拜耳法赤泥中有价金属综合回收利用研究进展*

高云川[1,2]，于鹏泽[2]，符海桃[1,2]，宋强[2]，童雄[2]，谢贤[2]，张文杰[3]

（1.云南华联锌铟股份有限公司， 云南 文山市 663701；
2.昆明理工大学 国土资源工程学院， 云南 昆明 650031；
3.昆明冶金研究院有限公司， 云南 昆明 650021）

摘要：为解决拜耳法氧化铝生产中赤泥堆存引发的环境危害问题，同时实现二次资源的高效利用，以拜耳法赤泥为研究对象，系统梳理其基本特性与环境危害，重点阐述Fe、Al、Ti、Sc等有价金属的回收研究现状，深入对比不同回收工艺的作用原理与工业应用效果，分析各工艺的优劣势与适用场景。研究发现：物理法回收Fe操作简便但回收率仅为55%～60%，还原焙烧-磁选法回收率可达87%～92.8%，但能耗较高；酸浸法回收Al、Ti、Sc浸出率较高但酸耗高，联合工艺能提升综合回收效率但流程复杂。目前赤泥综合利用率已提升至12%左右，仍与发达国家存在差距。前端物相调控、绿色工艺研发、联合工艺开发及赤泥高值化材料制备是未来赤泥有价金属回收的核心发展方向，可为行业技术升级提供参考。

关键词：拜耳法赤泥；有价金属回收；综合利用；还原焙烧；浸出工艺；磁选

中图分类号：TD98 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)05-0229-13

Comprehensive Recovery and Utilization of Valuable Metals from Bayer Process Red Mud: A Research Review

Gao Yunchuan[1,2], *Yu Pengze*[2], *Fu Haitao*[1,2], *Song Qiang*[2], *Tong Xiong*[2], *Xie Xian*[2], *Zhang Wenjie*[3]

(1.Yunnan Hualian Zinc and Indium Co., Ltd., Wenshan, Yunnan 663701, China;
2.Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650031, China;
3.Kunming Metallurgical Research Institute Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650021, China)

Abstract: To address the environmental hazards caused by red mud stockpiling during Bayer process alumina production and achieve efficient utilization of secondary resources, this study takes Bayer process red mud as the research object. It systematically reviews the fundamental characteristics and environmental risks of red mud, focusing on the current research status of recovering valuable metals such as Fe, Al, Ti and Sc. The study provides an in-depth comparison of the operational principles and industrial application effects of different recovery processes, and analyzes the advantages, disadvantages, and applicable scenarios of each process. Research findings indicate that the physical method for Fe recovery features simple operation but achieves a recovery rate of only 55%-60%. The reduction roasting-magnetic separation method can attain a recovery rate of 87%-92.8%, albeit with relatively high energy consumption. Acid leaching methods yield relatively high leaching rates for Al, Ti, and Sc recovery, but suffer from high acid consumption. Combined processes can enhance overall recovery efficiency, though they involve complex flowsheets. Currently, the comprehensive utilization rate of red mud has increased to approximately 12%, yet a gap remains compared with that of developed countries. Front-end phase regulation, the development of green processes, the advancement of combined processes, and the preparation of high-value-added materials from red mud represent the core development directions for future valuable metal recovery from red mud. This review can provide a reference for technological upgrading within the industry.

Key words: Bayer process red mud, Valuable metal recovery, Comprehensive utilization, Reduction roasting, Leaching process, Magnetic separation

---

* **收稿日期**：2026-03-04

基金项目：云南省基础研究计划项目(202601BE070001-057)；云南锡铟实验室开放课题(202405AR340002-25EA01)；有色金属强化冶金新技术全国重点实验室开放基金项目(YSQH-ZD-25008)；深地国家科技重大专项项目(2024ZD1004006)

作者简介：高云川(1983—)，男，云南普洱人，博士，高级工程师，主要从事资源综合回收利用研究工作。E-mail：328530137@qq.com

通信作者：符海桃(1989—)，男，湖北石首人，博士，高级工程师，主要从事资源综合回收利用研究工作。E-mail：1107446054@qq.com

0 引言

赤泥是拜耳法氧化铝生产过程中产生的大宗固体废弃物,每生产 1 t 氧化铝便会伴生 1.5 t 赤泥,其产生量与氧化铝产量呈正相关,我国作为全球氧化铝生产第一大国,年氧化铝产量占全球 50%以上,导致近 5 年赤泥年产生量均维持在 1 亿 t 以上[1]。大量赤泥长期堆存于尾矿库,不仅占用宝贵土地资源,还因其强碱性、高重金属及微量放射性特性,对周边土壤、地下水和大气环境造成严重潜在威胁,成为制约氧化铝行业绿色高质量发展的关键瓶颈[2]。同时,赤泥中富含 Fe、Al、Ti、Sc 等有价金属,是极具开发价值的二次资源,实现其资源化回收既能缓解环境压力,又能弥补矿产资源短缺现状,具有重要的环境、经济和社会效益[3]。

据世界金属统计局(WBMS)2026 年发布的最新数据,2025 年全球铝消耗量已达 7 388 万 t,随着全球工业化进程持续推进,铝需求仍将保持稳步增长,这也意味着赤泥产生量将持续增加,其资源化回收的紧迫性进一步凸显。

经过拜耳法产出的赤泥含有大量碱、氟化物和重金属离子,具有碱性强、粒径细、组分复杂等特性,难以实现大批量高效利用。氧化铝生产企业产生的赤泥主要堆存于尾矿库,不仅占用大量土地资源,还造成赤泥中赋存的大量 Fe、Al、Ti 和稀散金属 Sc 等资源的浪费[4-5]。除此之外,随着堆存时间的延长,具有强碱性和放射性的赤泥易对周边环境产生重大风险,土壤重金属离子严重超标[6]。为推动赤泥资源化、无害化、减量化协同利用,我国出台了一系列针对性政策文件:《"十四五"循环经济发展规划》(2021 年出台)明确提出"推动大宗固体废弃物综合利用,加快赤泥等工业固废资源化技术研发与产业化应用";《关于加快推动工业资源综合利用的实施方案》(2022 年出台)进一步细化要求,提出"到 2025 年,赤泥综合利用率提升至 15%以上,培育一批赤泥综合利用骨干企业"[7]。在政策引导和支持下,我国赤泥综合利用率已从 4%提升至 12%左右,相关回收技术快速迭代,逐步从单一金属回收向多金属综合回收转变[8]。

目前,国内外学者已围绕赤泥有价金属回收开展了大量研究,形成了物理法、火法、湿法及联合工艺等多种技术路径,在 Fe、Al 等主要金属回收方面取得了一定突破,但仍存在研究空白与瓶颈:一是单一工艺存在局限性,如物理法回收率偏低、火法能耗偏高、湿法酸耗大且后续分离复杂[9];二是稀散金属 Sc 的回收技术虽已成熟,但规模化应用成本偏高,难以实现产业化落地;三是不同地区赤泥成分差异较大,缺乏个性化、适配性强的综合回收工艺[10];四是现有研究多聚焦于单一金属回收,对赤泥全组分综合利用及高值化转化关注不足[11]。基于此,本文系统综述拜耳法赤泥的基本性质及环境危害,梳理 Fe、Al、Ti、Sc 等有价金属的回收技术现状,对比不同工艺的优劣,明确当前研究瓶颈与未来发展方向,整合现有研究成果,为后续针对性工艺优化和产业化应用提供理论支撑与实践借鉴。

1 赤泥的性质及危害

1.1 赤泥的性质

铝土矿中铝硅比(A/S)对生产工艺的成本有直接影响,不同成分铝土矿的处理工艺主要包括烧结法、拜耳法和联合法。对于 SiO_2 含量低、铝硅比大于 8 的铝土矿,如三水铝石($Al(OH)_3$)、一水软铝石(γ-AlOOH)适合拜耳法处理,在高温高压下,通过碱浸将其溶解成铝酸钠溶液,产生的浸出渣主要以 Fe_2O_3 为主;对于 SiO_2 含量较高、铝硅比较低(A/S 为 3～6)的铝土矿,如一水硬铝石(AlO(OH)),适合采用烧结法,添加石灰+纯碱后经过 1 200 ℃高温焙烧,生成易溶于水或稀碱的 $Na_2O \cdot Al_2O_3$,而硅转变成硅酸钙进入渣相;对于铝硅比适中(A/S 为4～7)的铝土矿,主要采用联合法处理,即将高品位铝土矿通过拜耳法处理,再经过烧结法进一步回收铝,不同工艺的特性对比见表 1。不同工艺产生的赤泥主要成分也存在较大差异,具体见表 2[12-13]。

表 1 不同工艺的特性

Table 1 Characteristics of different processes

工艺	原矿性质	反应试剂	赤泥主要物相	优势	劣势
拜耳法	A/S=8～10	液碱	赤铁矿/针铁矿,钠硅渣	成本低、能耗低	赤泥碱性强,难处理
烧结法	A/S=3～6	$CaCO_3/CaO/Na_2CO_3$	原硅酸钙	适应处理低品位原矿	流程复杂,能耗高
联合法	A/S=4～7	液碱,$CaCO_3/CaO/Na_2CO_3$	原硅酸钙	综合利用率高	工艺冗长,投资成本高

表 2　不同工艺产生的赤泥的主要成分

Table 2　Main components of red mud produced by different processes　%

工艺	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	TiO_2	CaO
拜耳法	40～60	10～20	2～18	1～10	2～8
烧结法	6～10	5～7	20～30	2.5～3	45～50
联合法	6～7	5～7	20～22	6.1～7.7	40～48

赤泥因含有大量褐红色的 Fe_2O_3 而呈现红色，随 Fe_2O_3 含量的不同，可表现出棕色、灰白色和红色，国内产生的赤泥基本以高铁红色为主。由表 2 可知，拜耳法产生的赤泥主要含有 Fe_2O_3（40%～60%）、Al_2O_3（10%～20%）、SiO_2（2%～18%）、TiO_2（1%～10%）和 CaO（2%～8%）等物质，其中 Fe_2O_3、Al_2O_3 和 SiO_2 三者含量占比基本超过 60%。碱液浸出后产生的赤泥碱残留量高，其中可溶性碱主要包括 NaOH、Na_2O、Na_2CO_3、$NaAl(OH)_4$ 等，占比达到 50%左右，结合态碱主要以方钠石、霞石和铝硅酸钠等形式残留在赤泥中[14]。除此之外，铝土矿在碱浸前通常需要磨矿至－200 目，以此提升 Al 的溶解率，这也导致赤泥的粒径＜0.075 mm 的占比超过 95%，在堆存中处于游离态的微细粒颗粒易发生团聚现象，其比表面积达 64～187 m^2/g、孔隙率达 72%～75%，使赤泥具有作为吸附材料的前景[15-16]。

1.2　赤泥的危害

结合《危险废弃物鉴别标准 通则》(GB 5085.7—2019)，若浸出液 pH≥12.5 或浸出毒性超标，则拜耳法产生的赤泥判定为危险废物。拜耳法产生的赤泥碱性强，pH 一般为 11～14，氟化物含量超过 8 mg/L，远超行业排放标准值[17]。除此之外，赤泥中还含有微量 U（0.2%左右）、Th（0.5%）等放射性元素，以及重金属离子如 Pb、Cd、Cr 等，其在尾矿库中堆存时，会对周边土壤、地下水造成潜在环境威胁。并且，长期露天环境中的赤泥，经过日晒雨淋，容易使表面的微细粒颗粒脱水风化，漂浮于空气中，严重影响周边生态环境[18]。近年来，我国每年赤泥产量超 1 亿 t，尾矿库堆存面积达到 12 万亩[19-20]。赤泥作为重要的二次资源，提升其综合利用率至关重要，应从源头减少赤泥的堆存量。

2　拜耳法赤泥中主要有价金属的回收

2.1　铁的回收

拜耳法产生的赤泥铁含量高，在富集回收中依据铁矿物与其他组分物理性质（磁性、密度等）实现分离，常见工艺包括磁选和重选。赤泥的嵌布关系复杂，铁矿物相中弱磁性矿物占比高（赤铁矿和针铁矿等），导致传统磁选对铁的富集效果较差[21]。随着磁选机设备性能的升级，物理法在赤泥中回收铁的应用也得到进一步推广，如某铝土矿厂对赤泥开展 SLon 立环脉动高梯度磁选机分选试验后，最终获得铁精矿 TFe 品位约 50.47%、TFe 回收率 40.19%的良好选矿指标[22]。除此之外，大量的研究证实多种物理法相结合，能提升 Fe 的回收率，如旋流器重选、悬振面选矿机分选、高梯度磁选等[23-24]。物理法对赤泥的处理具有处理量大、能耗低、二次污染风险小等优势，但也存在整体回收率较低，所得 Al_2O_3 含量偏高（>10%），增加冶炼成本等。

为了提升赤泥中弱磁性铁矿物的磁性，通过火法冶金在还原氛围下，促使铁物相转化为强磁性的磁铁矿和单质铁等，再经过磁选能有效提升铁的回收率和精矿品位。在还原焙烧过程中与赤泥结合的物质主要包括：煤系还原剂（碳粉、烟煤等）、气体还原剂（CO、H_2 等）、生物质还原剂（秸秆、木质素等）[25-26]。Wang 等[27]以无烟煤和石墨为还原剂，与赤泥混合均匀后在 1 500 ℃条件下充分焙烧 0.5 h，再经过磁选获得的铁的回收率达到 92.8%。Gao 等[28]以石墨为还原剂处理高铁赤泥，在 1 200 ℃条件下还原焙烧 1.5 h，磁选后能获得品位和回收率分别为 55.1%和 91%的铁精矿。直接采用煤系处理虽然能显著提高铁的回收率和品位，在早期生产中应用广泛，但该工艺消耗大量一次性化石能源，增加处理成本，且焙烧温度高、焙烧时间较长，易产生大量温室气体，限制了该焙烧系列的应用。为了缩短焙烧时间，降低焙烧温度，可采用气态还原剂提升其与赤泥的接触面积，提升还原反应效率。Samouhos 等[29]在 H_2 氛围中还原焙烧赤泥，在 480 ℃的条件下反应 50 min，可将赤泥中的 Fe_2O_3 还原为 Fe_2O_3，转化率达到 87%，有效降低了焙烧温度。也有研究采用以 CO 与 H_2 按比例混合还原赤泥，相关反应式见式(1)至式(3)[30]。悬浮磁化焙烧通过气体流速将赤泥分散，与还原气体充分接触，良好的处理效果使该技术具备广阔的应用前景。Liu 等[31]以悬浮磁化焙烧-磁选工艺处理粒径为－35 μm 的赤泥，试验研究发现，在 540 ℃、CO 还原氛围下充分反应 15 min，经 0.11 T 磁场分选后，铁的回收率

超过 85%,有效实现了铁和铝的分离。气体还原剂可以解决能耗高的弊端,提升焙烧效率,但铁精矿中 Al 含量还较高,同时还原气体成本较高。

$$Fe_2O_3 \cdot nH_2O = Fe_2O_3 + nH_2O\uparrow \quad (1)$$

$$3Fe_2O_3 + CO = 2Fe_3O_4 + CO_2 \quad (2)$$

$$3Fe_2O_3 + H_2 = 2Fe_3O_4 + H_2O \quad (3)$$

以农作物秸秆等废弃物为还原剂处理赤泥,能有效降低处理成本,同时发挥农作物"余热",充分展现以废治废理念,引起了研究者们的广泛关注。目前,常用的生物质还原剂包括稻杆、玉米杆和麦秆等,在还原赤泥中主要是利用生物秸秆的纤维素、木质素等含碳有机物,在不同温度下实现分解,产生出具有还原性的物质[32]。热解过程一般包括:低温阶段(200 ℃)使生物质失去自由水;温度升高至 200~600 ℃时,有价物开始热解,产生 CO、H_2、CH_4 和 CO_2 等气体物质;当温度超过 500 ℃,热解产生的焦油进一步裂解成生物炭、生物气,生物质热解过程如图 1 所示[33-34]。钟宏等[35]以生物质为还原剂处理赤泥,在生物质添加量 8%、温度 300 ℃的条件下焙烧 10 min,经 0.5 T 磁场处理后,获得品位为 57.2%的铁精矿。

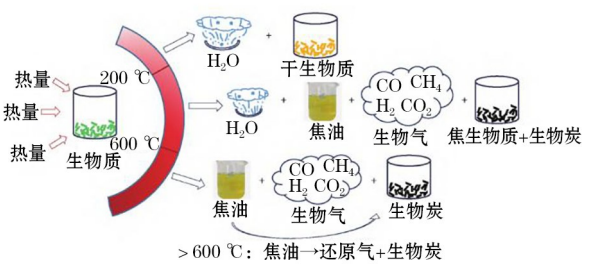


图 1 生物质热解过程

Fig.1 Biomass pyrolysis process

为了改善焙烧环境、降低焙烧温度、提升赤泥中铁和铝的分离效果,通常在焙烧中添加钠盐(Na_2SO_4、Na_2CO_3 等),钠盐能有效将 Si 和 Al 等物质转变成 $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$、$Na_2O \cdot SiO_2$、$Na_2O \cdot 11Al_2O_3$ 等物相,抑制铁矿物形成 $2FeO \cdot SiO_2$、$FeO \cdot Al_2O_3$ 等物质,从而达到提升铁精矿纯度的效果,相关反应式见式(4)至式(9)[36]。Rao 等[37]添加 $Na_2CO_3 + Na_2SO_4$ 于碳粉还原焙烧赤泥中,在添加量 6%、温度 1 050 ℃的条件下,充分焙烧 1 h 后,将弱磁性铁矿物转变成单质 Fe,经 0.1 T 磁场环境处理后,产出品位和回收率分别为 90.1%和 94.9%的铁精矿[37]。除此之外,还能在焙烧环境中引入微波辅助加热,促进赤泥原料内部产生热量,提升处理效果,降低能耗。Agrawal 等[38]在微波辅助加热条件下,对比煤粉还原赤泥的作用效果,研究发现微波作用能有效缩短焙烧时间,在温度 900 ℃条件下焙烧 10 min,经磁选后铁的回收率达到 98%以上。

$$Na_2CO_3 + SiO_2 \rightarrow Na_2O \cdot SiO_2 + CO_2\uparrow \quad (4)$$

$$Na_2SO_4 + SiO_2 \rightarrow Na_2O \cdot SiO_2 + SO_3\uparrow \quad (5)$$

$$Na_2CO_3 + 11Al_2O_3 \rightarrow Na_2O \cdot 11Al_2O_3 + CO_2\uparrow \quad (6)$$

$$Na_2SO_4 + 11Al_2O_3 \rightarrow Na_2O \cdot 11Al_2O_3 + SO_3\uparrow \quad (7)$$

$$Na_2CO_3 + Al_2O_3 + SiO_2 \rightarrow Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 + CO_2\uparrow \quad (8)$$

$$Na_2SO_4 + Al_2O_3 + SiO_2 \rightarrow Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 + SO_3\uparrow \quad (9)$$

相较于火法工艺,湿法工艺能有效降低碳排放和能耗高的问题,更加符合绿色低碳工业发展的需求。在赤泥中回收铁的工艺中常见的湿法工艺为酸浸。酸浸工艺主要采用无机酸(HCl、H_2SO_4、HNO_3 等)和有机酸(草酸、柠檬酸等)作为浸出剂,对赤泥中铁的氧化物实现溶解,再从浸出液中选择性分离回收 Fe。如盐酸能有效溶解赤泥中的 Fe_2O_3 和 Al_2O_3,相关反应式见式(10)和式(11),并且提高反应温度能促进金属浸出率的提升,但盐酸挥发性较强,对生产设备抗腐蚀性要求高[39-40]。目前研究多以 H_2SO_4 和 H_3PO_4 等难挥发性强酸为浸出剂,Pepper 等[41]对比了 HNO_3、HCl、H_2SO_4 和 H_3PO_4 对赤泥中 Fe、Al、Si 和 Ti 的溶出效果,研究发现 H_3PO_4 作浸出剂时,对 Fe、Ti、Al 的浸出率分别达到 78%、24%和 50%。有机酸与金属离子良好的络合作用使其在浸出领域也得到广泛研究和应用,Yu 等[42]以草酸为浸出剂溶解赤泥中 Fe_2O_3,在液固比 15 mL/g、草酸浓度 1 mol/L、温度 75 ℃的条件下充分浸出 2 h,Fe 的浸出率达到 96%,相关的反应式见式(12)至式(14)。酸浸工艺相对操作简单,金属浸出率高,但赤泥中夹带大量碱性物质,对酸消耗量较大,同时浸出渣中成分复杂,导致后续分离纯化的工序繁琐。

$$Al_2O_3 + 6HCl + 9H_2O \rightarrow 2[Al(H_2O)_6]Cl_3 \quad (10)$$

$$Fe_2O_3 + 6HCl + 9H_2O \rightarrow 2[Fe(H_2O)_6]Cl_3 \quad (11)$$

$$Fe_2O_3+6H_2C_2O_4\rightarrow 2H_3Fe(C_2O_4)_3+3H_2O \quad (12)$$

$$2H_3Fe(C_2O_4)_3=2H_2Fe(C_2O_4)_2+H_2C_2O_4+2CO_2\uparrow \quad (13)$$

$$H_2Fe(C_2O_4)_2+2H_2O\rightarrow FeC_2O_4\cdot 2H_2O\downarrow+H_2C_2O_4 \quad (14)$$

综上所述，铁作为拜耳法赤泥中含量最高的物质，在氧化铝企业基本被回收利用，具体工艺根据成分差异、铁矿物嵌布特性进行处理。不同工艺回收铁的核心参数与优劣对比见表 3。目前，工业生产中多以低成本物理选矿法进行回收，整体回收率有待提升。

表 3　不同工艺回收 Fe 的核心参数与优劣对比

Table 3　Comparison of core parameters, advantages and disadvantages of different processes for recycling Fe

工艺	处理手段/药剂	工艺条件	回收率/%	优势	劣势
物理选矿	磁选	SLon 立环脉动高梯度磁选机，两段磁选(1.0 T、0.65 T)	55～60	操作简单、成本小、二次污染风险小	回收率较低、分离效果较差
还原焙烧-磁选	煤炭无烟煤焙烧	1 500 ℃、焙烧 0.5 h	92.80	铁精矿品位和回收率高	能耗高、产生大量温室气体
	H_2	480 ℃、焙烧 50 min	87		
	生物质	400～750 ℃、焙烧 10～30 min	90		
酸浸	H_3PO_4	50～80 ℃、浸出 2 h	75～80	反应条件温和、同时实现多种金属回收	酸耗高、后续分离提取难度大
	$H_2C_2O_4$	75 ℃、1 mol/L、浸出 2 h	96		

2.2　铝的回收

铝土矿经过细磨、浸出后，残留的铝资源基本以微细粒形式均匀分布于赤泥中，增加了 Al 的回收难度。拜耳法产生的赤泥中铝物相主要为一水硬铝石(α-AlOOH)、一水软铝石(γ-AlOOH)和水钙铝榴石($Ca_3Al_2(SiO_4)_{3-x}(OH)_{4x}$，$0<x<3$)，提高 Al 的回收率需要破坏 Al—Si 和 Al—O 等晶体结构[43]。目前，赤泥中 Al 的回收工艺主要包括浸出、烧结、钙化-碳化法。

湿法浸出工艺主要包括酸浸和碱浸，其中酸浸主要应用在选完 Fe 后的尾矿，进一步回收 Al 的工艺中，通过 H^+ 将铝的氢氧化物溶解进浸出液中，再从浸出液中选择性富集 Al^{3+}[44]。根据浸出液中 Al^{3+} 浓度的差异，采用聚合物实现富集，形成聚合硫酸铝，再转变成活性 Al_2O_3 催化剂，实现 Al 的回收利用[45]。赵恒等[46]以 H_2SO_4 为浸出剂从赤泥中溶解回收 Al，在 100 ℃的条件下浸出 1 h，Al 的浸出率达到 93.01%，残留的 Fe 浸出率达 89.54%。酸浸工艺操作流程简单，提取效率高，但需要消耗大量酸液，且浸出渣后续呈强酸性，还需二次处理，增加处理成本，使得该工艺基本被替代。相较于酸浸，碱浸工艺依托 Al 的两性，能选择性溶解 Al，降低浸出液中杂质含量，具有良好的应用前景。由于拜耳法产生的赤泥含碱多，碱液在溶解 Al 的同时，还能有效完成赤泥的深度脱碱，浸出渣碱的含量降低至 0.2%～0.5%，能显著降低赤泥的“毒性”[47-48]。碱液浸出中主要是将硅铝酸钠、水化石榴石等含铝矿物转化为钙铁榴石($3CaO\cdot Fe_2O_3\cdot xSiO_2\cdot nH_2O$)，相关反应式见式(15)至式(17)，铝的回收率能达 65%左右[49]。Zhang 等[50]采用碱液浸出回收赤泥中的铝化合物，研究发现，在溶出苛碱比为 20 以内时，Al 的浸出率随着苛碱比的增大而增加，进一步增大苛碱比后，赤泥中 Si 的溶出量显著增加，导致浸出液黏度增大，在 280 ℃、苛碱比 20 的条件下，赤泥中 Al 的品位从 21.6%降低至 5.7%，浸出率超过 70%。该工艺溶解产出的铝酸钠溶液能有效并入拜耳法产线中，提升处理效率，但整体浸出温度较高。

$$2NaFe(OH)_4+3Ca(OH)_2+xNa_2SiO_3\rightarrow 2CaO\cdot Fe_2O_3\cdot xSiO_2\cdot(6-2x)H_2O+(2+2x)NaOH+xH_2 \quad (15)$$

$$2NaAl(OH)_4+3Ca(OH)_2+xNa_2SiO_3\rightarrow 2CaO\cdot Al_2O_3\cdot xSiO_2\cdot(6-2x)H_2O+(2+2x)NaOH+xH_2O \quad (16)$$

$$3CaO\cdot Al_2O_3\cdot xSiO_2\cdot(6-2x)H_2O+2yNaFe(OH)_4\rightarrow 3CaO\cdot yFe_2O_3\cdot(1-y)Al_2O_3\cdot xSiO_2\cdot(6-2x)H_2O+2NaAl(OH)_4 \quad (17)$$

火法烧结法回收赤泥中铝，主要是通过添加 CaO，混合后经高温焙烧，能将 Al 转变成铝酸钙，再进行选择性回收，该工艺在早期回收中应用较多，但仅适用于铝硅比较低的赤泥。随着研究的深入，发现添加 Na_2CO_3 等物质能作为赤泥的激发剂，有效降低焙烧温度，同时将 Al 转变成易溶于水的偏铝酸钠，而 Si 和 Ca 则转化为难溶于水的原硅酸钙(β-Ca_2SiO_4)，能显著提高后续铝产品的纯度[51]。Li

等[52]将赤泥与 CaO、Na_2CO_3 和碳粉按一定比例混合后,在 1 000 ℃高温下焙烧 1.5 h,经过物相分析,焙烧渣中主要物质包括 $NaAlO_2$、Ca_2SiO_4、$CaFe_2O_4$、$CaTiO_3$ 等,水浸后 Al 的回收率达到 89.7%。周秋生等[53]系统研究了碱烧结法的反应机理,相关反应式见式(18)至式(20),结果表明,在最佳工艺条件下,Al 的回收率达到 85%以上。碱烧结法在回收赤泥中的 Al 时,具有针对性强,化学试剂消耗少等优势。

$$Na_2CO_3+Al_2O_3\rightarrow Na_2O\cdot Al_2O_3+CO_2\uparrow \quad (18)$$

$$Na_2CO_3+Fe_2O_3\rightarrow Na_2O\cdot Fe_2O_3+CO_2\uparrow \quad (19)$$

$$Al_2O_3+Na_2O\cdot Fe_2O_3\rightarrow Na_2O\cdot Al_2O_3+Fe_2O_3 \quad (20)$$

为了提升赤泥的综合利用率,对含钙量较高的赤泥进行钙化处理,在高温环境下,结合 Ca 和 Na 的作用,将铝硅酸钠转变成铝酸钠[54],能有效降低赤泥中的 A/S 比值,处理后的赤泥可用于水泥制造。在我国,该工艺最早应用于一水硬铝石型赤泥中 Al 的回收。Zhu 等[55]系统研究了钙化-碳化法回收赤泥中的 Al,最佳工艺条件下铝的回收率达 75%,工艺流程如图 2 所示。

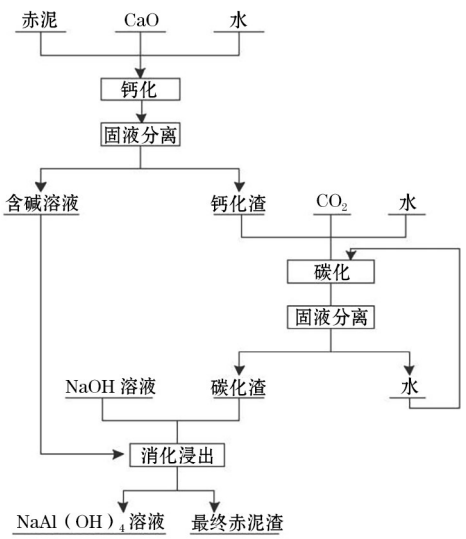


图 2 赤泥钙化-碳化处理工艺流程

Fig.2 Process flow of calcination and carbonization treatment of red mud

综上所述,不同工艺回收 Al 的核心参数与优劣对比见表 4,酸浸能快速有效实现 Al 的溶出,但整体浸出率较低,且酸耗大;碱焙烧法针对性强,Al 的回收率高,但存在能耗高等弊端;钙化-碳化工艺针对性强,回收率高,但工艺流程较繁琐,还未实现工业化应用。

表 4 不同工艺回收 Al 的核心参数与优劣对比

Table 4 Comparison of core parameters, advantages and disadvantages of different processes for recycling Al

工艺	处理手段/药剂	工艺条件	回收率/%	优势	劣势
湿法工艺	酸浸	100 ℃、浸出 1 h	Al 93.01、Fe 89.54	反应条件温和、浸出率高	酸耗高,回收难度高、产生大量废酸
	碱浸	280 ℃、苛碱比 20	70	针对性强、浸出率高	设备要求高、投资成本高
火法工艺	CaO/Na_2CO_3/C	1 000 ℃、焙烧 1.5 h	89.70	水浸回收 Sc、回收率高	高温焙烧能耗高
	钙化-碳化	—	75	回收率高、分离提出纯度高	流程繁琐

2.3 钛的回收

Ti 作为赤泥中含量较高的稀有金属,一般以氧化物和硅酸盐的形式赋存于赤泥中,具有较高的回收价值[56]。目前,赤泥中 Ti 的回收主要采用湿法和火法工艺,湿法一般通过酸液将赤泥中钛化合物进行溶解,大量的研究主要集中在提升 Ti 的浸出率、降低酸耗等。

湿法浸出工艺主要采用 H_2SO_4、HCl、HNO_3、和 $H_2C_2O_4$ 等浸出剂溶解赤泥中的 Ti,其中,H_2SO_4 凭借性质稳定和成本较低,得到了广泛研究和应用。在常温常压下,硫酸直接对赤泥中的 Ti 进行溶解,浸出率一般只能达到 65%,且酸的消耗量大,通常需要改变反应环境[57]。李轶韬等[58]在 SO_2 气氛中、常温常压下,采用硫酸浸出赤泥,能将 Ti 转化成易溶于水的 $Ti(SO_4)_2$,Ca 和 Si 则转变成难溶的 $CaSO_4$ 和硅酸钙,初步实现对杂质 Ca 和 Si 的脱除,但整体酸耗较高,相关反应式见式(21)和式(22)。Zimmer 等[59]以 H_2SO_4 为浸出剂,在 250~350 ℃条件下浸出 1.5 h,浸出液中再加入 NaOH 和 CaO,调节 pH=1 左右,经过沸腾沉淀,最终赤泥中的 Ti 富集达到 97%。在高温高压环境中,赤泥中的 Fe 和 Al 基本不被溶解,能有效降低酸的消耗。

$$TiO_2+2H_2SO_4\rightarrow Ti(SO_4)_2+H_2O \quad (21)$$

$$CaTiO_3+H_2SO_4\rightarrow CaSO_4\downarrow+H_2TiO_3 \quad (22)$$

除了硫酸外，盐酸也能用于浸出提钛，HCl 能有效溶解赤泥中的 Al、Fe、Na 和 K 等金属化合物，而与 Ti 的化合物基本不反应，使 Ti 在浸出渣中得到富集。Thakur 等[60]以 HCl 为浸出剂回收赤泥中的 Ti，在常温常压下，溶解后浸出渣中 Ti 的含量富集到 58%，后续可从浸出渣中进一步富集。赤泥自身碱性使其需要消耗大量酸液，处理成本较高。大量研究发现在酸浸过程中，反应条件、酸的类型等对赤泥的溶解效果有直接影响，选择不同酸按比例混合能有效提高溶解效率。如硫酸＋草酸＋酒石酸混合，在高温高压环境下，酸度液固比为 3 时，Ti 的回收效果良好，浸出率超过 90%，主要是利用有机酸的络合作用，提升金属的溶出[61]。除此之外，根据赤泥中有价金属成分和矿物相的差异，采用多酸分段工艺，改善酸浸效率。常见的为盐酸＋硫酸组成的两端浸出工艺，先采用 HCl 溶解赤泥中的 Fe 和 Al，使 Ti 富集于浸出渣中，再通过 H_2SO_4 选择性溶解回收 Ti，降低后续浸出液提纯的难度[62]。文献[41]中先以 HCl 在 90～95 ℃温度溶解赤泥，分离回收出 $AlCl_3$ 和 $FeCl_3$，浸出渣再经硫酸在高温高压下溶出，以硫酸钛的形式进入液相，Fe、Al 和 Ti 的浸出率均超过 90%。湿法酸浸工艺回收赤泥中的 Ti，工艺流程简单，浸出效率较高，但酸浸提取 Ti 需在高温高压环境下进行，对设备要求高，且后续分离过程复杂，同时产生大量含酸废液，处理成本高。

火法回收赤泥中的 Ti 主要是通过添加焦炭、铵盐、碳酸盐等，在一定温度下焙烧，转化赤泥中的 Fe、Al 等物相，使 Ti、Si 和 Ca 等富集于焙烧渣中，再选择性回收 Ti。Raghavan 等[63]将碳酸钠与赤泥混合均匀后，在 1 000 ℃环境中焙烧 3 h，焙烧渣经过水浸处理后，通过硫酸溶解，Ti 以 $Ti(SO_4)_3$ 的形式进入溶液中，最终产出较高纯度 TiO_2，且 Ti 的回收率达到 75%。Borra 等[64]将 $Ca(OH)_2$、Na_2CO_3、C 和赤泥按一定比例混合后，经过水浸回收 Al，水浸渣再经过磁选回收 Fe，硫酸浸出回收 Ti，最终 Ti 的回收率达到 79%。火法回收赤泥中钛本质需要结合后续湿法的浸出，提高回收钛的纯度，降低提纯的难度。

综上所述，不同工艺回收钛的核心参数与优劣对比见表 5，结合行业的发展趋势，从赤泥中回收钛一般需要结合选矿＋冶炼工艺，实现多种金属的综合利用，根据金属回收物相分布情况，针对性开发设计合理的开发工艺。湿法浸出回收 Ti 工艺流程简单，但浸出率较低，且酸耗高；火法冶炼和湿法联合工艺对 Ti 的回收针对性强，但火法能耗高，易产生大量温室气体。

表 5　不同工艺回收 Ti 的核心参数与优劣对比

Table 5　Comparison of core parameters, advantages and disadvantages of different processes for recycling Ti

工艺	处理药剂	工艺条件	回收率/%	优势	劣势
湿法工艺	H_2SO_4	250～350 ℃、浸出 1.5 h	97	Ti 的浸出率高、工艺流程较简单	高温高压环境中对设备要求高、产生的废酸后续处理成本高
	HCl	常温常压	58		
	硫酸＋草酸＋酒石酸	高温高压、液固比为 3	90		
火法工艺	Na_2CO_3	1 000 ℃、焙烧 3 h	75	选择性高、后续提纯成本低	能耗高、产生大量温室气体
	$Ca(OH)_2/Na_2CO_3/C$	800～1 000 ℃、焙烧 2 h	79		

2.4　钪的回收

赤泥作为回收 Sc 的重要二次资源，经过拜耳法处理后约富集了超过 90%的 Sc，根据原料中 Sc 的成分差异，赤泥中 Sc 的含量一般为 30～150 g/t[65-66]。大量研究发现 Sc 主要富集在铝硅酸盐、金红石、钛铁矿等矿物相中，目前赤泥中 Sc 的回收主要采用湿法和联合工艺。

湿法工艺主要包括酸浸、微生物浸出等。酸浸工艺主要是无机酸和有机酸的浸出，将 Sc 从赋存的化合物中溶出转入液相中，再从浸出液中选择性提取 Sc。常规常压条件从赤泥中浸出 Sc 的效率较低，如广西平果铝业的拜耳赤泥，采用两段盐酸浸出回收 Sc，浸出率为 70%左右[67]。通常需要结合添加剂，优化浸出环境来提升 Sc 的浸出率，降低酸耗。在常温浸出过程中，添加超声波振荡能显著提高浸出反应效率，提升 Sc 的浸出率，王翠珍等[68]在超声波振荡、浸出温度 60 ℃的条件下，充分反应 10 min，Sc 的浸出率达到 93%。硝酸也可作为浸出

剂,室温条件下对赤泥中 Sc 的浸出率达到 80%左右[69]。在工业生产中,HCl 和 HNO_3 对设备的腐蚀性强,因此应用较少。H_2SO_4 浸出赤泥中 Sc 的研究和应用更广泛,常温环境下 H_2SO_4 对赤泥中 Sc 的浸出率能达到 75%~80%[70]。Borra 等[71]采用硫酸浸出赤泥中的 Sc,在浓度 6 mol/L、固液比 1∶50 的条件下浸出 24 h,最终 Sc 的浸出率达到 75%,后续还能通过添加 H_2O_2,强化浸出效果。为了降低酸耗成本,大量的研究采用工业废酸(炼钢废酸、钛白废酸等)浸出赤泥,Bhilare 等[72]采用废酸溶解赤泥中的 Sc,浸出过程中 Fe 和 Al 转化为铁铝副盐,具有一定絮凝作用,浸出液中 Sc 的浓度能达到 10 mg/L,再采用树脂进行选择性吸附富集。微生物浸出技术作为绿色工艺,通过菌株代谢和矿化作用,溶解二次资源中的有价金属,且已经得到了良好的推广应用,在赤泥的处理中也有涉及。Qu 等[73]以 RM-10 菌株处理贵州中铝赤泥,在 2%矿浆质量浓度下,Sc 的浸出率达到 75%。但整体处理效率较低,赤泥高碱复杂的环境严重影响菌株的繁殖代谢,使得该工艺还需深入验证。

火法工艺回收赤泥中的 Sc,主要是向赤泥中加入还原剂(碳粉、无烟煤等)和 CaO,经过高温焙烧,对铁物相进行还原,促进 Sc 和 Fe 的分离,减少杂质 Fe 对 Sc 的影响。除此之外,还能将赤泥与浓硫酸混合,再经过熟化焙烧,将 Sc 转变成易溶于水的硫酸盐,实现选择性回收[74]。Anawati 等[75]对比了不同焙烧温度对硫酸熟化赤泥的影响,研究结果表明,在 200 ℃条件下 Fe 转变成 $(H_3O)Fe(SO_4)_2$,经过水浸后 Sc 的浸出率为 60%,经 400 ℃熟化焙烧,Fe 转变成 $Fe_2(SO_4)_3$,水浸后 Sc 的浸出率达到 83%。

目前,工业生产中从赤泥里提取 Sc 主要是通过联合工艺进行回收,单一的湿法或火法不仅成本高,试剂消耗量大,且回收纯度低,需要结合不同有价金属的性质综合回收,以提升经济效益。联合工艺主要包括高温熔炼-磁选-高压酸浸、氯化钠离析焙烧-磁选-酸浸等,并取得了良好的应用效果[76-77]。Rivera 等[78]将赤泥与 CaO、SiO_2 和焦炭按比例混合后,经高温熔炼磁选分离回收 Fe,再经过高温高压溶出,选择性回收 Sc,工艺流程如图 3 所示。

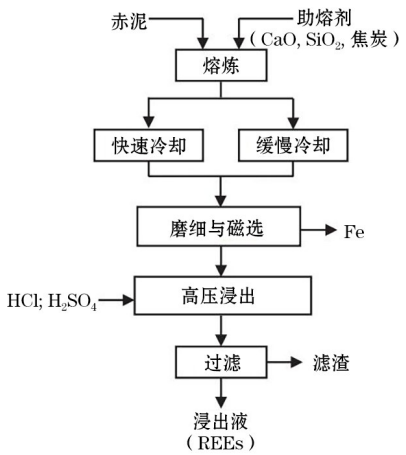


图 3 高温熔炼-磁选-高压浸出回收 Sc 的工艺流程

Fig.3 Process flow for recovering Sc through high-temperature melting-magnetic separation-high-pressure leaching

综上所述,湿法工艺回收 Sc 具有流程短、操作简单的优势,但后续提取难度大,且浸出酸耗高;联合工艺适用于梯级回收赤泥中不同有价金属,但流程复杂,不同工艺回收 Sc 的核心参数与优劣对比见表 6。总体而言,赤泥中回收 Sc 的工艺比较成熟,主要考虑综合成本。

表 6 不同工艺回收 Sc 的核心参数与优劣对比

Table 6 Comparison of core parameters, advantages and disadvantages of different processes for recycling Sc

工艺	处理手段/药剂	工艺条件	回收率/%	优势	劣势
湿法工艺	HCl	常温常压,两段酸浸	70	浸出回收率较高、操作简单	选择性较低、Sc 的含量低、回收难度高
	HCl	超声振荡,60 ℃,浸出 10 min	93		
	H_2SO_4	常温常压,固液比 1∶50,浸出 24 h	75		
	微生物	RM-10 菌株	75		
火法工艺	H_2SO_4 熟化焙烧	400 ℃	83	反应效率高、选择性较强	能耗较高

2.5 典型回收工艺对比

为更清晰地对比拜耳法赤泥中 Fe、Al、Ti、Sc 等主要有价金属回收工艺的性能,本小节从工艺类型、核心条件、目标金属、回收率、核心优势、主要劣势 6 个方面进行系统总结,为工艺选择与优化提供参考,具体见表 7。

表 7 拜耳法赤泥有价金属典型回收工艺对比

Table 7 Comparison of typical recovery processes for valuable metals in bayer process red mud

工艺类型	核心条件	目标金属	回收率/%	核心优势	主要劣势
物理选矿-磁选	SLon 立环脉动高梯度磁选机，1.0 T 粗选、0.65 T 精选	Fe	55～60	操作简单、成本低、二次污染小	回收率低、铁精矿 Al 含量高
还原焙烧-磁选（煤系还原剂）	1 500 ℃、焙烧 0.5 h，无烟煤+石墨为还原剂	Fe	92.8	铁精矿品位和回收率高	能耗高、消耗化石能源、产生温室气体
还原焙烧-磁选（气体还原剂）	480 ℃、焙烧 50 min，H_2 为还原剂	Fe	87	焙烧温度低、效率高	铁精矿 Al 含量高、还原气体成本高
酸浸法（草酸）	75 ℃、1 mol/L 草酸，液固比 15 mL/g、浸出 2 h	Fe	96	反应条件温和、浸出率高	酸耗高、后续分离提纯复杂
酸浸法（H_2SO_4）	100 ℃、浸出 1 h	Al	93.01	浸出率高、操作简单	酸耗大，浸出渣具有强酸性，需二次处理
碱浸法	280 ℃、苛碱比 20	Al	70	选择性强、实现赤泥脱碱、可并入拜耳法	设备要求高、投资成本高
碱烧结法	1 000 ℃、焙烧 1.5 h，$CaO+Na_2CO_3$+碳粉为助剂	Al	89.7	针对性强、铝产品纯度高、试剂消耗少	高温焙烧能耗高
酸浸法（H_2SO_4）	250～350 ℃、浸出 1.5 h	Ti	97	浸出率高、工艺流程简单	高温高压、设备要求高、废酸处理成本高
火法-湿法联合法	800～1 000 ℃ 焙烧，$Ca(OH)_2+Na_2CO_3$+C 为助剂，硫酸浸出	Ti	79	选择性强、多金属综合回收、提纯成本低	能耗高、工艺流程复杂
酸浸法（盐酸，超声辅助）	60 ℃、超声振荡、浸出 10 min	Sc	93	浸出率高、操作简单	设备腐蚀性强、选择性低、后续回收难度大
硫酸熟化焙烧	400 ℃、硫酸焙烧后水浸	Sc	83	反应效率高、选择性强	能耗较高

3 结论及展望

3.1 结论

本文通过系统综述拜耳法赤泥的基本性质、危害及 Fe、Al、Ti、Sc 等有价金属的回收研究现状，对比不同回收工艺的作用原理、工艺条件、回收率及优劣势，得出以下主要结论。

(1) 拜耳法赤泥是氧化铝生产的大宗固体废弃物，我国年产生量超 1 亿 t，其强碱性、高重金属含量的特性带来了严重的环境风险，同时富含 40%～60% Fe_2O_3、10%～20% Al_2O_3、1%～10% TiO_2 及 30～150 g/t Sc，是极具价值的二次资源，在国家大宗固废综合利用政策支持下，综合利用率已从 4% 提升至 12% 左右。

(2) 赤泥提 Fe 的物理选矿法操作简便但回收率仅为 55%～60%，还原焙烧-磁选法回收率可达 87%～92.8%，其中生物质还原剂契合“以废治废”理念，是未来优化方向；酸浸法 Fe 浸出率达 96%，但酸耗高。

(3) 赤泥提 Al 的酸浸法浸出率达 93.01%，但存在酸耗高和二次污染问题，碱浸法可实现脱碱与提铝协同，碱烧结法回收率达 89.7%，且产品纯度高，是目前工业主流工艺，钙化-碳化法回收率 75%，但流程繁琐，尚未工业化应用。

(4) 赤泥提 Ti 采用硫酸高温高压法浸出率达 97%，混合酸浸和两段浸出可提升效率，火法-湿法联合法回收率达 75%～79%，能实现多金属综合回收，是工艺发展方向。

(5) 赤泥提 Sc 的超声辅助盐酸浸出率达 93%，硫酸熟化焙烧浸出率为 83%，工业中以高温熔炼-磁选-高压酸浸联合工艺为主，可实现梯级回收，但流程复杂、成本偏高。

(6) 单一工艺难以实现赤泥有价金属的高效综合回收，物理法优势为低成本、低污染，火法工艺优势为回收率高、物相转变效果好，湿法工艺优势为反应条件温和、绿色低碳，联合工艺能整合各工艺优势，提升综合利用效益。

3.2 展望

结合当前研究现状与工业应用需求，针对拜耳法赤泥有价金属综合回收存在的回收率偏低、能耗高、成本高、流程复杂等问题，未来研究与发展应聚焦以下 4 个方向。

(1) 强化拜耳法前端物相调控：传统物理选矿在氧化铝企业提铁中应用广泛，但铁精矿 Al 含量高，需通过优化前端湿法工艺实现铁矿物与其他矿物的物相调控，提升分离效率，降低后续冶炼成本，同时结合设备升级，进一步提高物理法的回收效率。

(2) 研发赤泥处理绿色新工艺：微生物浸出、生物质还原等绿色工艺契合“双碳”目标，但目前微生物菌株对赤泥高碱、高重金属环境适应性差，处理效率偏低；需结合基因工程筛选抗强碱、抗重金属的高效菌株，优化生物质热解工艺，提升绿色工艺的处理

效果,推动其规模化工业应用。

(3) 开发个性化联合工艺:根据不同地区拜耳法赤泥的成分差异,设计“物理法+火法+湿法”个性化联合工艺,发挥各工艺优势,实现 Fe、Al、Ti、Sc 等有价金属的梯级回收,同时同步实现赤泥脱碱、无害化,提升综合利用经济效益与环境效益。

(4) 拓展赤泥高值化材料制备途径:除有价金属回收外,利用赤泥的比表面积、孔隙率及硅酸盐成分优势,研发赤泥基吸附材料、建筑材料、陶瓷材料等高值化产品,拓宽赤泥消纳渠道,从源头减少赤泥堆存,实现赤泥的全组分综合利用。

目前,赤泥有价金属回收的大量研究在实验室阶段已取得良好效果,但在工艺规模化、成本控制、设备适配性等方面与工业大规模应用仍存在差距,通过持续的技术创新与工艺改良,将为拜耳法赤泥的资源化、无害化、减量化利用提供可行路径,推动氧化铝行业绿色高质量发展。

参考文献(References):

[1] 李帅,周斌,刘万超,等.赤泥综合利用产业化现状、存在问题及解决方略探讨[J].中国有色冶金,2022,51(5):32-36.
Li Shuai, Zhou Bin, Liu Wanchao, et al. Statusquo, problems and solutions of red mud comprehensive utilization [J]. China Nonferrous Metallurgy,2022,51(5):32-36.

[2] Albqmi M, Belaiba A, Hodaifa G. Red mudefficient catalyst for the treatment of real olive mill wastewater through advanced oxidation toward greener and sustainable practices [J]. Journal of Water Process Engineering,2025,78:108685.

[3] 杜云鹏,童雄,谢贤,等.赤泥中钪等有价金属资源综合利用现状及展望[J].中国稀土学报,2023,41(2):256-271.
Du Yunpeng, Tong Xiong, Xie Xian, et al. Current status and prospect of comprehensive utilization of valuable metal resources such as scandium in red mud[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths,2023,41(2):256-271.

[4] Fang C J, Lou R X, Ju Y, et al. Critical metal recovery from red mud:a systematic review of sustainable extraction technologies and circular economy potential[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering,2025,13(5):118985.

[5] Alkan G, Yagmurlu B, Cakmakoglu S, et al. Novel approach for enhanced scandium and titanium leaching efficiency from bauxite residue with suppressed silica gel formation[J]. Scientific Reports,2018,8:5676.

[6] Tang Y J, Wan Z Y, Luo Y F, et al. Metagenomic insight into microbial regulation of nutrient cycling in amended bauxite residue under various planting strategies: implications for soil formation[J]. Applied Soil Ecology, 2025,215:106469.

[7] 方舒雅,黄艳芳,孙虎,等.赤泥建筑材料化利用技术研究进展[J].化工矿物与加工,2026,55(2):39-48.
Fang Shuya, Huang Yanfang, Sun Hu, et al. Research progress on utilization technology of red mud building materials[J]. Industrial Minerals and Processing, 2026, 55 (2):39-48.

[8] 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.
Pan Xiaolin, Lyu Zhongyang, Wu Hongfei, et al. Research status and prospect of iron and aluminum recovery technology from red mud [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2023,33(11):3879-3899.

[9] Aslam M M A, Sun T T, Dai M, et al. Technologies for recovery of iron from red mud: processes, challenges and opportunities[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2024,41:e01053.

[10] 耿超,郭士会,刘志国,等.赤泥资源化综合利用现状及展望[J].中国有色冶金,2022,51(5):37-45.
Geng Chao, Guo Shihui, Liu Zhiguo, et al. Current situation and prospect of red mud resource comprehensive utilization[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2022, 51(5): 37-45.

[11] Li S W, Pan J, Zhu D Q, et al. A new route for separation and recovery of Fe, Al and Ti from red mud[J]. Resources, Conservation and Recycling,2021,168:105314.

[12] Pan X L, Wu H F, Lyu Z Y, et al. Recovery of valuable metals from red mud:a comprehensive review[J]. Science of the Total Environment,2023,904:166686.

[13] 潘昭帅,张照志,张泽南,等.中国铝土矿进口来源国国别研究[J].中国矿业,2019,28(2):13-17+24.
Pan Zhaoshuai, Zhang Zhaozhi, Zhang Zenan, et al. Research on the country of origin of China's bauxite imports [J]. China Mining Magazine,2019,28(2):13-17+24.

[14] Zhang Yuan, Wang Yongshuai, Cui Hongyou, et al. Co-pyrolysis of biomass with Red Mud:An efficient approach to improving bio-oil quality and resourceful utilization of the iron in red mud[J].Fuel,2024,355:129482.

[15] 闫杰,汪佳,柯军,等. 赤泥提取元素及制备功能材料高值化利用研究进展[J/OL]. 耐火材料: 1-10[2026-03-04]. https://link.cnki.net/urlid/41.1136.TF.20251119.1342.002.
Yan Jie, Wang Jia, Ke Jun, et al. Research progress on high-value utilization of red mud for element extraction and preparation of functional materials[J/OL]. Refractories: 1-10[2026-03-04]. https://link. cnki. net/urlid/41. 1136. TF. 20251119.1342.002.

[16] Liu X, Han Y X, He F Y, et al. Characteristic, hazard and iron recovery technology of red mud: a critical review[J]. Journal of Hazardous Materials,2021,420:126542.

[17] Wang S H, Jin H X, Deng Y, et al. Comprehensive utilization status of red mud in China: a critical review[J]. Journal of Cleaner Production,2021,289:125136.

[18] 孙开.回收高铁赤泥并制备镍铁合金的研究[D].洛阳：河南科技大学，2022.
Sun Kai. Study on recovery of high-iron red mud and preparation of nickel-iron alloy [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2022.

[19] Jiang Y X, He L, Tang Y, et al. High-efficiency removal of fluoride ions in real fluorine-containing wastewater using red mud-metakaolin based geopolymer microspheres[J]. Applied Clay Science, 2026, 285: 108145.

[20] 杨思瑜，李豫鲁，王佳怡，等.地聚物砂浆性能试验研究[J].土木工程与绿色建筑，2026，2(1)：82-86.
Yang Siyu, Li Yulu, Wang Jiayi, et al. Experimental study on properties of geopolymer mortar[J]. Civil Engineering and Green Building, 2026, 2(1): 82-86.

[21] 于目深，王旭江，孙德强，等.赤泥资源化利用现状研究[J].中国矿业，2022，31(6)：1-9.
Yu Mushen, Wang Xujiang, Sun Deqiang, et al. Research on the current situation of red mud resource utilization[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(6): 1-9.

[22] 赵梓，赵爱春，叶鑫，等.赤泥在铁、钪元素回收及建筑材料领域的研究进展[J].中国有色冶金，2023，52(2)：96-103.
Zhao Zi, Zhao Aichun, Ye Xin, et al. Research progress of red mud in recovery of iron and scandium and building materials field[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2023, 52(2): 96-103.

[23] 刘培坤，姜兰越，杨兴华，等.全重选法赤泥选铁富集性能试验研究[J].轻金属，2017(6)：22-27.
Liu Peikun, Jiang Lanyue, Yang Xinghua, et al. Experimental study on iron concentration performance of full gravity separation method for red mud [J]. Light Metals, 2017(6): 22-27.

[24] Evans K. The history, challenges, and new developments in the management and use of bauxite residue[J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2016, 2(4): 316-331.

[25] Sadangi J K, Das S P, Tripathy A, et al. Investigation into recovery of iron values from red mud dumps[J]. Separation Science and Technology, 2018, 53(14): 2186-2191.

[26] Le T, Ju S H, Koppala S, et al. Kinetics study of microwave enhanced reactions between diasporic bauxite and alkali solution[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 749: 652-663.

[27] Wang K, Liu Y, Zhang T A, et al. Investigation of the smelting reduction mechanism and of iron extraction from high iron red mud[J]. Materials Research Express, 2020, 7(12): 126574.

[28] Gao F, Zhang J H, Deng X J, et al. Comprehensive recovery of iron and aluminum from ordinary bayer red mud by reductive sintering-magnetic separation-digesting process [J]. JOM, 2019, 72(9): 2936-2943.

[29] Samouhos M, Taxiarchou M, Pilatos G, et al. Controlled reduction of red mud by H_2 followed by magnetic separation [J]. Minerals Engineering, 2017, 105: 36-43.

[30] Yuan S, Liu X, Gao P, et al. A semi-industrial experiment of suspension magnetization roasting technology for separation of iron minerals from red mud[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 394: 122579.

[31] Liu X, Gao P, Yuan S, et al. Clean utilization of high-iron red mud by suspension magnetization roasting[J]. Minerals Engineering, 2020, 157: 106553.

[32] Yu J Q, Guo Q H, Gong Y, et al. A review of the effects of alkali and alkaline earth metal species on biomass gasification [J]. Fuel Processing Technology, 2021, 214: 106723.

[33] Liu J X, Huang S M, Chen K, et al. Preparation of biochar from food waste digestate: pyrolysis behavior and product properties[J]. Bioresource Technology, 2020, 302: 122841.

[34] 彭昌盛，魏茜茜，赵婷婷，等.太阳能热解技术制备生物炭的研究进展[J].现代化工，2022，42(2)：61-67.
Peng Changsheng, Wei Xixi, Zhao Tingting, et al. Research progress on preparation of biochar by solar pyrolysis technology[J]. Modern Chemical Industry, 2022, 42(2): 61-67.

[35] 钟宏，武芳芳，王帅，等.一种对赤泥进行磁化焙烧-磁选的方法：201610956537.4[P].2017-03-29.

[36] Li G H, Luo J, Jiang T, et al. Digestion of alumina from non-magnetic material obtained from magnetic separation of reduced iron-rich diasporic bauxite with sodium salts[J]. Metals, 2016, 6(11): 294.

[37] Rao M J, Zhuang J Q, Li G H, et al. Iron recovery from red mud by reduction roasting-magnetic separation[J]. Light Metals, 2013: 125-130.

[38] Agrawal S, Rayapudi V, Dhawan N. Microwave reduction of red mud for recovery of iron values[J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2018, 4(4): 427-436.

[39] Lee S O, Tran T, Park Y Y, et al. Study on the kinetics of iron oxide leaching by oxalic acid[J]. International Journal of Mineral Processing, 2006, 80(2/3/4): 144-152.

[40] Yang Y, Wang X W, Wang M Y, et al. Recovery of iron from red mud by selective leach with oxalic acid [J]. Hydrometallurgy, 2015, 157: 239-245.

[41] 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.

[42] Yu Z L, Shi Z X, Chen Y M, et al. Red-mud treatment using oxalic acid by UV irradiation assistance [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(2): 456-460.

[43] Liu Y, Naidu R. Hidden values in bauxite residue (red mud): recovery of metals[J]. Waste Management, 2014, 34(12): 2662-2673.

[44] 何耀.拜尔法赤泥利用现状及高效资源化利用新技术[J].矿产综合利用,2022(4):106-110.
He Yao. Current utilization status of Bayer process red mud and new technologies for efficient resource utilization[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(4): 106-110.

[45] Man K X, Zhu Q, Li L, et al. Preparation and performance of ceramic filter material by recovered silicon dioxide as major leached component from red mud[J]. Ceramics International, 2017, 43(10): 7565-7572.

[46] 赵恒,李望,牛泽鹏,等.赤泥制备聚合硫酸铝铁及其处理废水的研究[J].材料导报,2020,34(增刊 2):21038-21044.
Zhao Heng, Li Wang, Niu Zepeng, et al. Research on preparation of poly aluminum ferric sulfate from red mud and its application in wastewater treatment[J]. Materials Reports, 2020, 34(Suppl.2): 21038-21044.

[47] 于海燕,潘晓林,杨再明,等.钙铁榴石一步碱热法处理拜耳法赤泥生产铝酸钠的方法:201710487195.0[P].2017-10-13.

[48] 潘晓林,吴鸿飞,于海燕.一种综合处理高钙赤泥和高铁赤泥的方法:2021110599533.6[P].2021-09-03.

[49] Li X B, Wang Y L, Zhou Q S, et al. Reaction behaviors of iron and hematite in sodium aluminate solution at elevated temperature[J]. Hydrometallurgy, 2018, 175: 257-265.

[50] Zhang R, Zheng S L, Ma S H, et al. Recovery of alumina and alkali in Bayer red mud by the formation of andradite-grossular hydrogarnet in hydrothermal process[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 189(3): 827-835.

[51] 吴小华,李雯霏.广西高铁赤泥高值化综合利用途径[J].中国有色冶金,2023,52(2):104-115.
Wu Xiaohua, Li Wenfei. Approaches for high-value comprehensive utilization of high-iron red mud in Guangxi[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2023, 52(2): 104-115.

[52] Li X B, Xiao W, Liu W, et al. Recovery of alumina and ferric oxide from Bayer red mud rich in iron by reduction sintering[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(5): 1342-1347.

[53] 周秋生,范旷生,李小斌,等.采用烧结法处理高铁赤泥回收氧化铝[J].中南大学学报(自然科学版),2008,39(1):92-97.
Zhou Qiusheng, Fan Kuangsheng, Li Xiaobin, et al. Recovery of alumina from high-iron red mud by sintering process[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2008, 39(1): 92-97.

[54] 陈颖,陈延信,赵博,等.拜耳法赤泥低钙烧结提铝反应机理研究[J].非金属矿,2021,44(4):80-84.
Chen Ying, Chen Yanxin, Zhao Bo, et al. Research on reaction mechanism of aluminum extraction from Bayer red mud by low-calcium sintering[J]. Non-Metallic Mines, 2021, 44(4): 80-84.

[55] Zhu X F, Zhang T A, Wang Y X, et al. Recovery of alkali and alumina from Bayer red mud by the calcification-carbonation method[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2016, 23(3): 257-268.

[56] Zhu X B, Wang L, 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.

[57] 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 on comprehensive utilization of red mud[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(3): 21-27.

[58] 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 Yitao, Li Junqi, Xiao Wei. Experimental investigation on leaching titanium from red mud with acid[J]. Yunnan Chemical Technology, 2009, 36(6): 18-20.

[59] Zimmer E, Nafissi A, Winkhaus G. Reclamation treatment of red mud: US88401478A[P]. 1978-10-10.

[60] Thakur R S, Das S N. Red mud analysis and utilization[J]. Wiley Eastern New Delhi, 1994: 18-20.

[61] 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(增刊 1):819-821.
Cao Lijun, Li Junqi, Xu Benjun. Experimental study on enrichment of titanium from red mud by hydrochloric acid leaching[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2008, 26(Suppl.1): 819-821.

[62] 李望,赵恒,朱晓波,等.一种赤泥选择性浸出提取钛的方法:201710762285.6[P].2017-12-15.

[63] Raghavan P K N, Kshatriya N K. Recovery of metal values from red mud[J]. Light Metals, 2016: 103-106.

[64] 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.

[65] 李亮星,黄茜琳.从赤泥中提取钛的试验研究[J].湿法冶金,2011,30(4):323-325.
Li Liangxing, Huang Qianlin. Experimental study on extraction of titanium from red mud[J]. Hydrometallurgy of China, 2011, 30(4): 323-325.

[66] Agatzini-Leonardou S, Oustadakis 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(2/3): 579-586.

[67] 姜武.广西平果铝厂赤泥中钪的提取实验研究[D].太原:太原理工大学,2014.
Jiang Wu. Experimental study on extraction of scandium from red mud of Pingguo Aluminum Plant in Guangxi[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014.

[68] 王翠珍,周广柱,宋芳,等.超声振荡条件下赤泥盐酸介质浸提钪的研究[J].无机盐工业,2013,45(5):44-46.
Wang Cuizhen, Zhou Guangzhu, Song Fang, et al. Study on leaching of scandium from red mud in hydrochloric acid medium under ultrasonic oscillation[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2013, 45(5): 44-46.

[69] Ochsenkühn-petropoulou M, Lyberopulu T, Ochsenkühn K M, et al. Recovery of lanthanides and yttrium from red mud by selective leaching[J]. Analytica Chimica Acta,1996,319(1/2):249-254.

[70] 张璇.赤泥钪资源回收工艺基础研究[D].沈阳:辽宁大学,2018.
Zhang Xuan. Basic research on recovery process of scandium resource from red mud[D]. Shenyang:Liaoning University,2018.

[71] Borra C R, Pontikes Y, Binnemans K, et al. Leaching of rare earths from bauxite residue (red mud)[J]. Minerals Engineering,2015,76:20-27.

[72] Bhilare N G, Shinde V M. Extraction and separation of scandium salicylate with triphenylphosphine oxide [J]. Fresenius' Journal of Analytical Chemistry,1997,357(4):462-463.

[73] Qu Y, Lian B. Bioleaching of rare earth and radioactive elements from red mud using Penicillium tricolor RM-10[J]. Bioresource Technology,2013,136:16-23.

[74] Alkan G, Yagmurlu B, Gronen L, et al. Selective silica gel free scandium extraction from iron-depleted red mud slags by dry digestion[J]. Hydrometallurgy,2019,185:266-272.

[75] Anawati J, Azimi G. Recovery of scandium from Canadian bauxite residue utilizing acid baking followed by water leaching[J]. Waste Management,2019,95:549-559.

[76] 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.

[77] Liu Z B, Zong Y B, Li H X, et al. Selectively recovering scandium from high alkali Bayer red mud without impurities of iron, titanium and gallium[J]. Journal of Rare Earths, 2017,35(9):896-905.

[78] Rivera R M, Xakalashe B, Ounoughene G, et al. Selective rare earth element extraction using high-pressure acid leaching of slags arising from the smelting of bauxite residue [J]. Hydrometallurgy,2019,184:162-174.