

高硅低品位铝土矿脱硅技术研究进展与展望

刘宇哲¹, 何春林^{2,3}, 孙元¹, 雷宇¹, 刘帅⁴, 张洪宇¹, 周亦霄¹

- (1. 中国科学院金属研究所 师昌绪先进材料中心, 辽宁 沈阳 110016;
2. 广西大学 省部共建特色金属材料与组合结构全寿命安全国家重点实验室, 广西 南宁 530004;
3. 广西大学 资源环境与材料学院, 广西 南宁 530004;
4. 沈阳工业大学 环境与化学工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要:我国铝土矿以沉积型一水硬铝石为主, 其中黏土矿物发育, 铝矿物与含硅脉石细粒共生, 导致其具有高硅、低铝硅比特征, 难以满足拜耳法生产要求, 且随着优质铝土矿资源不断减少, 高效脱硅提质已成为保障我国铝产业安全发展的关键。本文系统综述了低品位铝土矿脱硅技术, 首先分析了资源分布与矿石特征, 揭示了矿物嵌布对分选的制约机制; 进而重点论述了物理分选(重选、浮选)、化学法、微波活化、钙化-碳化法等主要脱硅技术, 对比了各技术路线的脱硅效率、经济成本与环境影响。其中, 浮选虽为主流技术, 但因微细粒嵌布导致选择性降低; 化学法与能场强化可突破解离瓶颈, 但能耗高、流程复杂; 钙化-碳化法通过耦合脱硅与赤泥资源化, 代表了绿色冶金方向。最后指出脱硅技术选择应基于矿相特征差异化适配, 技术路径选择要从单一指标转向能效、硅去向与固废属性综合权衡, 以推动我国高硅铝土矿高效、绿色、高值化利用, 实现铝产业的可持续发展。

关键词:高硅铝土矿; 脱硅; 浮选; 化学法; 工艺矿物学; 资源综合利用; 研究进展

中图分类号:TF821 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2617(2026)04-0455-12

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2026.04.001

铝土矿是氧化铝生产的基础原料, 其资源特征与利用方式直接影响氧化铝工业的发展^[1]。我国铝土矿以沉积型一水硬铝石矿为主, 矿石中常伴生高岭石、伊利石、石英等含硅脉石矿物, 普遍表现出高硅、低铝硅比及矿物嵌布关系复杂等特点^[2-3]。与国外部分高品位红土型铝土矿相比, 我国铝土矿在原料性质和利用条件上存在明显差异, 因此高硅低品位铝土矿的脱硅提质及高效利用逐渐成为相关研究关注的重点^[4-5]。目前, 围绕高硅低品位铝土矿的开发利用, 国内外已开展了较多研究, 并形成了物理分选、化学脱硅、能场强化及钙化-碳化等多种技术路径^[1,4]。由于不同方法在脱硅机制、适用矿石类型、工艺流程、成本投入及环境影响等方面存在差异, 且其应用效果往往受矿石性质和工艺条件制约, 因此对相关研究进展进行系统梳理和对

比分析, 能够为高硅低品位铝土矿的工艺优化与资源综合利用提供依据。

本文总结了铝土矿资源分布、品位结构及工艺矿物学特征, 综述了主要高硅低品位铝土矿脱硅技术, 主要包括重选、筛分、浮选、化学法、微波活化及钙化-碳化法等, 归纳了各类方法的基本原理、适用对象及研究现状。同时, 结合矿物组成、硅赋存状态和铝硅嵌布关系, 分析了矿石性质对脱硅行为及技术适配性的影响。

1 铝土矿资源概况与工艺矿物学特征

1.1 全球铝土矿资源分布与工艺矿物学特征

铝土矿是氧化铝生产不可替代的基础原料, 其资源禀赋直接影响氧化铝工业的原料供给格局与成本结构^[6]。全球主要铝土矿资源国的成矿类型、储量及矿石特征见表 1。

收稿日期: 2026-03-15; 修订日期: 2026-03-28

基金项目: 省部共建特色金属材料与组合结构全寿命安全国家重点实验室开放课题项目(MMCS2023OF01); 国家自然科学基金青年基金(52401067); 辽宁省科学技术计划项目应用基础研究计划(2025JH2/101330025)。

第一作者简介: 刘宇哲(1994—), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为高温合金二次资源循环利用。

通信作者简介: 何春林(1985—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为吸附功能材料合成。E-mail: helink1900@126.com。

孙元(1980—), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为焊接修复、战略金属二次资源循环再利用。E-mail: yuansun@imr.ac.cn。

据保守估计,全球铝土矿资源量达 550 亿 t^[7],主要分布在非洲、大洋洲、南美洲及加勒比地区,其中几内亚、澳大利亚、巴西、越南等国资源较为集中。几内亚的桑加雷迪矿床和澳大利亚的韦帕矿矿物纯度处于全球前列,这两国是当前全球铝土矿供应体系的关键支点^[8]。从成矿类型与矿石品质的对应关系分析,国外主要铝土矿资源国以红土型铝土矿为主,核心含铝矿物通常为三水铝石,矿石铝硅比较高、反应硅较低,较适于用拜耳法处理^[9]。相比之下,我国铝土矿以沉积型(岩溶堆积改造型)一水硬铝石矿为主,其储量占全国铝土矿资源总量的 95% 以上。我国铝土矿的含铝矿物多为一水硬铝石,常伴生黏土类矿物,普遍呈现高硅、低铝硅比及杂质组成复杂等特征^[5]。此外,我国铝土矿储量占全球比例较低,储采比偏紧,优质资源保障能力有限,这使得氧化铝产业在原料供给安全和加工成本控制方面面临较大压力^[10]。

影响铝土矿利用效果的关键因素除了平均品

位,还包括矿相组成、硅的赋存状态及矿物嵌布关系等可选冶性特征^[11]。海外典型红土型铝土矿的核心含铝矿物为三水铝石,该矿物与赤铁矿、针铁矿等含铁矿物常呈细粒弥散或胶结状共生。在此类共生关系中,铁氧化物多以基质形式充填于铝土矿间隙或对铝矿物形成包裹,致使部分矿段“除铁保铝”面临较大难度。因此,在实际生产中,需结合粒度解离特性与工艺分选方法进行优化^[12]。相比之下,中国岩溶型矿中高岭石等黏土脉石与一水硬铝石嵌布关系更为紧密,硅多以黏土态或细粒形式赋存于矿石中,当这些硅进入溶液体系后,会形成较高反应硅负荷,从而直接增加碱耗,并加剧赤泥产生量及沉降难题^[13]。由于我国铝土矿呈现高硅、低铝硅比及复杂嵌布并存的资源特征,使得中低品位铝土矿无法单纯依赖传统技术路线。为此,需在选矿提质、协同脱硅和过程矿物学约束等方面进行系统优化,以实现铝土矿的高效利用,兼顾技术指标与经济性。

表 1 全球主要铝土矿资源国的成矿类型、储量及矿石特征

Table 1 Mineralization types, reserves and ore characteristics of major global bauxite resource countries

国家	成矿类型	主要铝矿物	铝硅比	储量/亿 t	矿石特征	参考文献
几内亚	红土型	三水铝石	6~10	74	高铝低硅低铁型	[13]
澳大利亚	红土型	三水铝石	5~9	37	低反应硅高品位型	[14]
巴西	红土型	三水铝石	6~9	17	高铁红土型	[15]
牙买加	红土型	三水铝石	5~8	20	喀斯特红土型	[16]
印度尼西亚	红土型	三水铝石	5~7	29	低硅结核型	[17]
越南	红土型、岩溶型	三水铝石、一水硬铝石	4~7	31	玄武岩风化红土型	[18]
印度	红土型	三水铝石	3~7	6.5	区域差异复合型	[19]
中国	岩溶型	一水硬铝石	3~6	7.1	高硅低铝硅比型	[20]

随着高品质铝土矿供给稳定性降低和供应波动不断加剧,针对中低品位铝土矿,尤其是高硅铝土矿的高效选冶技术,已逐渐成为保障氧化铝产业供应链安全的关键方向^[10]。为此,后续研究应进一步从反应硅的矿物学特征入手,重点识别其赋存状态与解离特征,并围绕分选窗口、溶出强化和赤泥减量等关键环节,构建一套可量化的工艺矿物学指标体系,从而为铝土矿资源的高效利用与工艺的精准适配提供理论支撑^[11]。由于矿物学特征是决定分选路径与溶出行为的底层逻辑,因此有必要进一步结合中国铝土矿在资源分布与矿石品位结构上的独特性^[2],厘清其矿物学特征与工艺适配之间的内在关联,进而为差异化技术路径的选择提供科学、可靠的依据。

1.2 中国铝土矿资源特征与利用约束

与国外以三水铝石为主的高品位红土矿相比,我国铝土矿的利用难点更多体现在矿相组成复杂、黏土矿物发育及铝硅嵌布关系紧密等方面。多数矿区硅酸盐杂质含量偏高,高岭石、伊利石等黏土矿物普遍发育,导致矿石铝硅比长期偏低,制约了资源的经济利用^[21]。基于我国铝土矿的资源禀赋特征及氧化铝产业实际需求,本文将高硅低品位铝土矿的结构特征、分选与冶炼技术作为论述重点。从分布格局看,我国铝土矿资源具有明显的区域集中性,华北、华中和西南构成主要供应带,山西、河南、广西和贵州长期支撑国内氧化铝主产区的原料需求^[3,22],各主要省份资源分布及矿石特征见表 2。这种集中布局有利于形成产

业集群规模效应,但也使原料保障对少数矿源依赖较强,主产区矿石质量波动或供给受限将直接影响生产成本和运行稳定性^[10]。近年来,氧化铝产能增长快于国内矿石供给增长,使得进口矿在部分地区的补位作用日益凸显^[4]。沿海企业凭借运输优势,可通过进口矿配矿稳定生产指标;内陆矿源型基地则对本土矿石质量变化更为敏感^[23]。

从成矿类型看,我国以岩溶体系形成的沉积型铝土矿为主,其储量在工业储量中占主导地位。该类矿石的主要含铝矿物为一水硬铝石,常伴生一水软铝石。其中,反应硅主要来自高岭石、伊利石等黏土矿物,北方矿区常见石英与黏土组合形式,而在西南部分矿区铁、钛杂质含量相对更高^[3]。沉积型铝土矿的突出特点是铝矿物与黏土矿物细粒夹杂、紧密共生,硅多以黏土态赋存,难以在较粗粒度下有效解离,导致分选窗口狭窄、脱硅难度较大。在工业生产中,这类矿石多依赖烧结法或拜耳—烧结联合法处理。但随着铝硅比下降,碱耗、赤泥负荷及过程波动均会增加,这对配

矿精度和生产过程控制提出了更高要求^[24]。除沉积型铝土矿外,我国南方局部地区还分布有一定数量的堆积型和少量红土型铝土矿。堆积型矿原矿含泥量较高,细泥夹杂现象明显,这对脱泥、分级、沉降和过滤等预处理环节产生了更为直接的影响^[22-23];红土型矿在我国占比较小,但局部地区具有一定代表性,其主导矿物为三水铝石,矿物组合与海外部分资源较为接近,但矿体规模较小、连续性较差,且杂质含量波动较大,其利用效果仍受到矿物解离程度和分选条件制约^[1]。

总体来看,我国铝土矿开发利用的突出问题在于资源与产能布局集中、沉积型高硅资源占主导,以及难选矿比例持续上升。随着优质资源不断消耗,传统工艺在碱耗、赤泥排放和过程稳定性方面承受的压力日益加大。因此,如何实现高硅低品位铝土矿的脱硅提质与协同选冶,已成为当前研究的关键课题。后续研究应围绕硅的赋存状态、脱硅提质技术路径及低品位资源综合利用策略展开,以为不同类型铝土矿的高效利用提供科学依据。

表 2 中国主要铝土矿省份资源分布及矿石特征

Table 2 Resource distribution and ore characteristics of bauxite in major provinces in China

省份	资源集中区	主要成矿类型	主要含铝矿物	铝硅比	主要杂质矿物	参考文献
山西	汾西、孝义矿区	沉积型	一水硬铝石	3.0~4.5	高岭石、石英	[21]
广西	桂西、桂中矿区	沉积型/堆积型	一水硬铝石,局部三水铝石	5.0~7.0	高岭石、赤铁矿	[23]
贵州	黔中、黔北矿区	沉积型	一水硬铝石	4.0~5.5	高岭石、赤铁矿、钛矿物	[24]
河南	巩义、新安矿区	沉积型	一水硬铝石	3.5~5.0	高岭石、伊利石等黏土矿物	[1,21]
云南	滇东南矿区	沉积型/堆积型	一水硬铝石	4.5~6.0	伊利石等黏土矿物	[25]

注:铝硅比为文献报道的代表性范围值,不同矿区间可能存在波动;其他省份资源规模较小,表中未列出。

2 高硅低品位铝土矿脱硅技术

铝硅比是衡量铝土矿是否适用于拜耳法生产氧化铝的关键指标,通常要求铝硅比大于 8。而我国铝土矿资源中相当比例矿石中高岭石等铝硅酸盐脉石含量高、嵌布粒度细且胶结包裹强,导致其铝硅比较低,在采用拜耳法生产过程中易引发硅的有害相转化及额外碱耗,因此难以直接采用拜耳法处理^[26]。为提升原料适用性并改善物料体系的综合指标,研究者提出了多种利用高硅低品位铝土矿的技术路径,大致可归纳为两大类:一类是通过提高矿石铝硅比以适配拜耳法工艺,主要包括选矿法和化学脱硅法;另一类是直接处理低品位矿物的非传统工艺,涵盖外场强化法及钙

化—碳化改质法等。选矿法的工艺特点是在不改变铝土矿所含矿物质情况下,利用脉石相与铝石相的理化性质差异,去除以硅酸盐为主的脉石矿物,为后续拜耳法生产氧化铝提供高铝硅比的原料^[27]。化学脱硅法主要利用高温焙烧或加入添加剂,使矿石中的含硅矿物发生化学反应分解后在碱液中溶出,从而实现脱硅目的。选矿法和化学脱硅法均是常见的拜耳法处理高硅低品位铝土矿预处理工艺^[17]。外场强化法中的微波活化则利用微波能量瞬间破坏铝土矿中矿物的晶体结构,从而促进铝元素的浸出,是一种为后续拜耳法的预处理步骤;钙化—碳化改质法等则通过两步化学反应实现铝硅分离,并调控赤泥的矿物组成和化学性质,实现赤泥无害化和资源化。

2.1 物理分选预富集技术

2.1.1 重选与物理筛分

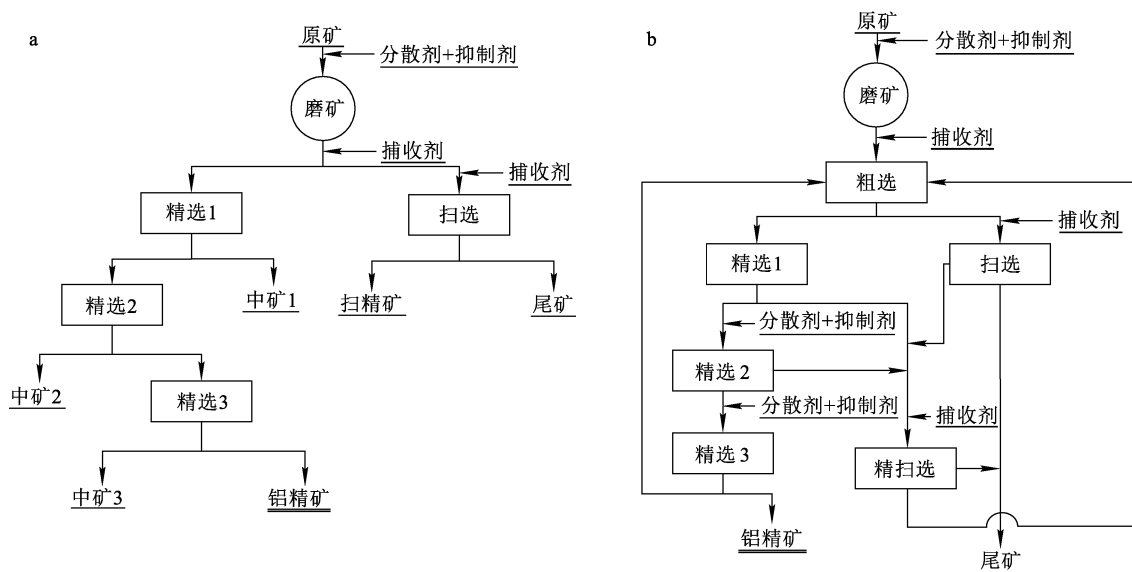
重选与物理筛分通常在高硅低品位铝土矿选别中作为预富集或预抛尾环节。中铝郑州有色金属研究院有限公司基于铝土矿中铁矿物、含铝矿物与含硅矿物之间的比重差异,成功开发出铝土矿有害杂质源头阻断技术:以含 Al_2O_3 51.78%、 Fe_2O_3 16.48%,铝硅比为 4.64 的原矿为原料,通过重选处理获得 Al_2O_3 品位为 55.18%、铝硅比达 6.19 的铝精矿,产率为 89.98%,有效实现了脱硅除铁目的。该技术已通过半工业试验验证^[28]。但重选脱硅技术对微细粒级铝土矿的分选效果有限,且易因硅酸盐矿物过粉碎导致氧化铝损失。其应用效果高度依赖铝矿物与含硅脉石之间是否存在可利用的密度或粒度差异。对于多数沉积型一水硬铝石矿而言,硅脉石常以黏土矿物形式存在,呈微细粒嵌布并胶结包裹铝矿物,解离窗口狭窄,导致单纯依赖筛分或重选难以显著提升铝硅比。因此,当前研究重点与应用主流仍集中于浮选脱硅体系。

2.1.2 浮选

浮选是利用矿物表面物理化学性质差异,从铝土矿中分选一水硬铝石、三水铝石等含铝矿物与石英、高岭石、伊利石等硅酸盐脉石矿物的方法。其核心目标是通过提高铝硅比,使低品位矿

石满足拜耳法生产氧化铝的工艺要求,从而提升资源利用效率与经济价值。浮选效果受多重因素制约,大致可归纳为三类参数:矿石性质参数涵盖矿物组成、嵌布粒度及矿浆 pH、温度等;药剂参数包括捕收剂、抑制剂、活化剂的种类与用量;操作参数则涉及浮选时间、搅拌强度、充气量等工艺条件。从技术路径看,铝土矿浮选脱硅可分为两种基本策略:一是正浮选,即将一水硬铝石等含铝矿物浮起作为精矿,硅酸盐脉石则留于槽内作为尾矿;二是反浮选,即抑制含铝矿物,使石英、高岭石等硅酸盐脉石上浮进入泡沫产品,槽内产品即为铝精矿。

从流程组织看,浮选可分为开路与闭路两种模式。开路浮选流程简单、试验周期短,适用于初步可选性研究及药剂参数筛选;闭路浮选则将中矿返回粗选或精选作业形成循环负荷,以模拟连续生产条件下的稳定分选行为,适用于扩大化验证与工程化评估^[29]。如杨云等^[20]先在开路条件下完成“一粗三精一扫”的参数优化,后续通过闭路试验验证其工程化平衡效果;Zhang N. N. 等^[29]在工业化研究中采用了“一粗一精一扫”闭路流程。可见,流程组织方式直接影响精矿品位与回收率的权衡关系,是工艺对比与适配分析的重要依据。两种典型的浮选试验流程如图 1 所示。



a—开路浮选;b—闭路浮选

图 1 浮选试验流程

Fig. 1 Process flowchart of flotation test

制约浮选效果的多重因素中,矿物解离程度与微细粒干扰是最基础的共性约束。粒度是决定浮选可选性的关键参数。Zhang N. N. 等^[30]在人工混合矿物体系中对比了正浮选与反浮选的有效粒度窗口:正浮选较优粒级为 $-38+20\ \mu\text{m}$ 和 $-54+38\ \mu\text{m}$,反浮选则为 $-74+54\ \mu\text{m}$ 和 $-10\ \mu\text{m}$,并指出反浮选泡沫产物的铝硅比偏高意味着分离效果不理想,据此认为正浮选在提升铝硅比方面更具优势。硬铝石型铝土矿在碎磨过程中易产生微细粒,这些细泥不仅会降低单体解离度,还会导致矿物表面性质趋同、药剂非选择性吸附及泡沫夹带等问题,造成氧化铝回收率下降^[31]。针对“细泥困境”,部分研究提出选择性絮凝作为补充方向:利用聚丙烯酰胺等高分子絮凝剂使一水硬铝石选择性絮凝沉降,而高岭石保持悬浮,从而实现微细颗粒分离富集,最佳 pH 为 $9\sim 10$ ^[32]。该法为解决细粒浮选难题提供了新思路,但其重复性、矿石适应性与规模化稳定性仍需进一步验证。微细粒浮选回收率低的深层原因在于颗粒粒径过小,难以与气泡发生有效碰撞,矿化概率较低;同时比表面积大、表面能高,易导致有用矿物与脉石颗粒间发生非选择性团聚,降低分选效率^[33]。分级浮选可改善颗粒悬浮效果与均匀性,絮凝浮选则通过絮凝剂将微细粒絮凝成较大絮团,使其呈现常规粒级矿物特性,再经捕收剂疏水化后由气泡携带上浮,实现与分散态脉石的分离。

2.1.2.1 反向浮选

反浮选以铝硅酸盐脉石为浮出目标,通常采用阳离子捕收剂,如十二烷基胺(DDA)、季铵盐等,通过静电吸附与复合吸附增强高岭石等矿物疏水性,使其进入泡沫产品,槽内则得到铝精矿。该法的优势在于可直接降低硅脉石对后续拜耳法体系的影响,但其局限性也较为突出,包括铝硅酸盐易发生瞬时上浮、泡沫稳定性过强导致分选窗口变窄,对药剂体系匹配度要求较高等^[34]。

反浮选对 pH 窗口及泡沫行为较为敏感,通常需匹配抑制剂体系,以扩大选择性分离窗口^[35]。阳离子捕收剂具有操作成本低、药剂消耗少、易于脱水及有利于杂质(Ti、Fe、Ca、Mg)去除等优势,已在一水硬铝石型铝土矿反浮选中得到广泛研究^[36]。抑制剂常用的是六偏磷酸钠和淀粉,二者均对一水硬铝石有较强抑制效果;分散剂

用于增加矿浆中微细颗粒与药剂的接触概率,如在浮选前,以碳酸钠进行选择性脱泥,有利于提升浮选指标^[37]。

Birinci 等^[38]以低品位勃姆石型铝土矿(铝硅比=6.36)为对象,采用可溶性玉米淀粉为抑制剂、DDA 为捕收剂进行反浮选,在 $\text{pH}=9\sim 10$ 、DDA 浓度 $6\times 10^{-4}\ \text{mol/L}$ 条件下,铝硅比可提升至 8.54,回收率达 80% 以上,能满足拜耳法初步工艺要求;进一步分析表明,粒度小于 $53\ \mu\text{m}$ 时分离效果最佳,但氧化铝回收率偏低,可能受勃姆石与硅酸盐复杂嵌布关系的制约。

Zhang N. N. 等^[39]以六偏磷酸钠(HMP)和十二烷基胺盐酸盐(DAH)构建反浮选体系,在 $\text{pH}=4$ 、DAH 浓度为 $2\times 10^{-4}\ \text{mol/L}$ 条件下,铝回收率达 80%。研究强调酸处理对矿物表面活性位点的调控作用(图 2),即酸处理可降低一水硬铝石表面铝活性位点密度,使抑制剂在铝矿物与高岭石上的吸附密度均出现下降,但高岭石对捕收剂的吸附与可浮性显著增强,从而有利于提升分离选择性。该工作在吸附性能测试、表面电位分析及分光光度法定量检测矿物含量等层面具有借鉴价值。

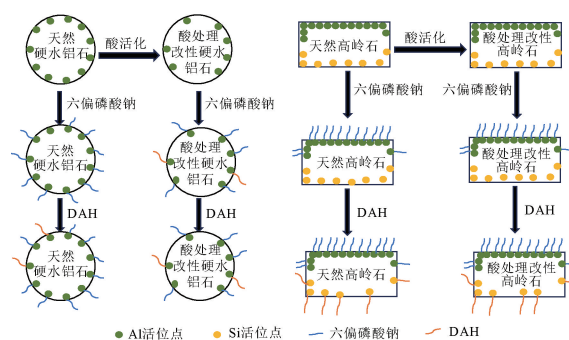


图 2 酸处理对矿物表面活性位点的影响及抑制剂与阳离子捕收剂的吸附示意

Fig. 2 Schematic diagrams of acid treatment effects on mineral surface active sites and adsorption of depressant and cationic collector

2.1.2.2 正浮选

正浮选以含铝矿物为浮出目标,多采用阴离子捕收剂体系,包括脂肪酸及其皂类(以油酸/油酸钠 NaOL 为代表)、磺酸盐、磷酸盐及羟肟酸等螯合型捕收剂^[40]。其吸附机制通常归为化学吸附或表面配合,即捕收剂极性基团与矿物表面铝

活性位点发生作用,增强铝矿物疏水性,实现上浮分离。正浮选在理论上有助于直接获得铝精矿并保持较高铝回收潜力,但其选择性易受捕收剂结构、表面位点竞争吸附及细泥效应的显著影响^[41]。

正浮选中油酸类捕收剂应用广泛但选择性偏弱,研究者通常采用捕收剂结构改性或复配方式提升其选择性。反应温度升高可增加脂肪酸溶解度,增强其在矿物表面的化学吸附,进而影响捕收能力^[42]。在浮选体系中,抑制剂和分散剂也起着重要作用。常用的抑制剂有硅酸钠、淀粉等,常用的分散剂包括碳酸盐及多聚磷酸盐(如六偏磷酸钠、三聚磷酸钠)。其主要作用是改善矿浆分散状态,提高矿粒与药剂的接触概率,同时抑制细泥团聚。但在高剂量条件下可能造成非选择性抑制,降低氧化铝回收率。一般而言,当抑制剂或分散剂浓度过量时,铝硅比会显著提升,但同时也会对铝回收率产生不利影响。

Li H. X. 等^[43]提出采用草酸预处理提升浮选选择性。具体而言,经草酸处理后,矿物表面性质会发生改变,导致油酸钠(NaOL)在一水硬铝石上的吸附量升高,而在高岭石上的吸附量降低。其作用机制在于草酸可破坏高岭石表面铝相关结构并暴露新吸附位点,从而增强一水硬铝石与捕收剂的结合能力,这为提升铝硅比提供了一种新思路。

Fang C. J. 等^[44]研究表明, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 会显著影响一水硬铝石与高岭石回收率,并呈现复杂的浓度与 pH 依赖性。具体而言,随 Ca^{2+} 浓度升高,一水硬铝石回收率先降后升,高岭石回收率先升后降;随 Mg^{2+} 浓度升高,一水硬铝石回收率降低,高岭石回收率先升后降。在不同 pH 条件下,这两种离子对浮选的影响也存在差异:在 $\text{pH}=4\sim 7$ 条件下, Ca^{2+} 能促进一水硬铝石浮选,而在 $\text{pH}=8\sim 9$ 条件下, Mg^{2+} 对一水硬铝石的浮选有抑制作用。研究认为,水质离子对正浮选效果的影响不应简单视为干扰因素,而应作为工程化适配过程的关键边界条件加以考量。

杨云等^[20]选用 EM505 为铝矿物捕收剂,六偏磷酸钠为分散剂(兼具螯合/抑制功能),碳酸钠作为 pH 调整剂和分散剂,采用“一粗三精一扫”开路流程进行参数优化,在扩大化阶段以闭路流程验证。结果表明,适量添加六偏磷酸钠可抑制

铝硅酸盐上浮,但当其添加量过量时,也会对一水硬铝石产生抑制作用。对铝硅比为 3.12、 Al_2O_3 品位为 44.45% 的原矿,经闭路浮选后可获得产率为 61.63%、铝硅比为 6.16、 Al_2O_3 品位为 56.14%、回收率为 77.84% 的铝精矿。

从适用范围看,正浮选适用于矿物组成简单、解离度好、含泥量低的矿石,如一水硬铝石型铝土矿,但易发泡,浓缩过滤难度较大,精矿水分较高;反浮选对铝硅酸盐具有较高选择性,适用于品位较高、成分复杂、粒度较细的矿石,如三水铝石型矿石^[45]。两种路径的优劣取决于矿石性质与工艺目标的匹配程度,需结合具体资源条件进行差异化选择。对于嵌布粒度极细、共生关系复杂的难选矿石,单一的浮选工艺往往难以实现硅与目标矿物的深度分离,因此需进一步引入化学法进行深度脱硅。

2.2 化学法

化学法提高铝硅比的核心在于利用铝矿物与硅矿物在化学性质上的反应性差异,实现“硅优先去除”或“固硅相转化”,从而绕开物理分选在微细嵌布条件下的解离瓶颈。经典技术路线通常通过焙烧诱导矿物相变,并配合碱液浸出实现脱硅或硅相可控转化。根据是否与焙烧联用,化学法脱硅可归纳为两条主要路径:一是直接溶出一分选法,二是焙烧—溶出法^[46]。

直接溶出一分选法是基于—水硬铝石与含硅矿物在碱液中的溶解行为差异进行分离的方法。Ou Y. J. 等^[47]采用碱性溶液对未焙烧铝土矿进行预脱硅处理,结果表明,在温度 180 °C、 Na_2O 质量浓度约 20 g/L 条件下,高岭石能够优先浸出,而—水硬铝石溶解度相对较低。该研究重点建立了浸出动力学模型,探讨了粒度与温度对—水硬铝石和高岭石溶出行为的影响,为直接溶出路径提供了动力学依据。该法的优势在于可减少氧化铝损失,同时避免有机药剂对后续拜耳法工艺的潜在干扰。

焙烧—溶出法的原理是:先通过焙烧预处理,将铝土矿中的含硅矿物转化为无定形二氧化硅或其他易溶硅相,这些转化后的硅相随后在碱浸过程中优先溶出,最后经固液分离实现铝硅分离^[48]。在焙烧预处理工序,—水硬铝石转变为具有一定化学活性的物相,但该物相在低温下不溶于碱。正是利用这一特性,在低温稀碱条件下,—

水硬铝石与硅矿物在溶出行为上产生了显著差异,从而达到脱硅目的。但该法也存在一定弊端,包括工艺流程较长、碱耗较高;产生的含硅碱液需另行处理,增加了系统复杂性与运行成本;焙烧阶段能耗较高,使得该工艺的经济性较差。

化学法在脱硅效率和矿石适应性方面具有一定优势,并有利于提高目标金属回收率;但仍存在分离不彻底、流程较长及铝损失等问题。相较于化学法依靠药剂浸出,微波活化法则是通过改变矿物的微观结构与表面特性,从源头上降低化学脱硅的反应能垒。

2.3 微波活化法

微波活化法是通过能场耦合促进矿物相变或反应加速,从而改变铝、硅在体系中的物相去向,实现铝硅分离的技术路径。其核心机制在于利用微波的选择性加热特性。具体而言,微波通过与物质分子之间的相互作用直接将能量传递给介质,不同物相因介电性能差异呈现差异化的升温行为,从而诱发选择性相变或局部热效应。与常规焙烧相比,微波焙烧具有能耗低、升温快、选择性好及环境友好等特点^[49]。但由于样品中通常包含多个微波吸收特性不同的物相,使得微波加热难以实现均质化升温,若物料混合不均匀,则易导致焙烧产物质量不均。

在工艺应用层面,Le T. 等^[50]采用微波活化法强化难熔分散型铝土矿的分解。将一水硬铝石型铝土矿与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 NaOH 混合并经湿浆处理,在 1.0 kW、2.45 GHz 条件下控制 Ca/Si 物质的量比为 2,并于 400~800 °C 下处理 20 min 左右,使体系转化生成可溶性 NaAlO_2 与不溶性 Ca_2SiO_4 ,随后在稀碱液中实现铝的选择性溶出^[51]。该研究的意义在于,将提高铝硅比由传统物理分离拓展为通过相变实现硅的低反应性固定与铝的易溶化,可为高硅铝土矿的资源化利用提供一种新思路。

从工艺评价角度看,微波活化法相较于传统焙烧过程更为清洁,无尾气排放,能降低整体碱耗并减少废物产生。但目前,其工业化应用仍面临多重挑战,如设备投资较大、大功率连续式工业微波反应器设计复杂、电能向微波能的转换效率有限导致整体电耗较高等。这些工程化瓶颈是当前制约该技术规模化推广的主要因素。为兼顾反应效率与硅渣稳定性,工业上常采用钙化—碳化法

来实现硅的定向转化。

2.4 钙化—碳化法

钙化—碳化法通过钙化转型将硅定向转入稳定钙硅酸盐相,并在碳化过程中实现副产物的资源化利用,属于从“提高铝硅比”向“硅去向可控与固废资源化协同拓展”的综合利用路径。该工艺处理中低品位铝土矿时,首先在溶出阶段添加适量氧化钙,促使硅元素完全转化为水化石榴石相,实现溶出平衡体系的无碱化转型;随后向钙化渣中通入 CO_2 ,使水化石榴石发生碳化分解^[52];最后通过低温溶出工序回收碳化渣中的氢氧化铝,并将其返回生产体系,最终生成以 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 和 CaCO_3 为主要物相的新型结构赤泥。依据赤泥中铁元素含量,可进一步进行提铁处理,使其适用于土壤改良或建筑材料原料。上述钙化转型、碳化分解与溶铝回收构成该路线的 3 个核心工序(图 3)。

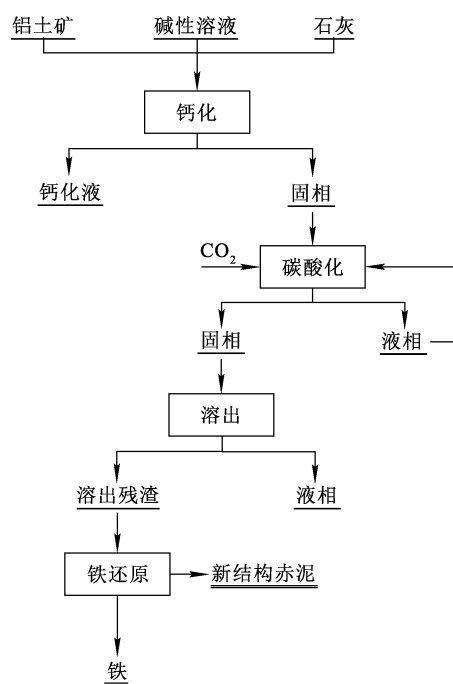


图 3 CCM 综合利用高铁铝土矿的工艺流程

Fig. 3 Process flowchart for comprehensive utilization of high-iron bauxite using CCM

在应用研究层面,潘璐^[53]采用钙化—碳化法处理低品位一水硬铝石型铝土矿及拜耳法赤泥,系统对比了碳碱碳化与二氧化碳碳化对氧化铝提取性能的影响。Lu G. Z. 等^[54]则提出“煅烧—碳酸化法”湿法冶金思路:将铝土矿与碱液、石灰混合煅烧后进行碳酸化处理,使传统赤泥中的含硅

钠盐相转化为碳酸钙与硅酸钙,实现硅的稳定化固定与赤泥的资源化利用(如水泥原料)。该研究更强调硅去向的可控性与固废减量/资源化的协同效应,为低品位资源利用提供了不同于单纯提升铝硅比的多元化评价维度。

2.5 其他方法

除上述主流技术方向外,部分研究尝试探索干法分离路径,以规避湿法工艺中微细粒泥化带来的分选难题。电选法是干法分离技术的典型代表之一。其原理是,在高压电场及其他力场的共同作用下,依据矿物之间电性质差异来实现分离。He J. F. 等^[55]开展了相关研究,采用干法流化床对低品位一水硬铝石型铝土矿进行分离试验,探讨了分离时间、静床高度及操作气速等参数对分选效果的影响,但结果表明,整体铝硅比提升幅度有限,尚未达到工业应用要求。

沸石脱硅法是湿法分离技术的典型代表之一。Sadowska 等^[56]开展了高硅 ZSM-5 分子筛(Si/Al=164)在 NaOH 及 NaOH/四丁基氢氧化铵(TBAOH)混合碱处理下的脱硅试验研究。结果表明,与中等硅铝比的 ZSM-5 不同,高硅分子

筛的脱硅在表面区域比体相更有效,升高脱硅温度(从 338 K 升至 353 K)能显著增加介孔体积和表面积,但也会导致部分分子筛骨架破坏和路易斯酸中心增加。

目前,电选法在矿物加工领域的实际应用仍较有限,通常需与其他选矿技术联合使用。但其作为一种物理分选方法,具有生态成本低、无需药剂添加、分离产物可直接用于后续处理等优势,在特定场景下仍具备研究价值与发展潜力。但现阶段,该法在铝土矿选别中的工程化可行性及效果稳定性仍有待更充分的工艺论证与数据支撑。沸石脱硅法在部分不稳定硅相处理中效率有限,且在脱硅过程中,微孔结构和比表面积变化可能导致强酸位点减少,进而影响脱硅均匀性。总体来看,上述探索性方法尚未形成成熟工艺路线,但可为低品位铝土矿资源化利用提供补充思路。

2.6 不同技术路径对比分析

针对高硅低品位铝土矿,提高铝硅比并减轻硅带来的负面效应,是氧化铝生产领域最核心的问题之一。因此,对比了几种主要工艺技术路径的优劣势及其应用场景,结果见表 3。

表 3 高硅低品位铝土矿提高铝硅比及减轻硅负效应主要工艺路线对比
Table 3 Comparison of major process routes for improving aluminum-to-silicon ratio and mitigating silicon-negative effect in high-silicon low-grade bauxite

路线类别	代表方法	主要优势	主要劣势	适用场景	参考文献
物理选矿	重选、筛分、浮选脱硅	工艺成熟,可作为拜耳法预处理,提高铝硅比并降低后续碱耗	受矿物解离度限制,对微细嵌布及胶结包裹矿石分选效果差	铝矿物与脉石在密度、粒度或表面性质差异明显的矿石	[29]
化学脱硅	直接溶出、焙烧—溶出	对微细分散硅矿物脱除效果显著	流程较长,能耗与药耗高,存在铝损失及废液处理问题	物理选矿效果有限、硅矿物反应活性高的高硅铝土矿	[46]
能场强化	微波活化	升温快、选择性加热明显,促进矿物相变并提高铝的选择性浸出效率	加热均匀性差,设备投资高,工业放大难度大	难处理高硅及微细分散矿石的强化预处理	[49]
钙化—碳化法	钙化转型—碳化分解—低温溶铝	实现铝硅分离,并兼顾赤泥减量化与资源化利用	流程复杂,控制要求高,系统集成难度大	高硅铝土矿及赤泥协同处理	[52]
其他方法	干法流化床分离、电选等	药剂消耗低,环境负荷小,可作为补充技术	铝硅比提升有限,工程化成熟度不足	微细粒难选矿或干法预处理及多工艺耦合场景	[54]

3 结论与展望

我国铝土矿的资源禀赋特征是决定脱硅技术

路径的根本依据。与国外以三水铝石为主的红土型资源不同,我国以沉积型一水硬铝石矿为主,高岭石等黏土矿物发育,铝矿物与含硅脉石细粒紧

密共生,铝硅比普遍偏低。导致脱硅提质难度较大。因此,高硅低品位铝土矿的开发利用必须立足我国资源特点,构建与之相适应的脱硅提质技术体系。

目前,我国高硅低品位铝土矿的技术路径选择已由单一指标优化转向技术、经济与环保约束下的综合适配。物理分选法具有前端减量优势,但受矿物紧密共生制约,适用范围有限;化学法及能场强化技术虽可通过相变调控突破解离限制,但能耗高与流程复杂等问题制约其规模化推广。同时,脱硅技术评价重点正由单纯提高氧化铝品位,逐步转向赤泥减量、物性调控及资源化利用。钙化—碳化等工艺为脱硅过程与硅的稳定化固定协同提供了新思路,对推动氧化铝工业绿色低碳发展具有积极意义。

现有技术虽在一定程度上缓解了高硅低品位铝土矿利用难题,但仍存在诸多瓶颈。未来可重点从以下几方面推进:

1)加强矿物学特征与工艺参数之间定量关系研究,提升技术适配分析的针对性。针对不同成矿特征,应统筹技术经济性与环境约束,构建差异化、阶梯式利用体系,实现低品位铝土矿的高效选冶及共伴生元素协同回收。未来研究需从宏观品位评价转向对硅矿物赋存状态及其在分选过程中行为解析,将矿相组成、嵌布粒度、界面电性等关键参数与能耗、碱耗、赤泥产出等指标结合,开展多目标优化,推动铝土矿利用由经验配矿向精准决策转变。

2)突破超细颗粒选择性分选的界面调控技术。针对细泥干扰导致分选效率下降的难题,应重点开发高选择性捕收剂体系。通过分子设计强化药剂对一水硬铝石或硅酸盐矿物特定晶面的选择性锚定,结合矿浆环境调控,增强复杂离子体系下铝矿物与硅酸盐矿物的可浮性差异,从而拓宽物理选矿的工艺窗口,降低后续溶出过程中的碱耗波动。

3)推动铝、硅及伴生铁、钛等元素的协同利用,提高低品位资源综合利用水平。面对低品位矿开发中单一产品附加值低、环境成本较高等问题,工艺设计应突破传统单一氧化铝提取思维,将脱硅过程与铁、钛等伴生元素回收有机结合。同时利用能场强化诱导选择性相变,推动硅向高附加值硅酸盐产品或建材前驱体的定向转化,逐步

构建全元素循环利用的绿色冶金模式。

参考文献:

- [1] 刘玉林,程宏伟.我国铝土矿资源特征及综合利用技术研究进展[J].矿产保护与利用,2022,42(6):106-114.
Liu Yulin, Cheng Hongwei. Research progress on characteristics and comprehensive utilization of bauxite resource in China [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(6): 106-114.
- [2] Sun Li, Zhang Shuai, Zhang Shihong, et al. Geologic characteristics and potential of bauxite in China[J]. Ore Geology Reviews, 2020, 120: 103278.
- [3] 徐林刚,孙莉,孙凯.中国铝土矿的成矿规律、关键科学问题与研究方法[J].矿床地质,2023,42(1):22-40.
Xu Lingang, Sun Li, Sun Kai. Metallogenic regularity, key scientific problems and research methods of bauxite in China[J]. Mineral Deposits, 2023, 42(1): 22-40.
- [4] 朱超超,聂艳敏,赵琳颖.铝土矿资源特征及综合利用技术研究进展[J].冶金与材料,2024,44(6):40-42.
Zhu Chaochao, Nie Yanmin, Zhao Linying. Research progress on characteristics and comprehensive utilization technology of bauxite resources[J]. Metallurgy and Materials, 2024, 44(6): 40-42.
- [5] 高威,张强,李莎.高硫高硅铝土矿的焙烧脱硫—碱浸脱硅[J].湿法冶金,2021,40(3):202-206.
Gao Wei, Zhang Qiang, Li Sha. Roasting desulfurization—alkaline leaching desilication of high-sulfur and high-silicon bauxite [J]. Hydrometallurgy of China, 2021, 40(3): 202-206.
- [6] 陈喜峰.全球铝土矿资源分布特征、勘查开发格局及展望[J].中国矿业,2024,33(7):59-68.
Chen Xifeng. Distribution characteristics and exploration & development pattern of global bauxite resources and its prospect[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(7): 59-68.
- [7] U. S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2026: bauxite and alumina[R]. Reston, VA: U. S. Geological Survey, 2026.
- [8] 易璐,李云云,郑明贵,等.全球铝土矿贸易格局演化及中国贸易特征[J].黄金科学技术,2024,32(5):926-938.
Yi Lu, Li Yunyun, Zheng Minggui, et al. Evolution of the global bauxite trade pattern and the characteristics of China's trade[J]. Gold Science and Technology, 2024, 32(5): 926-938.
- [9] 卢宜冠,张起钻,曾威,等.中国铝土矿研究与勘查进展[J].地质学报,2026,100(2):584-597.
Lu Yiguan, Zhang Qizuan, Zeng Wei, et al. Advances in research and exploration of bauxite in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2026, 100(2): 584-597.
- [10] 周登辉,罗杰.我国铝土矿资源供应安全战略思考及建议[J].轻金属,2024(9):1-5.

- Zhou Denghui, Luo Jie. Strategic thinking and suggestion on bauxite resource supply security[J]. *Light Metals*, 2024 (9):1-5.
- [11] Xie Mingzhuang, Liu Fengqin, Zhao Hongliang. Characterization of high sulfur bauxite and its phase transformation during desulfurization; a perspective from process mineralogy[J]. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2023, 9(4): 1466-1476.
- [12] Zainudeen N M, Mohammed L, Nyamful A, et al. A comparative review of the mineralogical and chemical composition of African major bauxite deposits[J]. *Heliyon*, 2023, 9(8): e19070.
- [13] 中华人民共和国地质矿产部. 世界矿产资源年评 2023 [R]. 北京:地质出版社, 2023:112-115.
- [14] Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics and Sciences. Australian mineral statistics 2024 [R]. Canberra: ABARES, 2024:45-48.
- [15] Negrão L B A, Da Costa M L. Mineralogy and geochemistry of a bauxite-bearing lateritic profile supporting the identification of its parent rocks in the domain of the huge Carajás iron deposits, Brazil[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2021, 108:103164.
- [16] Young N J, Coley M D, Greenaway A M. Mineralogical investigations of Jamaican hematite-rich and goethite-rich bauxites using XRD and solid state ^{27}Al and ^{31}P MAS NMR spectroscopy[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, 200:54-76.
- [17] Geological Agency (Badan Geologi), Ministry of Energy and Mineral Resources (KESDM). Indonesian minerals, coal, and geothermal resources and reserves 2021 [R]. Bandung: Geological Agency, 2022.
- [18] Tuan Q L, Ahn J W. Bauxite developments in Vietnam: opportunities and challenges[J]. *Journal of Energy Engineering*, 2018, 27(3):41-47.
- [19] Bhukte P G, Daware G T, Masurkar S P, et al. Beneficiation of low-grade bauxite; a case study of lateritic bauxite of India [C]//Randive K, Pingle S, Agnihotri A, et al. *Innovations in Sustainable Mining*. Cham: Springer, 2021:85-98.
- [20] 杨云, 闫武, 沈明伟, 等. 桂西某高铁低品位铝土矿浮选实验[J]. *矿产综合利用*, 2025, 46(4):114-120.
- Yang Yun, Yan Wu, Shen Mingwei, et al. Experimental study on flotation of low-grade high-iron bauxite in Western Guangxi [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2025, 46(4):114-120.
- [21] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告 2024 [R]. 北京:地质出版社, 2024:6-13.
- [22] 张廷安, 贺欣, 吕国志. 铝土矿资源特征与分布[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2025(11):16-27.
- Zhang Tingan, He Xin, Lü Guozhi. Characteristics and distribution of bauxite resources[J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 2025(11):16-27.
- [23] 孟祥仑, 徐海棚, 姚双秋, 等. 桂西堆积型铝土矿伴生钛资源潜力及综合回收利用[J]. *岩石矿物学杂志*, 2025, 44(6):1433-1444.
- Meng Xianglun, Xu Haipeng, Yao Shuangqiu, et al. Potential and comprehensive recovery and utilization of associated titanium resources in accumulation-type bauxite of Western Guangxi [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2025, 44(6):1433-1444.
- [24] 姜德波, 张起钻, 江沙, 等. 中国喀斯特型铝土矿找矿预测研究进展[J]. *地质学报*, 2025, 99(2):649-665.
- Lou Debo, Zhang Qizuan, Jiang Sha, et al. Progress of prospecting prediction research for karstic bauxite in China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2025, 99(2):649-665.
- [25] 谢峰, 张汉平, 陈献梅. 云南某沉积型铝土矿工艺矿物学研究[J]. *矿冶*, 2015, 24(2):81-84.
- Xie Feng, Zhang Hanping, Chen Xianmei. Study on process mineralogy of a sedimentary bauxite in Yunnan [J]. *Mining and Metallurgy*, 2015, 24(2):81-84.
- [26] 李明晓. 低品位铝土矿浮选脱硅提质研究[J]. *非金属矿*, 2022, 45(3):66-69.
- Li Mingxiao. Study on flotation desilicization and quality improvement of low grade bauxite [J]. *Non-Metallic Mines*, 2022, 45(3):66-69.
- [27] Zarbayani M, Jorjani E. Mineralogical and sink-float studies of Jajarm low-grade bauxite [J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2010, 17(3): 251-256.
- [28] Wu Guoliang, Ma Junwei, Du Wuxing, et al. Current status and progress of desilication and desulfurization technology in bauxite beneficiation [J]. *Mineral Exploration*, 2024, 15(12):2351-2358.
- [29] Zhang Ningning, Zhou Changchun, Cong Longfei, et al. Semi-industrial experimental study on bauxite separation using a cell-column integration process [J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2016, 23(1):7-15.
- [30] Zhang Ningning, Zhou Changchun, Liu Cheng, et al. Effects of particle size on flotation parameters in the separation of diasporite and kaolinite [J]. *Powder Technology*, 2017, 317:253-263.
- [31] Zou Qin, Ni Yang, Han Haisheng, et al. A review on fine particle mineral flotation: structural design of flotation equipment and flow field regulation [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2026, 46(1):1-13.
- [32] Zhang Ningning, Zhou Changchun, Pan Jinhe, et al. The response of diasporic-bauxite flotation to particle size based on flotation kinetic study and neural network simulation [J]. *Powder Technology*, 2017, 318:272-281.
- [33] 姚伟, 李茂林, 崔瑞, 等. 微细粒矿物的分选技术[J]. *现代矿业*, 2015, 31(1):66-69.
- Yao Wei, Li Maolin, Cui Rui, et al. Beneficiation technology for microfine disseminated minerals [J]. *Modern Min-*

- ing, 2015, 31(1): 66-69.
- [34] Xu Zhenghe, Plitt V, Qi Liu. Recent advances in reverse flotation of diasporic ores: a Chinese experience[J]. Minerals Engineering, 2004, 17(9/10): 1007-1015.
- [35] Gibson B A, Wonyen D G, Chelgani S C. A review of pre-treatment of diasporic bauxite ores by flotation separation [J]. Minerals Engineering, 2017, 114: 64-73.
- [36] Zhang Jinyu, Li Yanjun, Gao Peng, et al. Advances in reagent systems and mechanisms for desilication from bauxite via flotation[J]. Reviews in Chemical Engineering, 2025, 41(7): 645-665.
- [37] Chen Xiangqing, Hu Yuehua, Wang Yuhua. Effects of sodium hexametaphosphate on flotation separation of diasporic and kaolinite[J]. Journal of Central South University of Technology, 2005, 12(4): 420-424.
- [38] Birinci M, Gök R. Characterization and flotation of low-grade boehmitic bauxite ore from Seydişehir (Konya, Turkey)[J]. Minerals Engineering, 2021, 161: 106714.
- [39] Zhang Ningning, Nguyen A V, Zhou Changchun. A review of the surface features and properties, surfactant adsorption and floatability of four key minerals of diasporic bauxite resources[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2018, 254: 56-75.
- [40] Xia Liuyin, Zhong Hong, Liu Guangyi, et al. Flotation separation of the aluminosilicates from diasporic by a Gemini cationic collector[J]. International Journal of Mineral Processing, 2009, 92: 74-83.
- [41] Zhang Ningning, Nguyen A V, Zhou Changchun. Impact of interfacial Al- and Si-active sites on the electrokinetic properties, surfactant adsorption and floatability of diasporic and kaolinite minerals [J]. Minerals Engineering, 2018, 122: 258-266.
- [42] Liu Wenli, Hu Yuehua, Sun Wei. Separation of diasporic from bauxite by selective flocculation using hydrolyzed polyacrylamide[J]. Journal of Central South University, 2014, 21(4): 1470-1476.
- [43] Li Huaxia, Chai Wencui, Cao Yijun, et al. Flotation enhancement of low-grade bauxite using oxalic acid as surface pretreatment agent [J]. Applied Surface Science, 2022, 577: 151964.
- [44] Fang Chaojun, Yu Shichao, Wei Xuyi, et al. The cation effect on adsorption of surfactant in the froth flotation of low-grade diasporic bauxite [J]. Minerals Engineering, 2019, 144: 106051.
- [45] Raahauge B E, Williams F S. Smelter grade alumina from bauxite: history, best practices, and future challenges[M]. Cham: Springer, 2022.
- [46] Roach G I D, White A J. Dissolution kinetics of kaolin in caustic liquors[C]//Donaldson D, Raahauge B E. Essential readings in light metals: volume 1 alumina and bauxite. Cham: Springer International Publishing, 2016: 240-246.
- [47] Ou Yanjun, Ma Shuhua, Wang Xiaohui, et al. Dissolution behavior of aluminum and silicon from kaolinite diasporic symbiotic low-grade bauxite in low alkali system [J]. Colloids and Surfaces: A, 2024, 701: 134821.
- [48] Li Xiaobin, Wang Hongyang, Zhou Qiusheng, et al. Reaction behavior of kaolinite with ferric oxide during reduction roasting[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(1): 186-193.
- [49] 彭秋菊, 李佳, 杜冬云, 等. 响应面法优化电解锰渣的微波活化有效硅工艺条件[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(8): 2548-2554.
- Peng Qiuju, Li Jia, Du Dongyun, et al. Optimization of microwave activated effective silicon process conditions for electrolytic manganese residue by response surface methodology[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(8): 2548-2554.
- [50] Le T, Ju Shaohua, 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.
- [51] Le T, Ju Shaohua, Lu Liming, et al. A novel process and its mechanism for recovering alumina from diasporic bauxite[J]. Hydrometallurgy, 2017, 169: 124-134.
- [52] 刘冠廷. 钙化—碳化法回收拜耳法赤泥中铝硅资源的机理研究与工艺优化[D]. 沈阳: 东北大学, 2020.
- [53] 潘璐. 石灰—碳化法处理低品位铝土矿和赤泥的基础研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [54] Lu Guozhi, Zhang Tingan, Guo Fangfang, et al. Clean and efficient utilization of low-grade high iron sedimentary bauxite via calcification carbonation method[J]. Hydrometallurgy, 2019, 187: 195-202.
- [55] He Jingfeng, Bai Qiang, Du Tianye. Beneficiation and upgrading of coarse sized low-grade bauxite using a dry-based fluidized bed separator[J]. Advanced Powder Technology, 2020, 31(1): 181-189.
- [56] Sadowska K, Góra-Marek K, Drozdek M, et al. Desilication of highly siliceous zeolite ZSM-5 with NaOH and NaOH/tetrabutylamine hydroxide [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2013, 168: 195-205.

Research Progress and Prospects in Desilication Technology for High-Silica, Low-Grade Bauxite

LIU Yuzhe¹, HE Chunlin^{2,3}, SUN Yuan¹, LEI Yu¹, LIU Shuai⁴, ZHANG Hongyu¹, ZHOU Yizhou¹

(1. *Shi Changxu Advanced Materials Centre, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;*

2. *State Key Laboratory of Featured Metal Materials and Life-cycle Safety for Composite Structures, Guangxi University, Nanning 530004, China;*

3. *School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004 China;*

4. *School of Environmental and Chemical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)*

Abstract: Bauxite resources in China are predominantly sedimentary diasporic ores, characterized by well-developed clay minerals and the fine-grained intergrowth of aluminum-bearing minerals with siliceous gangue. These ores typically have high silica content and a low Al/Si ratio, making them unsuitable for direct processing by the Bayer method. With the depletion of high-grade resources, efficient desilication and beneficiation of low-grade bauxite have become essential for ensuring the security of the alumina industry. This paper systematically reviews desilication technologies for low-grade bauxite. It analyzes the distribution of bauxite resources and the characteristics of the ores, and further clarifies the constraints imposed by mineralogical features and mineral intergrowth on beneficiation performance. The review focuses on physical beneficiation methods, including gravity separation and flotation, as well as chemical methods, microwave activation, and the calcification-carbonation process. Their desilication efficiency, economic cost, and environmental impact are comparatively evaluated. Flotation remains the dominant technology, but its selectivity is significantly reduced by fine-grained mineral intergrowth. Chemical methods and energy-assisted techniques can help overcome the limitations of mineral liberation, but they are often associated with high energy consumption and complex process flows. The calcification-carbonation process integrates desilication with red mud valorization, representing a promising pathway for green metallurgy. Finally, desilication technologies should be tailored to differences in mineralogical characteristics. Process selection should move beyond a single-indicator criterion toward a comprehensive evaluation of energy efficiency, silica transformation pathways, and solid-waste properties. This approach will promote the efficient, green, and high-value utilization of high-silica bauxite.

Key words: high-silica bauxite; desilication; flotation; chemical methods; process mineralogy; comprehensive resource utilization; research progress