

铝工业大宗固废赤泥资源化利用现状研究

王 壮^{1,2}, 房 辉^{3,4}, 郭丰佳^{1,2}

(1. 山东南山铝业股份有限公司 国家铝合金压力加工工程技术研究中心, 山东 龙口 265713;

2. 山东南山铝业股份有限公司 有色金属产业研究院, 山东 龙口 265713;

3. 中南大学 冶金与环境学院, 湖南 长沙 410083; 4. 龙口东海氧化铝有限公司, 山东 龙口 265713)

[摘 要] 赤泥是氧化铝生产过程中产生的强碱性工业固废,其长期堆存不仅占用大量土地,还会造成土壤破坏、水质降低、空气污染等环境安全隐患,赤泥规模化消纳成为急需解决的问题。本文介绍了赤泥的物化性质,总结了赤泥在有价金属提取、建筑材料、环境治理材料、土壤化原位修复等方面的资源化利用。重点内容包括:赤泥中铁、铝及稀有金属的回收技术;赤泥在水泥、砖制品、微晶玻璃、陶瓷、新型功能材料、路基材料及矿山充填材料等建筑领域的应用;赤泥在废水处理、废气净化、污染土壤修复、化肥载体等环境治理方面的潜力以及赤泥堆场土壤改良的技术路径。最后,对赤泥资源化利用的未来发展趋势进行了展望。

[关键词] 赤泥; 有价金属提取; 建筑材料; 环境治理; 土壤化原位修复; 综合利用

[中图分类号] X758; TF821

[文献标志码] A

[文章编号] 2097-2423(2025)06-0013-10

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.06.003

0 引言

赤泥是从铝土矿提取氧化铝过程中产生的工业强碱性固体废弃物,因含有较多的 Fe_2O_3 呈红褐色而得名,其处理是全世界共同面临的一道难题。基于不同企业使用的铝土矿来源和品位、提炼方法和生产技术水平的差异,每生产1 t氧化铝产生1.0~1.8 t赤泥。据统计,2024年我国赤泥产生量达到1.15亿t,赤泥堆积量累计达到15亿t。赤泥颗粒粒径细、碱性强、养分贫乏、盐分高并含有相当数量的有毒有害元素和放射性元素^[1]。目前,国内主要采用露天筑坝和堆存的方式处理,这种方式不仅占用大量可耕用土地,破坏土壤中的微生物,使土壤碱

化,造成周边水土流失严重,危害周围的生态平衡,长期易渗透污染地下水,而且赤泥形成的粉尘随风飞扬,污染空气,在暴风雨等恶劣天气下,可能存在赤泥溃坝隐患,给附近的居民和动植物生存环境带来严重安全威胁,恶化生态环境;此外,赤泥堆场建设和维护费用耗费较高。随着赤泥堆积量的日益增加,政府危废政策的颁布以及人们环保意识的不断提高,赤泥的处理问题已经迫在眉睫。

2024年,我国赤泥综合利用量全年达1380万t,环比增长31.4%,综合利用量达到空前之最,利用率创新高,为12%(图1),我国在赤泥利用方面已经走在国际前列。根据《赤泥综合利用行动方案》要求,到2027年,我国新增赤泥综合利用率达到15%,到2030年,我国新增赤泥综合利用率达到25%。目前,我国已基本实现赤泥在元素提取、胶凝材料、粉体材料、路用材料、建陶材料等领域低成本、大规模消纳的应用(图2)。

本文对赤泥物化性质和综合利用现状进行总结梳理,综述了近年来赤泥在有价金属提取、建筑材料、环境治理、土壤修复等方面的研究进展,对比分析了各工艺从赤泥中提取金属的技术指标,介绍了赤泥制备建筑产品的性能及掺量,同时对赤泥未来利用提出了展望,以期对赤泥综合利用多元化及绿色健康发展提供借鉴。

[收稿日期] 2025-06-24

[基金项目] 中国工程科技发展战略山东研究院项目(202301SDZD03)。

[作者简介] 王壮(1993—),男,山东菏泽人,中级工程师,硕士,研究方向为有色金属冶金。

[引用格式] 王壮,房辉,郭丰佳. 铝工业大宗固废赤泥资源化利用现状研究[J]. 绿色矿冶,2025,41(6):13-22.

WANG Zhuang, FANG Hui, GUO Fengjia. Research status of bulk solid waste red mud resource utilization in aluminum industry[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025, 41(6): 13-22.

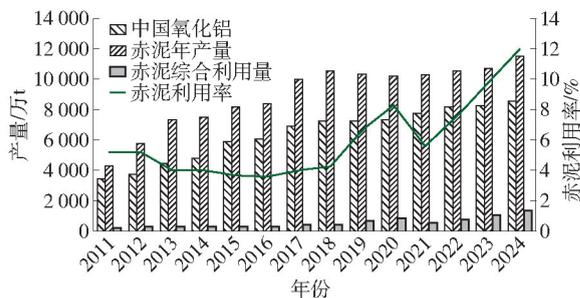


图1 2011—2024年中国氧化铝产量及赤泥产生量和利用量^[1]

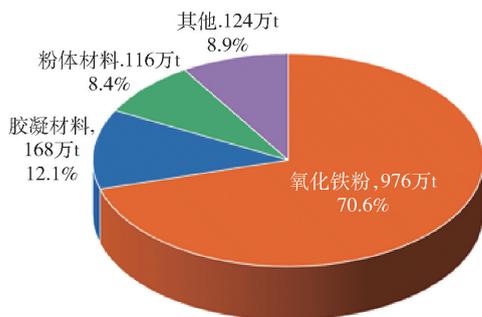


图2 2024年我国赤泥综合利用分布情况

表1 赤泥的物理性质

参数	熔点/℃	粒径/mm	比重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	内比表面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	孔隙比	液性指数	塑性指数
数值	1 200 ~ 1 250	0.005 ~ 0.075	2.70 ~ 2.98	64 ~ 187	2.45 ~ 2.95	0.92 ~ 3.37	17 ~ 30

表2 不同铝土矿产地赤泥主要化学成分^[2]

产地	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Na_2O	CaO	TiO_2	%
几内亚	9 ~ 16	20 ~ 24	30 ~ 40	5 ~ 10	1 ~ 7	4 ~ 18	
澳大利亚	14 ~ 23	17 ~ 24	35 ~ 37	1 ~ 10	<2	3 ~ 7	
印尼	18 ~ 21	22 ~ 24	36 ~ 50	7 ~ 8	<3	2 ~ 3	
中国(除广西)	14 ~ 21	18 ~ 25	4 ~ 10	5 ~ 10	20 ~ 26	4 ~ 10	
中国广西	8 ~ 12	15 ~ 20	30 ~ 35	3 ~ 6	15 ~ 20	5 ~ 7	

2 赤泥中提取有价金属

2.1 赤泥中回收铁

我国是全球最大的铝土矿进口国, 依赖度达到65%以上。进口铝土矿具有高铝、高铁、低硅的特点, 赤泥含有丰富的铁、铝资源, 其铁含量超过30%, 具有非常可观的提取价值, 可以减轻我国对铁矿石的依赖度。目前, 已报道的赤泥提铁方法有直接磁选法、焙烧还原-磁选法、酸浸法和氢等离子还原法等。

2.1.1 直接磁选法

直接磁选法是采用高梯度磁选设备, 在赤泥入库前直接对赤泥中磁铁矿和部分弱磁性赤铁矿进行

1 赤泥物化性质

赤泥外观大多呈红褐色, 这和氧化铁的含量有关, 其物理性质^[2]见表1。由表1可知, 赤泥熔点高, 粒度较细, 具有较大的内比表面积、多孔结构和较好的塑性。赤泥的化学成分及矿物组成较为复杂, 存在较大的差异, 但不同来源的赤泥主要成分基本相同, 分别为 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 Na_2O 、 CaO 、 TiO 等, 如表2所示^[2], 同时, 赤泥还含有少量或微量的稀有金属元素(Ga、V)、重金属元素(As、Cr、Cd、Hg、Pb)、放射性元素(Ra、Th、U)以及稀土元素(Sc、Y)等。

铝土矿经过预脱硅和高温高压强碱溶出过程, 形成的主要物相为钠硅渣、水化石榴石、石英、赤铁矿或针铁矿、钛酸钙等, 同时赤泥矿物中会夹带苛性碱、铝酸钠, 造成氧化铝生产系统中钠和铝的损失。赤泥中的碱性物质分为可溶性碱和化学结合碱, pH值为10~12, 化学结合碱多存在于赤泥难溶固相中, 与可溶性碱相比脱除难度大。

物理磁选以回收铁精矿的方法。2011年中铝广西分公司采用脉动高梯度两级磁选技术, 投产了220万t/a赤泥提铁的生产线, 先后使用中等强度磁选机和高强度磁选设备进行磁选提铁, 得到铁精矿的铁品位为55%, 铁回收率约为22%。周艳飞^[3]选用疏水絮凝-磁种磁化法提取赤泥中的铁, 将赤泥中弱磁性、粒度细的铁矿物凝聚成团, 形成磁性强、颗粒大的含铁矿, 在1.65 T和0.8 T的磁选条件下, 获得铁品位为50.62%的精矿, 铁回收率达到45.97%。该法工艺简单, 易操作, 投资少, 但存在铁选出率低, 铁精粉铁品位不高、杂质较多的缺点, 直接使用局限性较大。

2.1.2 焙烧还原-磁选法

焙烧还原-磁选法是将赤泥中的弱磁性含铁矿物还原成强磁性磁铁矿或金属铁,再通过磁选设备实现铁、铝分离富集的方法,其主要工艺流程如图3所示。GAO等^[4]以石墨为还原剂处理拜耳法赤泥,在焙烧温度1200℃、焙烧时间90min的条件下进行焙烧,再经过磁选,获得铁精矿的铁品位达到55.03%,铁回收率为91.02%。LIU等^[5]采用CO还原赤泥中的铁矿物,在焙烧温度540℃、反应时间15min、CO气流量为0.5L/min的条件下进行焙烧,再经过磁场强度0.11T磁选,获得铁品位为56.41%的铁精矿,铁的回收率达88.45%。目前,山东魏桥集团已采用焙烧还原-磁化法建成10万t/a产能的赤泥提铁项目。该法工艺简单、投资少,并且铁精矿铁品位和回收率高,主要缺点是能耗高、运行成本高。

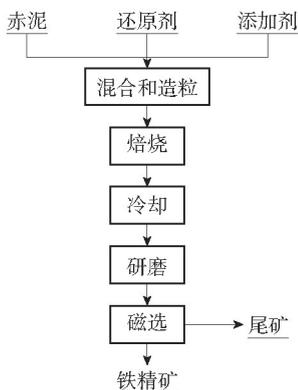


图3 焙烧还原-磁选法工艺流程

2.1.3 酸浸法

酸浸法是用无机酸处理赤泥,然后过滤得到含铝和铁的浸出液,接着用碱调整pH值使铝、铁共沉淀并过滤,进一步采用氢氧化钠处理共沉淀物,使铝沉淀溶解为铝酸钠溶液,经过滤使铝和铁分离,其主要工艺流程如图4所示。PEPPER等^[6]采用酸浸法对比分析了不同酸对高铁赤泥中元素浸出率的影响,研究表明:采用盐酸和磷酸浸出,赤泥中Fe和Ti

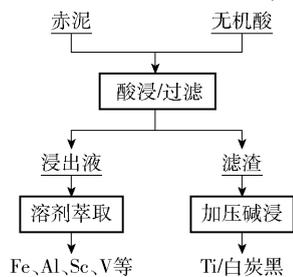


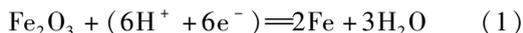
图4 酸浸法提铁、铝等金属工艺流程

的回收率分别达到76%~78%和23%~24%,而且磷酸处理赤泥可实现50%Al和49%Si的高回收率。ZHANG等^[7]采用盐酸浸出广西赤泥,然后选用煤油、甲基三辛基氯化铵和仲辛醇的混合液作为提取剂,回收酸浸液中的FeCl₃,再使用磷酸对有机溶液中的FeCl₃进行二次回收,最终Fe₂O₃回收率达到95%以上。该方法可实现多金属同时浸出,且浸出率高、能耗低;缺点是耗酸量大,多金属离子分离难,工艺流程长且易受产品市场限制。综合考虑,该方法具有较高的工业可行性。

此外,酸浸得到的铁盐溶液还可以通过净化获得纯净的亚铁盐溶液,将其送氧化铁颜料生产工序,控制不同工艺条件可制得黄、红、黑、棕等无机化工颜料;若将纯净的亚铁盐送电池级磷酸铁生产工序,在氧化剂作用下以磷酸或磷酸盐为沉淀剂,通过控制工艺条件可获得电池级无水磷酸铁产品。

2.1.4 氢等离子体还原法

氢等离子体还原法是利用热力学中Fe₂O₃不如赤泥熔体中其他氧化物稳定的原理,使其被等离子体还原,形成液态铁,并基于密度差异,实现铁和渣的分离。Matic Jovičević-Klug等^[8]利用氢等离子体法将赤泥中的氧化铁转化为单质铁,研究发现:经过1min还原后主要形成Fe_{2.5}Ti_{0.5}O₄相;随着时间增加,进一步形成Al₂FeO₄相,不经过Fe₃O₄和FeO相的阶段(图5),其反应原理如式(1)所示;反应10min后,从15g赤泥(含铁量4.17g)中可提取2.6g金属铁,金属铁转化率为62.4%;反应5min后,pH值由初始的10.5降到9.0,反应15min后降到7.5。该法工艺简单,效率高,还原产物清洁,铁纯度高,碳排放少,具有较好的应用前景和较高的工业可行性。



2.2 赤泥中回收铝

赤泥中氧化铝含量一般在8%~27%,回收方法包括酸法和碱法。酸法与前述酸浸法工艺相近,此处不再展开赘述;碱法主要有碱-石灰烧结法、亚熔融盐法、钙化-碳化法等。

2.2.1 碱-石灰烧结法

碱-石灰烧结法是在赤泥中添加适量的石灰和纯碱,经过烧结和溶出过程回收赤泥中的铝,然后残渣可通过磁选获得铁精矿,其主要化学反应如式(2)~(11)^[9]。李军旗等^[10]采用石灰-纯碱烧结法处理拜耳法赤泥,在温度1030℃、烧结时间40min、碱比为1.96、钙硅比2.40的条件下,氧化铝溶出率

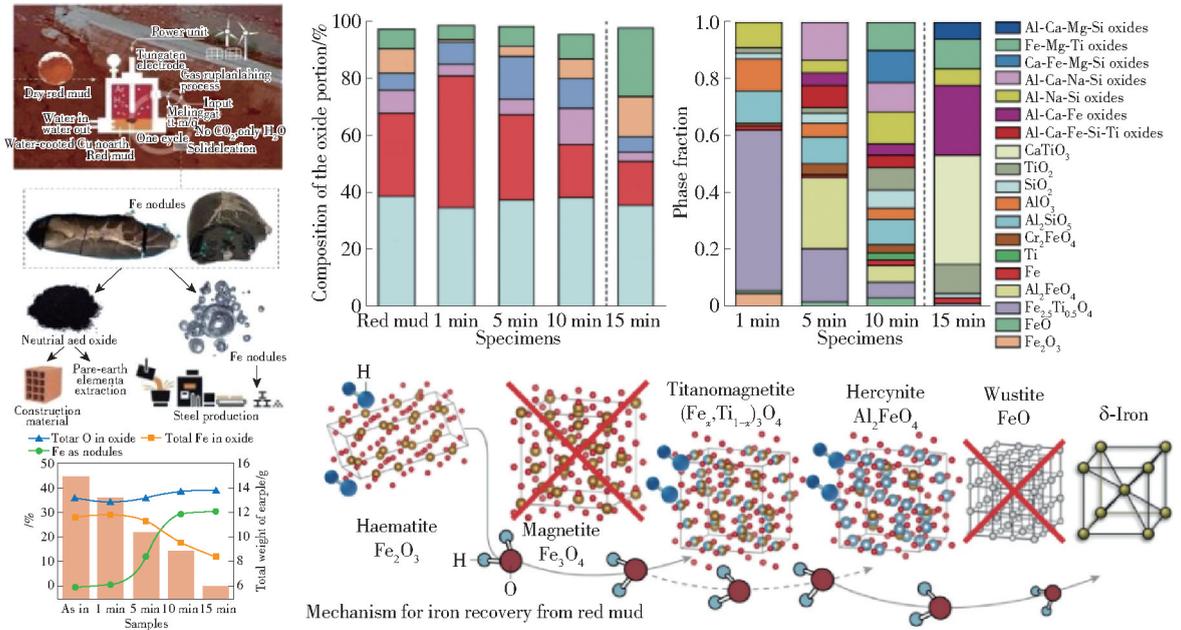
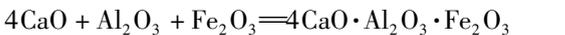
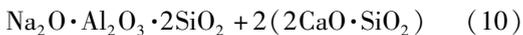
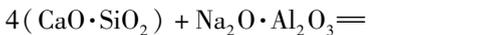
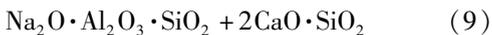
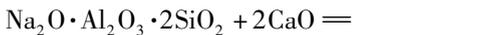
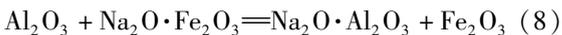
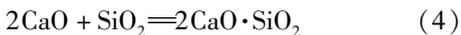
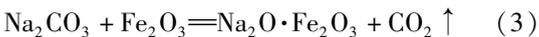
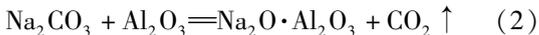


图5 氢等离子体从赤泥中提铁及相演变过程^[8]

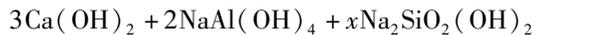
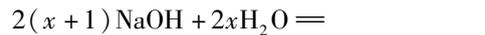
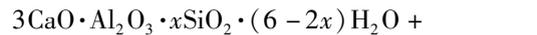
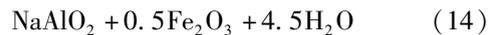
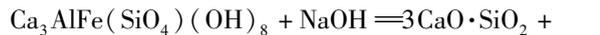
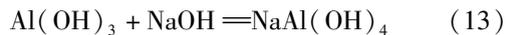
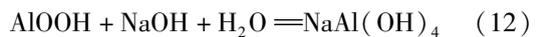
为 83.12%。江文琛^[11]利用碱-石灰烧结法处理拜耳法赤泥,先采用碱和石灰烧结,在温度 800 ℃ 下焙烧 40 min,选择铝钙比 1.3、钙硅比 2.5、炭粉按赤泥质量的 18% 添加;再经过碱液溶出,控制溶出温度 85 ~ 90 ℃、溶出时间 15 min、苛性碱浓度 15 g/L、液固比 15 mL/g,氧化铝回收率达到 85.74%。该方法可同步回收铝和铁,经济效益可观,但存在工艺流程长、需要投资窑炉的缺点。

应釜内进行溶出,控制亚熔盐与赤泥质量比为 6.0、反应温度 230 ℃,溶出 2 h,氧化铝溶出率为 79.22%。钟莉等^[14]选用 NaOH 亚熔盐溶出拜耳法赤泥中的氧化铝,在亚熔盐与赤泥质量比为 3.0、反应温度 210 ℃、溶出时间 4 h、搅拌速度 700 r/min 并添加一定石灰的条件下,氧化铝回收率达到 88%。此方法可以有效地将赤泥中的氧化铝进行回收,但亚熔盐中的苛性碱浓度过高、过饱和度低,不利于氢氧化铝的结晶析出。



2.2.2 亚熔盐法

亚熔盐法是采用亚熔盐处理赤泥进行溶出反应,使赤泥中的铝进入溶液中而回收 Al₂O₃ 的方法,其主要化学反应^[12-13]如式(12)~(15)。孙旺等^[13]选用 NaOH 亚熔盐处理拜耳法赤泥,在高压反

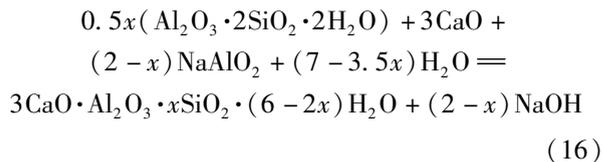


2.2.3 钙化-碳化法

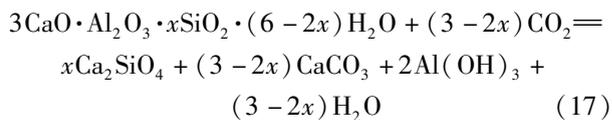
钙化-碳化法是通过添加石灰使赤泥中的脱硅产物转化为水化石榴石(钙化转型),然后利用 CO₂ 分解钙化转型渣(碳化分解),最后采用碱液低温溶铝回收氧化铝的方法,其反应机理^[15]见式(16)~(18)。朱小峰^[15]采用钙化-碳化法处理三水铝石赤泥,钙化条件为:温度 120 ℃,反应时间 2 h、液固比 4:1、钙硅比 1.5;碳化条件为:温度 80 ℃,反应时间 2 h、液固比 5:1、CO₂ 压力 1.2 MPa,在上述条件下

赤泥中氧化铝的回收率达到 75.66%，渣中 Na_2O 残留量小于 0.5%。解立群等^[16]采用钙化-直接碳化法处理一水硬铝石赤泥，氧化铝的回收率为 35.6%，溶铝渣中 Na_2O 残留量为 0.23%。该法工艺流程长，铝回收率相对低，残渣产生量大。

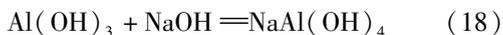
钙化过程：



碳化过程：



溶铝过程：



2.3 赤泥中回收稀有金属

赤泥中稀有金属的回收通常以酸浸法为基础，再通过嫁接萃取法、离子交换法等其他方法提取稀有金属元素。朱晓波等^[17]通过控制盐酸浓度、浸出温度和时间、液固比等参数，在最佳条件下钙、钠、铝、铁和钛的浸出率分别为 99.3%、99.2%、81.2%、76.3% 和 3.2%，稀有金属钒、铈和钇的浸出率均超过 95%，然后对浸出渣进行活化焙烧和水浸处理，硅的浸出率可达 85.7%，富钛料中的 TiO_2 品位为 71.8%。ZHU 等^[18]选用硫酸浸出-P507 萃取法提取赤泥中铈元素，用 6 mol/L 浓度的 H_2SO_4 浸出赤泥，铈的浸出率为 92%，再用 10% P507 萃取剂萃取浸出液 4 min，铈含量超过 98%，最后进行苛碱反萃取、硫酸溶解、草酸沉淀，并在温度 750 °C 下煅烧 1.5 h，得到的 Sc_2O_3 纯度达到 99%。

Smirnov 等^[19]采用酸浸-树脂吸附回收赤泥中的铈、铀、钍，在硫酸介质中经过筛网过滤和十级逆流吸附，进入树脂中的铈、铈、钍分别为 96%、50%、17%，此外，还有 8% 钍、0.3% 铝和 0.1% 铁，提纯后铈的含量能够达到 98%~99%。李望等^[20]以河南某地赤泥硫酸浸出液为研究对象，使用 5 g D301 树脂回收酸浸液中的钒，控制吸附流速 100 mL/h、吸附温度 25 °C，钒吸附率达到 98%。LU 等^[21]采用酸浸-离子交换法提取拜耳法赤泥中的镓，控制温度 55 °C、浸出时间 5 h、盐酸浓度 159 g/L、液固比 8:1，镓的浸出率为 94.77%，用 LSD-396 树脂吸附浸出液的 Fe，得到质量浓度 97.54 mg/L 的镓富集液，其

浓度是初始浸出液的 24.95 倍。从赤泥中提取含量极微的稀有元素，需要结合铁、铝等大量元素的分离和提取，才能实现经济效益的最大化，这也是实现赤泥提取稀有金属的正确途径。

3 赤泥作为矿物原料整体利用

3.1 赤泥用于建筑材料领域

3.1.1 赤泥生产水泥

赤泥含有大量的硅酸盐、 Al_2O_3 以及 CaCO_3 ，尤其是烧结法和联合法赤泥含有大量的 β -硅酸二钙，其经过高温烧结过程，具有一定的水硬性组分，接近水泥熟料的组成，因此可以用于生产水泥。20 世纪 90 年代，中铝山东分公司攻关了烧结法、联合法赤泥的脱碱技术，成功生产出 525# 高标号水泥，将赤泥配比提高到 45%。戴剑等^[22]将拜耳法赤泥、粉煤灰等多种原料均匀混合，掺入 4% 钡泥为活化剂，在煅烧温度 1 310 °C、保温时间 1 h、赤泥掺入量为 10.05% 条件下，制得高贝利特铁铝酸盐水泥。丁铸等^[23]将拜耳法赤泥和矿渣按质量比 1:1 进行配料，以水玻璃溶液为碱激发剂且碱含量 5%，经过 28 d 凝结制得抗压强度 72.05 MPa 的地聚合物水泥。

3.1.2 赤泥生产砖

赤泥与黏土的成分相似，物理性质也十分接近，可通过掺配粉煤灰、尾矿渣等用来生产烧结砖、免烧砖、保温砖和透水砖等。HE 等^[24]采用赤泥和黄河淤泥为原料制备烧结砖，在煅烧温度 1 050 °C、煅烧时间 2 h、掺入赤泥 40% 的最佳条件下，可以得到失重率、收缩率、吸水率和抗压强度分别为 8.91%、7.49%、17.91% 和强度 39.1 MPa 的烧结砖。王伟广等^[25]以赤泥、粉煤灰、骨料等材料为原料，采用模压成型方法，经过自然养护制成抗压强度为 21.35 MPa 的免烧免蒸砖。MANDAL 等^[26]将木屑掺入粉煤灰和赤泥的混合物中，在 1 100 °C 温度下进行烧结，粉煤灰与赤泥配比为 60:40，掺入 7.5% 木屑，制得的保温砖性能符合 IS2042—2006 标准中 A 型保温砖的要求。李国昌等^[27]以赤泥、粉煤灰、膨润土为骨料，在烧结温度 1 080 °C、烧结时间 1 h、砖坯成型压力 40 MPa 的条件下，制得抗压强度 35.32 MPa、透水系数 0.028 cm/s 的赤泥透水砖。

3.1.3 赤泥生产微晶玻璃和陶瓷

赤泥含有与微晶玻璃化学组成相似的氧化铁和氧化铬等物质，可以作为微晶玻璃的成核剂，用于新型环保建筑材料及化工、冶金行业中的耐腐蚀材料。

张全鹏等^[28]采用熔融法制备微晶玻璃,以赤泥和钢渣为主要原料,在固体废弃物总量占比90%时制备的微晶玻璃晶粒尺寸为0.2~1 μm,赤泥掺量为40%时,获得抗弯强度161.57 MPa、显微硬度839.5 MPa、化学稳定的微晶玻璃。

赤泥耐化学腐蚀强、热导率低,含有大量的氧化铝和氧化硅等成分,还可用于生产陶瓷材料。丁祥等^[29]选用高温熔融发泡法制备赤泥-高铝粉煤灰基多孔陶瓷,添加5%发泡剂和35%助熔剂,得到平均孔径为0.98 mm、体积密度为0.63 g/cm³、总孔隙率为70%、导热系数为0.34 W/(m·K)、抗折强度为7.17 MPa、复合泡孔结构且泡孔分布均匀的多孔陶瓷。

3.1.4 赤泥制备新型功能材料

赤泥可用于制备新型功能材料,可作为PVC(聚氯乙烯)塑料的填充剂和热稳定剂,具有较好的阻燃性和流动性、较强的抗老化性和耐热性,且补强作用好、高效廉价,其使用寿命是普通PVC的2~3倍,可用于制作赤泥塑料太阳能热水器和塑料建筑型材。宇平^[30]使用赤泥制备PVC复合材料,研究表明:经湿法处理的赤泥的弯曲强度和模量均高于不处理赤泥;赤泥含量为15%时,经湿法处理后缺口冲击强度最大为3.41 kJ/m²;赤泥含量为10%时,经湿法处理后拉伸强度最大达到52.01 MPa。

3.1.5 赤泥用于路基材料

生产路基材料是未来赤泥大规模消纳的途径,赤泥可以替代大量传统的路面基层材料。齐建召^[31]利用70%~85%赤泥、粉煤灰和石灰制备赤泥

路基材料,取样检测结果表明7 d赤泥路面基层的抗压强度达到2 MPa以上,28 d抗压强度达到3 MPa以上,后来淄博市基于此试验修建了一条长约4 km、宽约15 m的赤泥路基材料公路,该公路符合高等级公路的国家标准要求。刘晓明等^[32]以拜耳法赤泥、粉煤灰和煤矸石等工业固废作为公路路面基层材料,当赤泥和煤矸石混合掺量为75%、工业固废总掺量为97%时,路基材料的7 d无侧限抗压强度达到6 MPa以上,强度、元素含量检测结果均符合国家标准。目前,山东海逸已批量使用赤泥路基材料合作建设了40多条道路,赤泥利用量超过千万吨。

3.1.6 赤泥充填矿坑

赤泥基填充材料是以赤泥为基础原料,协同多源工业固废复合改性、多固废复合及药剂稳定化等技术制备的具有一定的结构强度和耐久性且环境友好的工程复合材料。该材料在满足相关强度标准的前提下,能够确保性能长期稳定和持续有效,可用于矿山生态修复。河北某集团将选铁后的赤泥、钢渣、粉煤灰和矿渣等工业固废资源复合协同,制备赤泥基多固废回填材料,并将回填材料用于曹妃甸工业区的地面凹坑、洼地和矿坑等场地生态回填,并完成了机理分析、材料配比设计、性能测试、地下水环境风险评估等工作^[33]。山东某氧化铝公司和北京建工合作利用改性赤泥修复矿坑,依附龙口市周边30 km内的矿坑,共同建立赤泥基矿山生态修复材料产业化应用技术工程示范,目前已取得阶段性进展^[33]。赤泥制备建筑材料及产品主要性能见表3。

表3 赤泥制备建筑材料及产品主要性能

原材料	制备产品	产品主要性能	赤泥掺量/%	参考文献
赤泥、粉煤灰、石灰石、铝矾土、天然石膏	高贝利特铝酸盐	煅烧温度1 310 ℃、时间1 h, 28 d 抗压强度	10.05	文献[22]
	水泥	54.4 MPa		
赤泥、矿渣	地聚合物水泥	28 d 抗压强度72.05 MPa	50	文献[23]
赤泥、黄河淤泥	烧结砖	产品性能满足国家标准要求	40	文献[24]
赤泥、粉煤灰、石灰、砂子、水泥、石膏	免烧砖	28 d 抗压强度21.35 MPa	40	文献[25]
赤泥、粉煤灰、膨润土	透水砖	烧结温度1 080 ℃、时间1 h, 抗压强度	55	文献[27]
		35.32 MPa		
赤泥、钢渣	微晶玻璃	抗弯强度161.57 MPa、显微硬度839.5 MPa	40	文献[28]
赤泥、高铝粉煤灰、钠钾长石	多孔陶瓷	烧结温度1 200 ℃、总孔隙率70%、抗折强度	59.5	文献[29]
		7.17 MPa		
赤泥、聚氯乙烯粉末状树脂、加工助剂	PVC复合材料	拉伸强度52.01 MPa	10	文献[30]
赤泥、粉煤灰、煤矸石、高炉矿渣	路基材料	7 d 抗压强度6.37 MPa	30	文献[32]
赤泥、矿渣、脱硫石膏、水泥熟料	充填材料	1 d 抗压强度2.4 MPa, 3 d 抗压强度3.6 MPa	50	文献[34]

3.2 赤泥用于环境治理领域

赤泥具有比表面积大、多孔疏松且孔隙率高等特

征,可用于废水处理;同时赤泥具有强碱性和吸附性,也可用于处理废气和污染土壤;另外,赤泥还含

有农作物生长所需的元素,可用于生产化肥产品,改良土壤环境。因此,赤泥在环境治理领域有较为多样化的应用。

3.2.1 处理废水

赤泥可用作低成本吸附剂除去废水中的磷酸根、氟离子等无机阴离子、重金属离子等。李燕中等^[35]采用热酸活化、酸活化和焙烧活化3种不同活化方法处理赤泥制备除磷吸附剂,三种除磷吸附剂对磷的饱和吸附量分别为202.9 mg/g、155.2 mg/g和144.2 mg/g,废水pH值为7时,赤泥吸附剂对磷的去除效果更佳。孙道兴等^[36]使用赤泥作为吸附剂处理废水中重金属离子,当赤泥添加量为2.0 g/L时,对重金属离子 Cr^{3+} 、 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 的吸附率分别达到94%、90%、85%、85%和67%。赤泥虽然可作为废水处理剂,但由于市场上已有很多使用较为简便、契合度更高、效果更好的其他处理剂,其产品市场受限,实际应用价值不高。

3.2.2 处理废气

赤泥可用于处理工业中的酸性气体 SO_x 、 NO_x 、 H_2S 。陈义等^[37]以拜耳法赤泥与水制成赤泥矿浆作为 SO_2 的吸收剂,研究发现烟气中 SO_2 的出口浓度可降至150 mg/m³,赤泥的最大固硫量达到28 g/kg,吸附率达到95%以上,赤泥吸附时间可达5 h以上。位朋等^[38]利用赤泥代替石灰乳对烟气进行脱硫,结果表明,经过100 min吸附中和,赤泥原始浆液pH值可由10.3降至7.2, SO_2 吸收率可达87%。尽管赤泥对废气处理具有一定的效果,但应用工程量庞大,操作困难,处理后产生的尾渣量大,仍需要进行后续处理,因此赤泥处理废气实际应用可能性不大。

3.2.3 修复污染土壤

赤泥可作为土壤改良剂,用于中和酸性土壤和吸附重金属土壤,实现污染土壤的修复。刘昭兵等^[39]研究赤泥对酸性Cd污染稻田水稻生长的影响,发现赤泥使用量为9 000 kg/hm²时,土壤中有效态Cd含量降低了24.9%,糙米、水稻根和茎叶Cd分别降低了69.9%、55.7%和54.5%,酸性土壤pH提高12.0%。黄益宗等^[40]以赤泥、骨炭和石灰为添加剂研究其对土壤重金属的钝化效果,结果表明不同的改良剂可降低玉米地上部70.9%~89.1%Pb含量和78.3%~89.7%Zn含量,降低根部50.0%~67.5%Pb含量和91.0%~94.3%Zn含量。采用赤

泥修复污染土壤,需对赤泥中的重金属、放射性等有害元素作脱除或络合处理,还需要对赤泥进行土壤化处理,因而应用有限。

3.2.4 生产硅钙钾肥

赤泥含有较高浓度的硅、钙、钾、磷成分及少量农作物必须的多种微量元素。利用赤泥中的活化硅能够改善农田土壤质量,促进农产品生长,达到增产的目的。中铝山东分公司将脱水后的赤泥在120~300℃下烘干活化,然后将赤泥磨细至90~150 μm,得到硅钙复合肥,将其应用于济宁等地的缺硅土壤中,农作物的产量可提高8%~10%^[41]。罗扬等^[42]选用KOH水热处理拜耳法低铁赤泥中的钠,在有效深度脱除钠的同时活化了赤泥中的钾、硅等元素,处理后的赤泥可用于生产无机硅钾肥产品。需要注意的是,采用赤泥生产肥料时,赤泥含有大量铁、铝、钛等杂质,可能影响肥料的质量和效果;此外,要将赤泥中有益元素转化为易于农作物吸收的形式,生产工艺复杂,与传统肥料相比,安全性和价格不占优势,市场接受度低,限制了大规模推广应用。

3.3 赤泥土壤化原位修复

目前赤泥土壤化改良目的是使赤泥堆场变成可种植植物、适合微生物生存的土壤,原理是通过培养耐碱性植物、在赤泥表层覆盖一层可耕种土壤、采用微生物分解产生酸性产物降低赤泥碱性等方式使赤泥土壤化,主要方法有植物修复、表土覆盖、微生物修复、基质改良、联合措施改良等。澳大利亚戈夫氧化铝精炼厂采用表土覆盖和植被种植的方式修复赤泥周边的生态环境,5年内赤泥的pH值由10.5降至9.5,15年后表土覆盖厚的区域土壤pH保持中性,草、灌木和树等植物生长良好并出现优势植物^[43]。力拓集团在罗瑟山附近的赤泥堆场对赤泥进行改性处置、水处理、添加石膏和鸡粪等改良剂作为肥料,改善土壤结构,降低土壤pH值,并种植植被,最后实现该堆场95%的面积都被多样化和可持续的植被所覆盖。SANTINI等^[44-45]以修复过的赤泥、土壤及苏打湖底泥作为接种剂,分别研究了单一菌株和多样性微生物接种剂对赤泥生态环境修复效果的影响,并掺配一定量的有机物,结果表明较高生物多样性的微生物接种剂并掺配简单的有机物对赤泥物化性质的改良效果更好。

4 总结与展望

赤泥是铝土矿提取氧化铝的副产品,具有丰富

的矿物质和潜在的资源价值。随着氧化铝产量的增加,赤泥的储量也逐年增加,加上多项环保政策颁布、新增赤泥用地限制及民众环保意识加强,赤泥废弃物的处理成为亟待解决的问题。以下是赤泥资源化利用的总结与展望:

1) 赤泥中有价金属提取规模化应用占比显著。赤泥富含铁、铝、钛、钠、钙等多种矿物成分。随着资源回收技术水平的提升,赤泥中的有价值金属元素逐渐被回收提取。目前,赤泥提铁规模显著,提取的铁可用于钢铁行业,实现钢铝融合;酸浸后的亚铁盐溶液也可用于生产无机化工颜料、电池级无水磷酸铁等化工产品,探索不同行业之间的协同与合作,具有一定的经济价值和环保意义。

2) 赤泥资源化利用的多元化路径。近年来,国内外对氧化铝赤泥的资源化利用开展了大量研究,除有价金属提取外,已探索出多种可行的利用路径,包括用作建筑材料、废水和废气处理剂、土壤改良剂、矿物填料等,这些途径都有助于减少赤泥的堆存量及其对环境的负面影响。

3) 推动赤泥源头减量和赤泥脱碱技术的发展。提高铝土矿的品质,提高氧化铝溶出率,降低赤泥产生量;做好赤泥干堆前处理,降低赤泥中碱含量,例如,可利用其他企业产生的废酸处理赤泥中的碱,同时节省废酸的处理费用。与其他重点企业加强合作,建立协作机制,给赤泥的各组成成分安排“好家”,构建闭环循环利用体系,实现“零排放”目标。

4) 产学研合作交流和政策支持。加强企业、高校、科研院所的交流与合作,把实验室的科技成果转化为工业化应用;企业根据各家赤泥特征,借鉴同行成功案例,开展合理化解决方案;政府出台更具针对性的政策,扶持赤泥资源化利用技术的研究与产业化应用,同时,可以通过补贴政策、税收优惠等方式,激励企业进行赤泥资源化利用的投资,扩大市场需求;行业做好环境评估,为赤泥利用的可行性论证提供有利的数据支撑。

[参考文献]

- [1] 孙涛涛,荣嵘,洪亚军,等. 赤泥提铁研究进展[J]. 中国有色冶金,2024,53(2):22-33.
- [2] 潘晓林,吕中阳,吴鸿飞,等. 赤泥回收铁铝资源技术研究现状及展望[J]. 中国有色金属学报,2023,33(11):3879-3899.
- [3] 周艳飞. 疏水团聚-磁种法从赤泥中回收铁及机理研究[D]. 长沙:中南大学,2009.
- [4] GAO F, ZHANG J, DENG X, et al. Comprehensive recovery of iron and aluminum from ordinary bayer red mud by reductive sintering-magnetic separation-digesting process [J]. JOM, 2019, 71(9): 2936-2943.
- [5] LIU Xiao, GAO Peng, YUAN Shuai, et al. Clean utilization of high-iron red mud by suspension magnetization roasting[J]. Minerals Engineering, 2020, 157: 106553.
- [6] PEPPER R A, COUPERTHWAITE S 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.
- [7] ZHANG Xuekai, ZHOU Kanggen, LEI Qingyuan, et al. Stripping of Fe(III) from Aliquat 336 by NaH_2PO_4 : implication for rare-earth elements recovery from red mud [J]. Separation Science and Technology, 2021, 56(2): 301-309.
- [8] Matic Jovičević-Klug, Isnaldi R, Souza Filho, et al. Green steel from red mud through climate-neutral hydrogen plasma reduction[J]. Nature, 2024, 625: 703-709.
- [9] 马方通,高利坤. 拜耳法赤泥中回收氧化铝的工艺[J]. 化学工程师,2017,31(7):52-55,83.
- [10] 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.
- [11] 江文琛. 拜耳法赤泥碱石灰烧结法回收铁铝工艺的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2009.
- [12] 刘桂华,刘云峰,李小斌,等. 拜耳法溶出过程降低赤泥碱耗[J]. 中国有色金属学报,2006(3):555-559.
- [13] 孙旺,郑诗礼,张亦飞,等. NaOH 亚熔盐法处理拜耳法赤泥的铝硅行为[J]. 过程工程学报,2008(6):1148-1152.
- [14] 钟莉,张亦飞. 亚熔盐法回收赤泥[J]. 中国有色金属学报,2008,18(S1):70-73.
- [15] 朱小峰. 钙化-碳化法处理中低品位三水铝石矿及赤泥的基础研究[D]. 沈阳:东北大学,2016.
- [16] 解立群,张廷安,吕国志,等. 钙化-碳化法连续化处理一水硬铝石拜耳法赤泥[J]. 有色金属(冶炼部分),2017(4):16-19.
- [17] 朱晓波,巩文辉,李望. 赤泥活化焙烧-联合浸出制备富钛料及组分溶解行为[J]. 中国有色金属学报,2021,31(8):2227-2237.
- [18] ZHU X B, LI W, XING B L, et al. Extraction of scandium from red mud by acid leaching with CaF_2 and solvent extraction with P507[J]. Journal of Rare Earths, 2020, 38(9): 1003-1008.
- [19] SMIRNOV D I, MOLCHANOVA T V. The Investigation of sulfuric acid sorption recovery of scandium and urani-

- um from the red mud of alumina production [J]. *Hydrometallurgy*, 1997, 45(3): 249–259.
- [20] 李望, 刘月, 朱晓波. D301 树脂吸附赤泥浸出液中钒的实验研究与热力学分析[J]. *稀有金属*, 2021, 45(7): 857–865.
- [21] LU F H, XIAO T F, LIN J, et al. Recovery of gallium from Bayer red mud through acidic-leaching-ion-exchange process under normal atmospheric pressure[J]. *Hydrometallurgy*, 2018, 175: 124–132.
- [22] 戴剑, 陈平, 刘荣进, 等. 利用赤泥研制铁铝酸盐水泥及掺钎活化研究[J]. *非金属矿*, 2018, 41(4): 90–92.
- [23] 丁铸, 洪鑫, 朱继翔, 等. 碱激发赤泥-矿渣地聚合物水泥的研究[J]. *电子显微学报*, 2018, 37(2): 145–153.
- [24] HE H, YUE Q, YUAN S, et al. Preparation and mechanism of the sintered bricks produced from Yellow River silt and red mud[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, s203/204(4): 53–61.
- [25] 王伟广, 张威, 王清洲, 等. 赤泥免烧免蒸砖正交试验及分析[J]. *资源环境与工程*, 2008(1): 109–112.
- [26] MANDAL A K, VERMA H R, SINHA O P. Utilization of aluminum plant's waste for production of insulation bricks[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 162: 949–957.
- [27] 李国昌, 王萍. 赤泥透水砖的制备及性能研究[J]. *金属矿山*, 2009(12): 154–157.
- [28] 张全鹏, 刘立强, 井敏, 等. 钢渣-赤泥微晶玻璃的制备及性能[J]. *材料科学与工程学报*, 2013, 31(6): 896–900.
- [29] 丁祥, 潘凯凯, 彭波, 等. 熔融发泡法制备赤泥-高铝粉煤灰基多孔陶瓷[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(3): 713–722.
- [30] 宇平. 聚氯乙烯/赤泥复合材料的制备与性能研究[J]. *塑料助剂*, 2014(3): 27–30.
- [31] 齐建召. 赤泥道路材料的试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [32] 刘晓明, 唐彬文, 尹海峰, 等. 赤泥-煤矸石基公路路面基层材料的耐久与环境性能[J]. *工程科学学报*, 2018, 40(4): 438–445.
- [33] 中国有色金属工业协会, 2024 赤泥综合利用发展报告[M]. 北京: 中国建设科技出版社, 2025: 100–103.
- [34] 祝丽萍, 倪文, 张旭芳, 等. 赤泥-矿渣-水泥基全尾砂胶结充填料的性能与微观结构[J]. *北京科技大学学报*, 2010, 32(7): 838–842.
- [35] 李燕中, 刘昌俊, 栾兆坤, 等. 活化赤泥吸附除磷及其机理的研究[J]. *环境科学学报*, 2006(11): 1775–1779.
- [36] 孙道兴, 王馥琴. 赤泥脱除废水中重金属离子的研究[J]. *无机盐工业*, 2008(8): 47–49.
- [37] 陈义, 李军旗, 黄芳, 等. 拜耳赤泥吸收 SO₂ 废气的性能研究[J]. *贵州工业大学学报(自然科学版)*, 2007(4): 30–32, 36.
- [38] 位朋, 李惠萍, 靳苏静, 等. 氧化铝赤泥用于工业烟气脱硫的研究[J]. *化工进展*, 2011, 30(S1): 344–347.
- [39] 刘昭兵, 纪雄辉, 王国祥, 等. 赤泥对 Cd 污染稻田水稻生长及吸收累积 Cd 的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(4): 692–697.
- [40] 黄益宗, 郝晓伟. 赤泥、骨炭和石灰对玉米吸收积累 As、Pb 和 Zn 的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(3): 456–462.
- [41] 于绍忠. 赤泥综合利用-作油井充填料的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
- [42] 罗扬, 田江南, 丁健, 等. 拜耳法低铁赤泥制备硅钾肥工艺及硅钾活化机理研究[J]. *武汉科技大学学报*, 2021, 44(1): 27–33.
- [43] WEHR J B, FULTON I, MENZIES N W. Revegetation strategies for bauxite refinery residue: a case study of alcan gove in northern territory, Australia[J]. *Environmental Management*, 2006, 37(3): 297–306.
- [44] SANTINI T C, MALCOLM L I, TYSON G W, et al. pH and organic carbon dose rates control microbially driven bioremediation efficacy in alkaline bauxite residue[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(20): 11164–11173.
- [45] SANTINI T C, WANG J C, WARREN K L, et al. Simple organic carbon sources and high diversity inocula enhance microbial bionutralization of alkaline bauxite residues[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(6): 3929–3939.

Research Status of Bulk Solid Waste Red Mud Resource Utilization in Aluminum Industry

WANG Zhuang^{1,2}, FANG Hui^{3,4}, GUO Fengjia^{1,2}

(1. National Aluminum Alloy Pressure Processing Engineering Technology Research Center, Shandong Nanshan Aluminum Co., Ltd., Longkou 265713, China;

2. Nonferrous Metals Industry Research Institute, Shandong Nanshan Aluminum Co., Ltd., Longkou 265713, China;

3. School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China;

4. Longkou Donghai Alumina Co., Ltd., Longkou 265713, China)

Abstract: Red mud is a strong alkaline industrial solid waste produced in the process of alumina production. Its long-term storage not only occupies a large amount of land, but also causes soil damage, water quality reduction, air pollution and other environmental safety hazards. Large-scale consumption of red mud has become an urgent problem to be solved. This paper introduced the physical and chemical properties of red mud, and summarized and analyzed the resource utilization of red mud in valuable metal extraction, building materials, environmental management materials, and soil in-situ remediation. The key contents included; the recovery technology of iron, aluminum and rare metals in red mud; the application of red mud in the construction field of cement, brick products, glass-ceramics, ceramics, new functional materials, roadbed materials and mine filling materials; the potential of red mud in environmental treatment such as wastewater treatment, waste gas purification, contaminated soil remediation, fertilizer carrier and the technical path of soil improvement in red mud yard. Finally, the future development trend of red mud resource utilization was prospected.

Key words: red mud; valuable metal extraction; building material; environmental governance; soilification in situ remediation; comprehensive utilization

(上接第 6 页)

management system has become the key to the green and low-carbon development of enterprises. This paper took the construction of carbon budget system of non-ferrous metal enterprises as the starting point, and designed a carbon budget system including carbon emission sub-budget, carbon emission reduction and cost sub-budget, carbon emission trading sub-budget, and carbon emission reduction net profit and loss sub-budget. The carbon emission reduction target, energy-saving diagnosis mechanism and enterprise carbon budget were closely integrated. This paper provides a reference for non-ferrous metal enterprises to reshape the development logic, accelerate the process of low-carbon transformation and enhance the resilience of sustainable development under the strategic goal of “dual carbon”.

Key words: carbon budget system; carbon emission reduction; carbon trading; energy-saving diagnosis; non-ferrous metal enterprises