泥的脱碱效果,利用扫描电镜观察脱碱前后赤泥的微观结构变化。

的影响。可以看出,赤泥脱碱率随酸浓度的增加而逐渐升高,且硫酸的脱碱效果最好,其脱碱率可达91.06%,较相同浓度的盐酸、磷酸、草酸相比,脱碱率分别高出32.44%、69.55%、52.63%。同时硫酸的来源广,价格低廉,故选用硫酸进行赤泥脱碱。

3.2 方案对比

3.2.1 试验对比

直接酸浸脱碱过程,赤泥中硅也会部分浸出,形成硅胶等物质,严重影响赤泥的过滤性能。本文通过酸浸过程添加含钙物质CAM,捕获生成的微细粒硅胶,生成沉淀,从而改善赤泥酸浸的过滤性能。设计两组试验方案:(1)使用硫酸对赤泥进行脱碱试验;(2)使用硫酸+2%CAM对赤泥进行联合脱碱试验。图4显示了两种方案对赤泥脱碱率的影响及CAM用量与过滤性能的关系。

从图4a可以看出,当硫酸用量较少时,两组的脱碱率相近。当硫酸用量大于11.04%时,第二组的脱碱率略高于第一组,可能原因是,游离碱及非晶态的

铝硅酸钠反应已全部被脱除,而过量的硫酸会破坏赤泥结构碱的结构, Ca^{2+} 置换出 Na^+ 而导致脱碱率偏高^[25]。可以确定 CAM 的加入不会对赤泥脱碱产生负面影响。从图 4b 可以看出,随着 CAM 用量从 1% 增加至 4.5%, 过滤时间从 35 min 缩短至 0.2 min, 过滤速度提升了约 70 倍, 过滤性能大大改善。

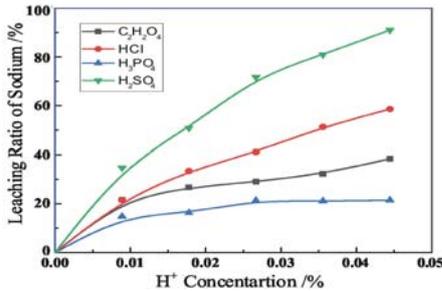
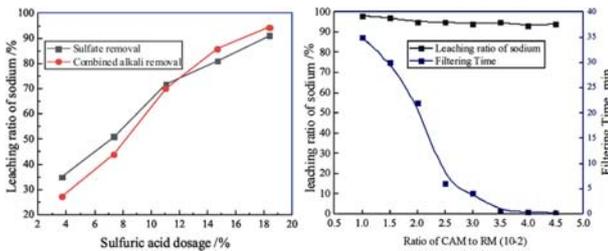


图 3 酸对赤泥脱碱率的影响

Fig. 3 Effect of acid on dealkalization rate of sodium of red mud



(a) 硫酸用量对赤泥脱碱率的影响;
(b) 过滤性能与 CAM 添加量关系

图 4 两种脱碱方案效果对比

(a) Effect of sulfuric acid dosage on alkali removal rate of red mud;
(b) Relationship between filtration performance and CAM addition

Fig. 4 Comparison of effect between two dealkali schemes

3.2.2 粒度分析结果

利用 Mastersizer2000 型激光衍射粒度分析, 测定了原赤泥、硫酸脱碱赤泥和联合脱碱赤泥的粒度分布, 粒度测定结果见表 3。

可以看出, 赤泥脱碱前后粒级发生了变化。原赤泥的粒度主要集中在 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$, 其中 $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 占比最多为 49.53%。硫酸脱碱赤泥的粒

表 3 原赤泥、硫酸脱碱赤泥和联合脱碱赤泥的粒度分布
Table 3 Particle size distribution of original red mud, sulfuric acid decalcified dealkalized red mud, combined dealkali red mud

Particle size / μm	<0.01	0.01 ~ 0.1	0.1 ~ 1	1 ~ 10	10 ~ 100	100 ~ 1000
Original red mud/%	0	11.02	49.53	19.97	17.66	1.79
Decalcified dealkalized red mud/%	0	3.51	14.54	11.34	37.12	33.49
Combined dealkali red mud/%	0	0	0	10.47	55.37	33.80

度主要集中在 $10 \sim 1000 \mu\text{m}$ 之间, 其中 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 占比最多为 37.12%。联合脱碱赤泥的粒度主要集中在 $10 \sim 1000 \mu\text{m}$, 其中 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 占比最多为 55.73%。图 5 显示了原赤泥、硫酸脱碱赤泥和联合脱碱赤泥的粒度分布曲线图。可以看出, 硫酸脱碱赤泥的粒级粗于原赤泥, 说明硫酸脱碱可促进赤泥颗粒间的团聚。联合脱碱赤泥的粒级粗于硫酸脱碱赤泥, 说明联合脱碱能进一步促进颗粒间的团聚。

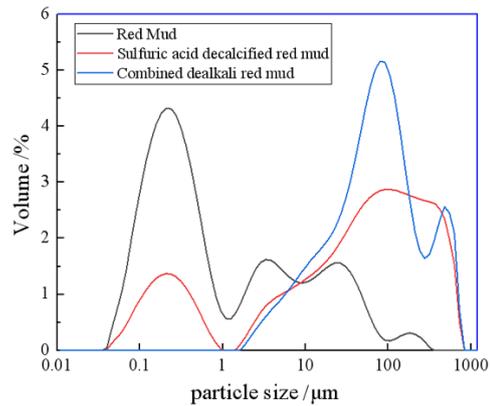


图 5 赤泥粒度分布曲线

Fig. 5 Curve of particle size distribution of red mud

3.3 脱碱效果分析

对原赤泥与联合脱碱赤泥进行了 XRF 全元素分析。表 4 显示了脱碱前后赤泥的化学成分, 从图

表 4 脱碱前后赤泥化学成分

/%

Table 4 Chemical composition of red mud before and after dealkalization

Element	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca
Red Mud	36.956	11.709	0.096	11.025	8.143	0.095	0.259	0.083	1.332
Dealkalized red mud	37.58	0.302	0.085	12.22	6.691	0.126	0.126	0.048	0.829
Element	Ti	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Ga	Sr	
Red Mud	4.398	0.078	0.064	25.483		0.008			
Dealkalized Red mud	5.525	0.08	0.086	33.828	0.024	0.009	0.006	0.012	

中可以看出联合浸出脱碱效果良好,赤泥的钠残留量从 11.709% 降至 0.302%,脱碱率高达 97.42%。浸出液的 XRF 全元素分析结果见表 5。可以看出,硫酸脱碱浸出液中还存在大量的 Al、Si、Mg 等元素,而联

合脱碱浸出液成分简单,浸出液中的 Al、Si、Mg 等元素含量接近于 0。说明 CAM 的加入可抑制 Al、Si、Mg 等元素的溶出,简化浸出液的后续处理,同时也进一步说明 CAM 的加入不会对赤泥脱碱产生负面影响。

表 5 浸出液化学成分
Table 5 The chemical composition of leaching solution /%

Element	Al	B	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	K	Li	V
1	163.1	0.1	45.9	0.02	0.02	0.08	0.04	7.7	0.02	0.02
2	0.06	0.03	43.3	0.004	0.006	0.01	0.007	10.8	0.01	0.007
Element	Mg	Mn	Na	Nd	Ni	P	Pb	S	Si	Y
1	6.0	0.5	1413	0.1	0.04	0.1	0.02	1290	66.4	0.1
2	0.5	0.03	1383	0.003	0.01	0.004	0.003	997.0	3.2	0.001

1. Sulfuric acid leaching solution; 2. Combined dealkali leaching solution.

3.4 SEM 分析结果

通过扫描电子显微镜对原赤泥、硫酸脱碱赤泥和联合脱碱赤泥进行了形貌分析,在不同倍数(5000 倍、10000 倍)下拍摄的扫描电镜图如图 6 所示。可以看出,原赤泥的颗粒粒度细小,颗粒粒度约为 1.5 μm。硫酸脱碱赤泥的颗粒粒度较原赤泥稍大一些,颗粒粒度约 5 μm。而联合脱碱赤泥的颗粒粒度可达 17.5 μm,明显大于原赤泥和硫酸脱碱赤泥,说明联合浸出可促进赤泥颗粒的团聚,有利于进行后续的土壤修复、建筑材料等二次资源利用。

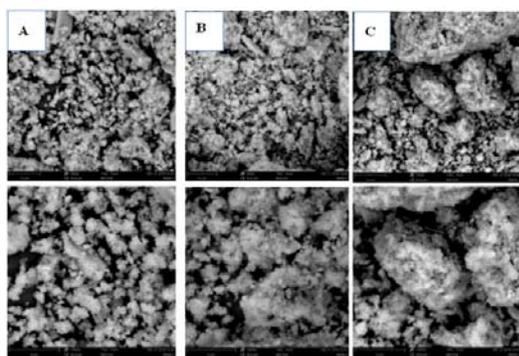


图 6 酸浸对赤泥微观结构的影响
(A:原赤泥;B:硫酸脱碱赤泥;C:联合脱碱赤泥)
上:5000 倍;下:10000 倍

Fig.6 Effect of acid leaching on microstructure of red mud
(A: original red mud; B: sulfuric acid dealkalinized red mud;
C: combined dealkalinized red mud)
Upper: 5000 times; lower: 10000 times

3.5 脱碱赤泥土壤化试验

3.5.1 试验结果分析

表 6 显示了复垦后四组基质的基本性能。第一组的原赤泥 pH 值为 10.84,第三组的 CAM 改良赤泥

pH 值为 10.34,两者都达到第二类一般工业固体废弃物的 pH 标准(9 < pH < 12.5)^[26]。而第二组的硫酸脱碱赤泥与第四组的联合脱碱赤泥 pH 值降至 6~7,满足植物生长的基本要求。密度和容重可反映基质的孔隙度。通过对比比较,第四组的密度和容重小于第二组和第三组,说明第四组的基质疏松,孔隙多,结构性好,有利于黑麦草的生长。基质电导率(EC)可反映基质中离子含量的高低,电导率越高,说明基质中可溶盐含量越高。四组基质中,第四组的电导率最低,说明第四组中可溶盐含量最低,有利于黑麦草的生长。可以看出,联合脱碱赤泥土壤化性能优良。

表 6 基质的基本性能
Table 6 Basic properties of matrix

Properties	Red mud	Sulfuric acid dealkali red mud	CAM improved red mud	Combined dealkali red mud
pH 值	10.84	7.31	10.34	6.79
EC /(ms · cm ⁻¹)	3.52	5.07	3.58	3.40
Density /(g · cm ⁻³)	2.917	3.117	3.573	3.105
Bulk density /(g · cm ⁻³)	1.26	1.20	1.58	1.13

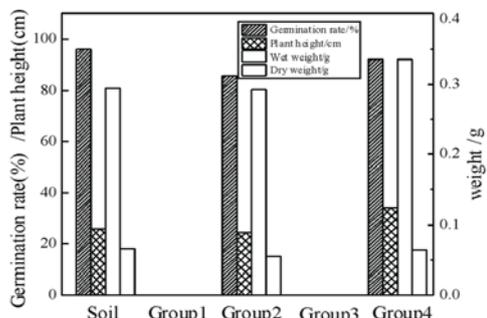


图 7 黑麦草的基本性能
Fig.7 Basic properties of ryegrass

图 7 显示了土壤与四组基质种植的黑麦草的基本性能,其中土壤种植的黑麦草作为参照。第一组未脱碱赤泥和第三组 CAM 改良赤泥不适应黑麦草的生长,各项数据均记为零。第二组硫酸脱碱赤泥的发芽率达 86%,第四组联合脱碱赤泥的发芽率提高到 92%,两组的发芽率都满足植物种植的基本要求。土壤种植的黑麦草,平均株高为 25.97 cm,平均湿重为 0.2936 g,平均干重为 0.0664 g,与第二组相比,平均株高高 6.35%,平均湿重高 0.24%,平均干重高 16.7%;与第四组相比,植株平均株高低 31.03%,平均湿重低 13.96%,平均干重高 3.76%。可见,联合浸出赤泥更有利于黑麦草的生长。

3.5.2 SEM 分析结果

通过扫描电子显微镜对第一组原赤泥、第二组硫酸脱碱赤泥和第四组联合脱碱赤泥进行了形貌分析,在不同倍率(1 000 倍、5 000 倍、10 000 倍)下拍摄的扫描电镜图如图 8 所示。从图中可以看出,第四组的颗粒粒度大于第一组和第二组。说明复垦后的土壤结构进一步变大,加速赤泥的土壤化进程,为赤泥堆场原位修复提供了可能。

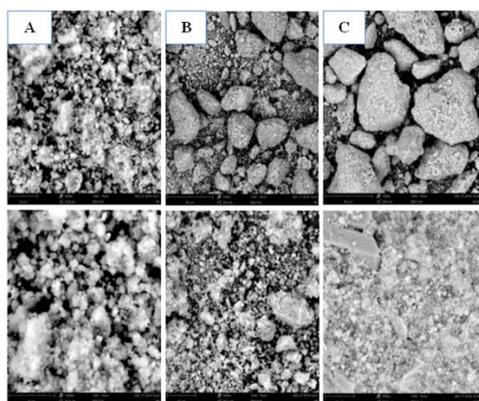


图 8 复垦对赤泥微观结构的影响

(A:原赤泥;B:硫酸脱碱;C:联合脱碱)

A 上:5000 倍;A 下:10000 倍;B,C 上:1000 倍;
B,C 下:5000 倍

Fig. 8 Effects of reclamation on the microstructure of red mud (A: red mud; B: sulfuric acid alkali removal; C: combined alkali removal)

A upper: 5000 times; A lower: 10000 times;

B, C upper: 1000 times; B, C lower: 5000 times

4 结论

传统的赤泥脱碱方法包括水浸法、酸浸法、钙离子置换法和湿法碳化法等。水浸法虽然没有药剂消

耗,但是处理时间长。酸浸法能有效的脱碱,但是酸用量过大;钙离子置换法能有效脱碱,但是药剂耗量大且浸出率不是很高;湿法碳化法不需要添加额外药剂且脱碱率高,但是对设备要求较高且反应过程较难控制。含钙复盐 CAM 作为常规的赤泥改良剂,能够有效的降低赤泥的 pH 值,提高土壤的通气 and 透水能力。然而 CAM 只能将赤泥的 pH 值降至 9 左右。而植被生长环境的 pH 值基本在 6~8,一般的植物无法生存。而且 CAM 的作用周期一般很长。本文中介绍的拜耳法赤泥深度脱碱新工艺有如下优点:(1)赤泥脱碱率高,可达 95% 以上;(2)作用周期短,浸出液成分简单,不易产生二次污染;(3)浸出液过滤快,容易实现工业应用;(4)脱碱渣的土壤化性能优良,为赤泥堆场原位生态修复提供了技术支撑。

参考文献:

- [1] Agrawal A, Sahu K K, Pandey B D. Solid waste management in non-ferrous industries in India[J]. Resources, conservation and recycling. 2004, 42(2): 99-120.
- [2] Mukiza E, Zhang L, Liu X, et al. Utilization of red mud in road base and subgrade materials: A review [J]. Resources, conservation and recycling. 2018, 141: 187-199.
- [3] Carneiro J, Tobaldi D M, Hajjaji W, et al. Red mud as a substitute coloring agent for the hematite pigment [J]. Ceramics international, 2018, 44(4): 4211-4219.
- [4] Chen X, Guo Y, Ding S, et al. Utilization of red mud in geopolymer-based pervious concrete with function of adsorption of heavy metal ions [J]. Journal of cleaner production, 2019, 207: 789-800.
- [5] 张以河,王新珂,吕凤柱,等. 赤泥脱碱及功能新材料研究进展 [J]. 环境工程学报, 2016, 10(7): 3383-3390.
- [6] Paramguru R K, Rath P C, Misra V N. Trends in Red Utilization - a review [J]. Mineral processing and extractive metallurgy review, 2004, 26(1): 1-29.
- [7] Liu X, Zhang N. Utilization of red mud in cement production: a review [J]. Waste management & research, 2011, 29(10): 1053-1063.
- [8] Liu D, Wu C. Stockpiling and comprehensive utilization of red mud research progress [J]. Materials, 2012, 5(7): 1232-1246.
- [9] 段璐淳. 赤泥植物修复及脱碱初步研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [10] Kim M, Kim Y, Lee Y, et al. Preparation of high porosity bricks by utilizing red mud and mine tailing [J]. Journal of cleaner production. 2019, 207: 490-497.
- [11] Dadoo - Arhin D, Nuamah R A, Agyei - Tuffour B, et

- al. Awaso bauxite red mud – cement based composites: characterisation for pavement applications[J]. Case studies in construction materials, 2017, 7: 45 – 55.
- [12] Nikbin I M, Aliaghazadeh M, Charkhtab S, et al. Environmental impacts and mechanical properties of lightweight concrete containing bauxite residue (red mud)[J]. Journal of cleaner production, 2018, 172: 2683 – 2694.
- [13] Zhang Y, Zhang H, Li H, et al. Performance enhancement of porous asphalt pavement using red mud as alternative filler[J]. Construction and building materials, 2018, 160: 707 – 713.
- [14] Wagh A S, Douse V E. Silicate bonded unsintered ceramics of Bayer process waste[J]. Journal of materials research, 1991, 6(5): 1094 – 1102.
- [15] Pulford I D, Hargreaves J S, Durisova J, et al. Carbonised red mud – a new water treatment product made from a waste material[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 100: 59 – 64.
- [16] Ribeiro D V, Labrincha J A, Morelli M R. Potential use of natural red mud as pozzolan for Portland cement[J]. Materials Research, 2011, 14(1): 60 – 66.
- [17] 杨文. 从赤泥中回收铁和氧化铝的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [18] 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.
- [19] 顾汉念, 郭腾飞, 马时成, 等. 赤泥中铁的提取与回收利用研究进展[J]. 化工进展, 2018, 37(9): 3599 – 3608.
- [20] Xue B, Wei B, Ruan L, et al. The influencing factor study on the extraction of gallium from red mud[J]. Hydrometallurgy, 2019, 186: 91 – 97.
- [21] Zhou K, Teng C, Zhang X, et al. Enhanced selective leaching of scandium from red mud[J]. Hydrometallurgy, 2018, 182: 57 – 63.
- [22] 魏红姗, 马小娥, 管学茂, 等. 赤泥在建筑材料中的应用研究[J]. 轻金属, 2018(9): 26 – 29.
- [23] 李望, 朱晓波. 赤泥草酸脱碱实验研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(4): 1283 – 1286.
- [24] 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, 33(9): 2254 – 2257.
- [25] Power G, Gräfe M, Klüber C. Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices[J]. Hydrometallurgy, 2011, 108(1/2): 33 – 45.
- [26] 李涛. 赤泥堆场生态修复技术评价体系的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2013.

引用格式: 曾华, 吕斐, 胡广艳, 等. 拜耳法赤泥脱碱新工艺及其土壤化研究[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(3): 1 – 7.

ZENG Hua, LYU Fei, HU Guangyan, et al. 1. Study on new process of removing alkali from red mud by bayer process and its soil formation[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2019, 39(3): 1 – 7.