

广西拜耳法生产氧化铝的铝土矿脱硅技术

胡国宪¹, 李安敏^{1,2}, 夏安¹, 张东洁¹, 潘利文^{1,2}, 赵小莲^{1,2}, 庞兴志^{1,2}

¹广西有色金属及特色材料加工重点实验室, 广西 南宁

²广西大学资源环境与材料学院, 广西 南宁

收稿日期: 2024年12月18日; 录用日期: 2025年1月18日; 发布日期: 2025年1月30日

摘要

广西因其丰富的铝土矿资源和得天独厚的地理优势而成为中国氧化铝生产基地的核心区域。广西生产氧化铝是运用拜耳法, 其是工业上广泛应用的方法。在拜耳法生产氧化铝过程中, 脱硅是关键步骤之一, 以提高最终产品——氧化铝的纯度。本文对拜耳法制备氧化铝过程中的脱硅技术进行综述, 分析了各种技术的优点和不足, 并展望铝土矿脱硅技术。

关键词

广西铝土矿, 脱硅, 拜耳法, 氧化铝

Desilication Technology of Bauxite for Alumina Production by Bayer Process in Guangxi

Guoxian Hu¹, Anmin Li^{1,2}, An Xia¹, Dongjie Zhang¹, Liwen Pan^{1,2}, Xiaolian Zhao^{1,2}, Xingzhi Pang^{1,2}

¹Key Laboratory of Nonferrous Metals and Characteristic Materials Processing in Guangxi, Nanning Guangxi

²School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning Guangxi

Received: Dec. 18th, 2024; accepted: Jan. 18th, 2025; published: Jan. 30th, 2025

Abstract

Guangxi has become the core region of China's alumina production base due to its abundant bauxite resources and unique geographical advantages. The production of alumina in Guangxi uses the Bayer process, which is a widely used method in industry. In the Bayer process for producing alumina, desilication is one of the key steps to improve the purity of the final product—alumina. This article reviews the desilication technology in the Bayer process for preparing alumina, analyzes the advantages and disadvantages of various technologies, and looks forward to desilication technology for bauxite.

文章引用: 胡国宪, 李安敏, 夏安, 张东洁, 潘利文, 赵小莲, 庞兴志. 广西拜耳法生产氧化铝的铝土矿脱硅技术[J]. 材料科学, 2025, 15(1): 171-183. DOI: 10.12677/ms.2025.151020

Keywords

Guangxi Bauxite, Desilication, Bayer Process, Alumina

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

铝土矿是原铝的主要生产原料，铝工业生产全链条的实质是实现由矿山挖掘 - 铝土矿 - 氧化铝 - 电解铝 - 铝初级产品，直至根据产品终端需要而进行的精深铝加工的全过程转换，铝土矿资源在铝工业建设及发展中起着决定性作用。广西铝土矿资源丰富，资源禀赋佳，铝土矿成矿地质条件好，是全国铝土矿储备最多的四个省区之一，在全国占有重要地位，据矿产资源调查成果显示，截至 2021 年底，累计查明广西铝土矿资源总量约 8.55 亿 t，占全国铝土矿资源 25% 以上，其中 90% 以上为堆积型铝土矿，占比不到 10% 为沉积型铝土矿[1]。

拜耳法(Bayer process)是一种工业上广泛应用的氧化铝提取方法。尽管拜耳法在工业生产中取得了显著的成功，但其中的脱硅过程仍然是一个复杂且关键的环节。硅的存在会严重影响氧化铝的质量和生产效率，因此研究如何有效脱硅具有重要意义。本文基于拜耳法制取氧化铝过程中脱硅技术的现状，交叉融合多学科的优势，探究未来该技术的发展前景及趋势，并为高效脱硅技术的最终实现提供可能，由此更加契合广西氧化铝生产的需求，推动当地经济快速发展。

2. 广西铝土矿的成分及特点

“铝矾土”是一类由三水铝石和一水铝石构成的矿石，它们通常会和其他岩石一同形成，并且可以制造出高达 90% 的氧化铝。其中，三水铝石含有 $\text{OH}(\text{OH})$ ，一水软铝石含有 $\gamma\text{-AlO}$ ，一水硬铝石含有 $\alpha\text{-AlO}$ ，如图 1 所示。

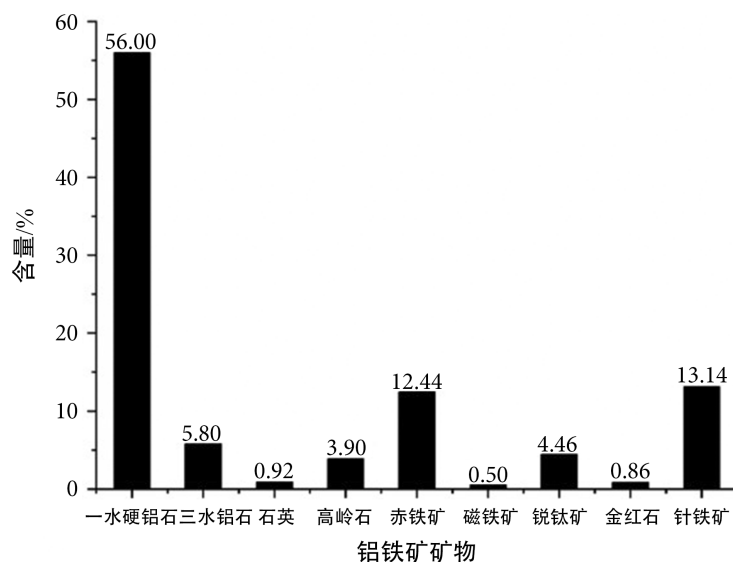


Figure 1. General content of bauxite ore [2]

图 1. 一般铝土矿矿石含量[2]

广西作为中国铝土矿储量最大省，铝土矿在广西拥有丰富的资源，布局富集、品位高、埋藏浅、可以露天采矿，而且容易富集开拓，因此，广西铝土矿成为中国少数几个拥有中铝、高铁、高铝硅比、低硫等特性的矿山之一(如图 2 所示)，并且有利于利用拜耳法进行氧化铝的制造，从而使广西成为中国铝土矿资源的重镇。

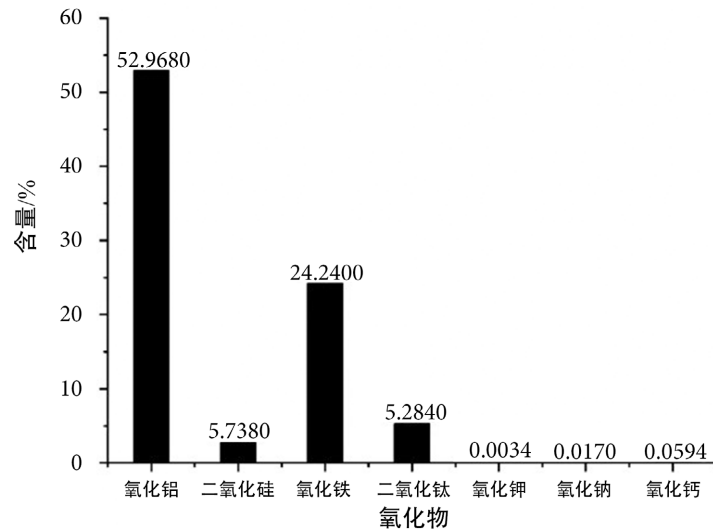


Figure 2. General composition content of bauxite [2]
图 2. 一般铝土矿成分含量[2]

根据图 3~5 可知广西铝土矿资源的储量和质量发生了显著的变化。从图 3 中的品位图来看，氧化铝含量超过 50% 的铝土矿资源储量达到了 5.448 亿吨，占总量的 76.1%；而氧化铝含量超过 60% 的铝土矿资源储量达到了 1.110 亿吨，占总量的 15.5%；此外，从图 4 中的铝硅比来看，铝硅比值超过 12 的矿石数量达到了 2.223 亿吨，说明广西铝土矿资源的质量发生了显著的变化。根据图 5 显示，广西的铝土矿资源储量达到 31.05%，其中 A/S 大于 7 的矿石量达到 65.71%。此外，从含矿率来看，超过 650 kg/m³ 的矿石量占总量的 83.13% [3]，这表明广西的铝土矿资源十分丰富，氧化铝品位较高，铝硅比也较大，而且含矿率也很高。

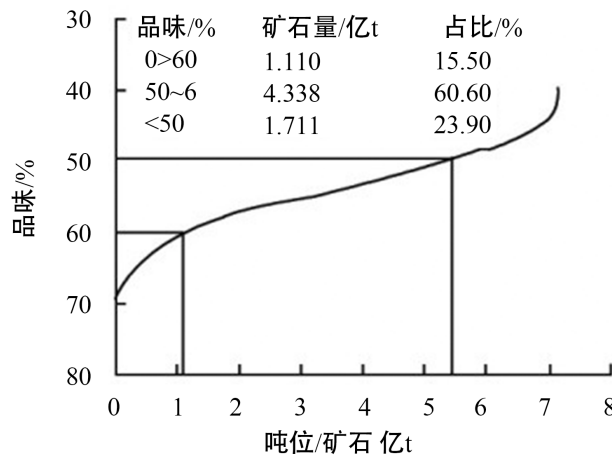


Figure 3. Guangxi bauxite has accumulated the accumulated tonnage of resource reserves-alumina grade
图 3. 广西铝土矿累计查明资源储量累积吨位 - 氧化铝品位

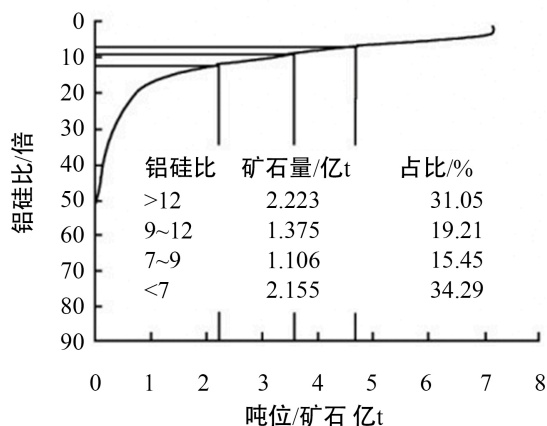


Figure 4. Accumulated tonnage of bauxite reserves in Guangxi-alumina silica ratio

图 4. 广西铝土矿累计查明资源储量累积吨位 - 铝硅比

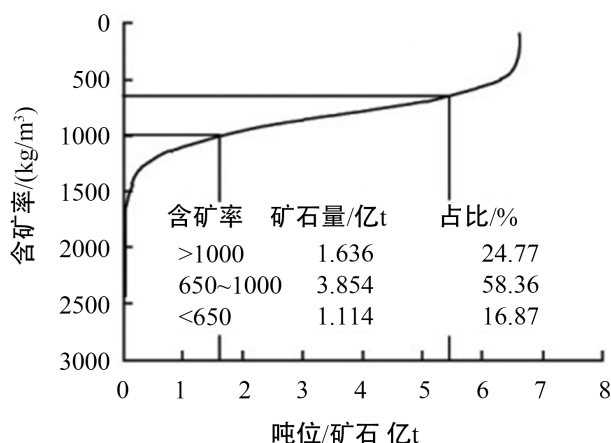


Figure 5. Accumulated tonnage of accumulated bauxite in Guangxi-ore-bearing rate

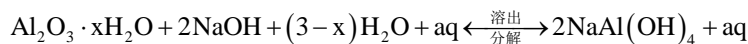
图 5. 广西堆积型铝土矿累计查明资源储量累积吨位 - 含矿率

3. 拜耳法中脱硅技术研究现状

3.1. 拜耳法概述

拜耳法属于碱法生产氧化铝，是直接含有大量游离 NaOH 的循环母液处理破碎后的铝矿石，以溶出其中的氧化铝而获得铝酸钠溶液，并用加晶种搅拌分解的方法，使溶液中的氧化铝以 Al(OH)₃ 状态结晶析出。种分母液经蒸发后返回用于浸出另一批铝矿石。矿石中的主要杂质 SiO₂ 是以水合铝硅酸钠 (Na₂O·Al₂O₃·1.7SiO₂·nH₂O) 的形式进入赤泥，造成 Al₂O₃ 和 Na₂O 的损失[4]。因此，拜耳法适合处理高品位铝矿石，铝硅比(A/S)要大于 9。拜耳法能够较好地适用于具有高铝硅比的广西铝土矿生产氧化铝，而对于铝硅比较低的铝土矿则需要先进行预脱硅处理，来提高矿石中 Al₂O₃ 的含量以及铝硅比，因此脱硅技术在拜耳法生产氧化铝中极其重要。

拜耳法的实质就是使下面这一反应在不同的条件下朝不同的方向交替进行：



拜耳法生产氧化铝的工艺流程是由许多工序组成的，其中主要有原矿浆制备、矿浆的脱硅、溶出、

沉降、晶种分级和分解、母液的蒸发六个工序。

3.2. 脱硅技术的主要工艺及机理

拜耳法中，在溶出反应中通过加入脱硅剂或调整工艺条件，控制硅酸钠的生成与沉淀是脱硅技术的关键。由于广西铝土矿高铝硅比的原因，更需要注重在拜耳法工艺中的脱硅技术，以此来降低成品氧化铝中的硅元素含量，提高铝材的综合性能。

当前，脱硅技术已经发展到了三个不同阶段：物理脱硅、化学脱硅、生物脱硅。邱廷省教授[5]指出，当需要从硅酸盐矿物中提取硅矿物时，物理脱硅技术更加常见；当需要从细小颗粒矿物或者与目标矿物紧密结合的铝土矿中提取硅元素，化学脱硅技术更加优越；此外，针对矿山尾矿、废弃物以及低质量难处理的铝土矿，生物脱硅技术也更加受到青睐。另一方面，Sub-I 们也发现，开发出更加先进、更加环保的脱硅技术，也就是提升脱硅效率，这一点十分值得我们深入关注。

通过选用性磨矿、选择性聚团浮选分离工艺以及阶段磨浮分散技术，我们能够获得铝土矿精矿。这两种技术都能够满足铝硅比 5~6 的要求，并且具备良好的脱硅效果。此外，正反浮选法也被广泛应用，它们能够更准确地地区分出铝土矿中的硅离子，从而提高铝土矿的品质，并且还能够在提高铝土矿的回收率。采用反浮选法可以更加准确地识别出目标矿物，这种技术可以大大降低氧化铝的回收率，同时也可以更好地控制浮选药剂的使用量，利用的有效捕收剂来浮选分离出二氧化硅及硅酸盐矿物[4]。相比之下，传统的浮选法可以更加精准地识别出污染源，更加节约成本，同时也能够更好地控制污染源，使得污染控制更加可行。目前，在铝土矿、铁矿和磷矿的脱硅处理中，反浮选法的应用越来越广泛，但是在我国，由于含硅矿物的种类繁多、矿物的嵌布粒径小、矿物的结构特征各不相同，使得反浮选法在分离这些矿物时存在一定的困难，从而导致了目前在这些矿物上应用反浮选法的效果并不理想，尽管已经进行了许多浮选法的试验和研究，但是仍然缺乏一个完整的解决办法。陈占华，陈湘清，李莎莎以及其他一些科学家通过使用浮选脱硅技术，成功地分离出一种铝硅比达到 7.31， Al_2O_3 回收率达到 68.61% 的铝精矿[6]。同时张志永，田应忠以及其他一些科学家还通过实验，证实河南一种特殊的高铁铝土矿[7]，其 Al_2O_3 含量达到 52.93%， SiO_2 含量达到 8.54%，从而取代传统的分离方法，提升其质量。张云海等[8]研究人员通过“一个粗选两个精选一个扫选”的闭路实验，将 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 的含量调整至 90%，同时调节 pH 值至 9.5，并使捕收剂的用量达到 700 g/t，最终成功地提取出铝硅比 13.54 的铝精矿产品， Al_2O_3 的回收率达到了 89.03%。这一研究结果表明，“一种粗选两种精选一种扫选”的方法能够有效地将这种高铁铝土矿的铝和硅进行有机的分离。通过“脱泥-反浮选”工艺流程，我们在河南的一个特定区域成功提取出铝硅比 10.82 的高质量的中等铝硅比矿物，并且 Al_2O_3 的回收率达到 81%。周杰强和他的团队对重庆一种低硫、高硅的铝土矿进行了同步脱硫脱硅的研究[9]，并取得 20% 的合格产物。他们发现，当粒径小于 -0.075 mm，且浮选 pH 值达到 8.0 时，活性剂五水硫酸铜的使用量达到 125 g/t，抑制剂水玻璃的使用量达到 800 g/t，复合脱硫捕收剂的使用量达到 325 g/t，而起泡剂 2#油的使用量达到 120 g/t 时，这种同步脱硫脱硅的方法能够有效地提取出该矿石中的有价值的物质。经过一粗两扫闭路反浮选法处理，最终我们能够得到 62.18% 的氧化铝含量、5.36 的铝硅比、0.10% 的硫浓度和 85.10% 的氧化物铝利用率。采取联合捕收剂反浮选同步脱硫脱硅的方法，不但能够有效降低成本，而且还能够极大地缩减工业生产时间，从而有效推动高硫高硅铝土矿矿石的进一步应用和开发。

通过化学脱硅技术，可以有效地将一水硬铝石、含硅矿物以及碱溶液中的杂质分离开来，从而提升矿石的品位。许多研究表明，当嵌布粒度较细的铝土矿或者含硅矿物(主要为高岭石)与含铝矿物密切共生时[10] [11]，采用化学脱硅技术更为合适。此外，该技术还具有许多优势，如：① 脱硅效率极高，可以满足各种领域对材料纯度的严格要求；② 在某些情况下，可以有效地抑制杂质的污染，保证矿物的

质量；通过化学脱硅，我们可以从矿石中提取有价值的成分，从而提高资源的利用效率。其缺点：① 化学试剂的使用可能带来一定的环境污染问题，如废酸、废碱的处理等；② 生产成本较高，特别是碱法脱硅等工艺中碱液的消耗较大。

目前，化学脱硅技术已经发展到多种不同的阶段，其中，预焙烧-氢氧化钠熔融法(NaOH 熔融)、氢氧化钠进行熔融-分级法(氢氧化钠熔融-分析法)以及固液分离法(AlO 溶出法)都被广泛采用，其原理都基于矿石的化学性质，即首先经过焙烧，把矿石中的脉石矿物分解成三氧化物二铝、二氧化硅，再经 NaOH 熔融，让 SiO₂ 溶化，Al₂O₃ 保持熔融，从而获得铝精矿[5]。杨桂丽[12]指出，根据我国高铝、高硅、低铁的矿石性质，采取这些化学脱硅技术，可以获得更加纯净、可靠的铝精矿。“预焙烧氢氧化钠溶出法”脱硅法则可以有效地改善铝土矿的质量，它通过改变氢氧化钠的浓度和结构，以及利用水硬铝石颗粒和水合铝硅酸盐的结构差异[13]，有效地将硅元素分离开，并且可以显著减少铝土矿的生产过程，节省能源和费用，实现拜耳法氧化铝的标准化。随着科技的进步和环保要求的提高，化学脱硅技术将朝着更高效、更环保的方向发展。例如，通过优化脱硅工艺、研发新型脱硅试剂以及加强废液处理技术等手段，降低生产成本和环境影响，提高化学脱硅技术的市场竞争力。同时，生物脱硅等新型脱硅方法的研究也将不断深入，为化学脱硅领域带来更多的可能性。

通过运用生物选矿脱硅技术，我们能够将铝硅酸盐矿物中的硅酸盐进行氧化、还原，并将其分解成无害的物质，从而使二氧化硅与氧化铝分离实现脱硅的一种技术[14]-[19]。这种技术既能够提高选矿效率，又能降低矿物的污染，有效地保护环境。生物浸矿脱硅技术的工艺原理可以归纳为：EPS 络合、有机酸分解、以及其他形式的反应[15]-[19]。曾晓希等人通过对分离出的菌株浸矿、鉴定等发现了产气肠杆菌具有脱硅效果并对其脱硅条件进行探索试验，最终得出温度 30℃，起始 pH 值 7.0，装液量 60 mL 和转速 200 r/min 是产气肠杆菌脱硅的最适条件[20]。

4. 高潜力脱硅技术的应用与发展

在拜耳法中，脱硅主要通过控制溶液的温度和碱度或者加入特定物质，使硅酸钠析出形成钠长石，从而达到脱硅的目的。常用的脱硅方法有：① 石灰脱硅法，通过在铝土矿浆中加入石灰(CaO)，使其中的硅酸盐形成不溶性的钙硅酸盐，从而脱除硅；② 超声波场中脱硅，通过施加超声波，向铝酸钠溶液中加入氧化钙与铝酸钙，促使硅酸钠在溶液中过饱和并沉淀，从而达到脱硅的目的；③ 在拜耳法中，为了去除硅，常用的方法有：① 石灰法，即将石灰(CaO)添加到铝土矿浆中，以生成无机硅酸钙，然后将这种硅酸钙沉淀下来。② 超声法，即将氧化钙和铝酸钙放置于高压环境下，以产生高压气流，将硅酸钙沉淀下来，最终实现硅的去除。③ 利用反渗透技术，将氧化镁或硫酸镁等有机元素渗透进水体，然后将水体转变为硫酸镁或硫酸铵，最终实现对氧化镁的净化。此外，还有一些技术能够提高氧化镁的含量，比如采用反渗透法或硫酸镁法，它们能够有效地降低氧化镁的含量，同时也能够提高氧化镁的含量，进一步提高氧化镁的含量。通过将它和硅酸盐发生化学作用，形成无色的悬浮物，以此来去除硅离子。④ 碱法脱硅，通过调整铝土矿浆中的 pH 值和温度，使其中的硅酸盐以不溶性硅酸钠的形式沉淀出来。例如在铝土矿浆中加入一些特定的添加剂(磷酸盐或钛酸盐等)，使其与硅酸盐反应生成不溶性沉淀，从而脱除硅。

4.1. 石灰脱硅

石灰脱硅法属于化学脱硅法的一种，在碱石灰烧结法生产氧化铝过程中，即使铝矿石经配料、料浆制备、熟料烧结及溶出分离等工序后，原料带入的各项杂质成分大部分随赤泥外排，但所得粗制铝酸钠溶液仍然含有 4~5 g/L 的二氧化硅，为提高优质产品的产出率，粗制得到的铝酸钠溶液还需经过精制将溶

液中二氧化硅含量降低至 0.2 g/l 以下。现在工业生产上通常采用三次脱硅工艺, 其中, 高压连续脱硅一般用于一次脱硅, 处理后的一次精液 A/S 通常在 250 以上, 二、三次脱硅常采用添加石灰乳常压脱硅的方式, 在经第三次深度脱硅后, A/S 可达到 1000 以上[21]。

经过齐利娟和其他学者的深入研究, 他们发现, 当添加适当的石灰时, 它能够显著地改善铝土矿的预脱硅性能。具体来说, 它能够显著地降低预脱硅的速率, 同时也能够显著提高预脱钛的速率[22]。另外, 它还能够显著降低溶解赤泥中钠硅比的含量, 并且会导致赤泥中的铝硅比略微增大。因此, 我们认为, 正确控制和调整石灰的浓度是必要的, 以期获得最佳的预脱硅性能。

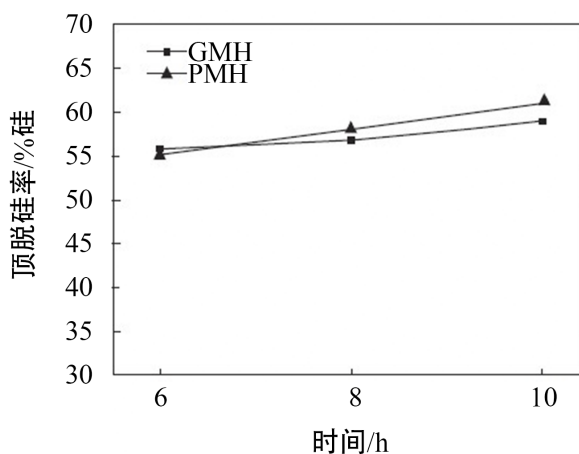


Figure 6. Effect of different lime concentrations on pre desilication rate

图 6. 不同石灰浓度对预脱硅率的影响变化

在这个实验中, 通过改变石灰浓度得到了不同浓度的石灰提升铝土矿矿浆的预脱硅效果[22], 如图 6 所示。

4.2. 碱法脱硅

碱浸法脱硅是一种在矿物加工中常用的技术, 特别是在处理铝土矿、锰矿等高硅含量矿石时。该方法通过利用碱性溶液(如氢氧化钠溶液)与矿石中的硅酸盐矿物发生化学反应, 生成可溶性的硅酸盐(如硅酸钠 Na_2SiO_3), 随后通过固液分离技术将硅酸盐从矿石中分离出来, 从而实现硅酸盐的分离和去除。

蒋正帅等人[23]对铝土矿实行漂浮焙烧-碱浸脱硅处理, 并分析了焙烧高温、苛碱含量与碱浸高温对焙烧矿碱浸脱硅的危害。结果表明, 在 930°C 下漂浮焙烧效果较优, 在碱浸脱硅条件下液固比为 8:1, 脱硅持续时间为 30 min, 苛碱含量为 110 g/L, 脱硅温度控制为 95°C 。通过采取有效的技术措施, 我们能够将 49.24% 的脱硅效果显著改善, Al_2O_3 的损耗降低到 2.03%, 同时将精矿的铝硅质量比提升至 8.21, 并且在悬浮焙烧过程中, 实际的溶解度能够达到 94.79%。此外, 采用石灰作为脱硅剂, 经过碱浸处理, 能够有效地将焙烧过的矿物回收再次利用, 并且将精矿的铝硅比提升至 7 或更多, 这样就能够有效地实现对碱液的循环利用。

经过高威等人[24]的详细探索, 他们发现, 当将中低品位、硫含量较高的高硫高硅铝土矿经过 95°C 、100 g/L、60 min 的碱浸脱硅-液固体积质量比以及 10/1 的处理时, 脱硫-脱硅的效果会有显著改善, 其脱硫-脱硅的比例达到 45.89%, 而氧化铝的损耗率则降至 3.89%。经过精心控制的脱硅处理, 铝的溶解度大幅度增加, 最终可以将其降至 97.21%, 比未经处理的情况有所改善, 其中增幅为 4.89%。

碱浸法能够有效地去除矿石中的硅酸盐矿物, 提高矿石的纯度, 同时适用于多种高硅含量矿石的脱

硅处理。与其他脱硅方法相比，碱浸法的工艺流程相对简单，易于操作和控制，但由于需要消耗大量的碱性溶液和能源，碱浸法的成本相对较高，因此仍需进行进一步研究来优化碱浸法工艺流程。

4.3. 超声波场促进脱硅

关于铝酸钠溶剂常温脱硅、铁的方法，国内的有关科学研究主要是结合拜耳法中脱硅、铁的方法展开的[25]-[29]，因此得到的氧化物铝产品，只能适合于电解铝而无法用户制取高纯度氧化物铝的需求。关于铝酸钠溶剂使用超声场下深度除铁、硅的课题，国内还未有相应的报告。面对这些课题，和晓才等人[30]给出了在超声场下，添加脱杂剂(氧化钙与铝酸钙)，从而实现了铁、硅与铝分离，使铁、硅去除率达 99.00% 以上。同时，研发人员也对铝酸钠溶剂中硅、铁元素的去除效率在超声场下的变化展开了深入研究，在研究工作中先后考虑了高温、超声强度、氧化钙及铝酸钙的使用、化学反应时间因素对铝酸钠溶液中硅、铁去除效果的作用。科学研究结果表明，当环境温度处于 80℃ 时，CaO 添加量为 5 g/L，3CaO·Al₂O₃·6H₂O 的添加量为 4 g/L，化学反应持续时间 2.0 h，超声波力度 20 W/cm² 条件下，硅、铁去除率依次到达 99.78%，99.54%，硅量指数高达 11,000。对比于从未使用超声波的条件，硅、铁去除率依次提升了 14.58%，经过 XRD 分析，和[30]等人发现脱杂形成的硅铁渣分子的空间结构非常紧密，并且稳定，如图 7 所示。这表明，使用超声波场可以有效地促进硅铁的去除，其中提高了 21.04% 的效率，这一结论是显而易见的。

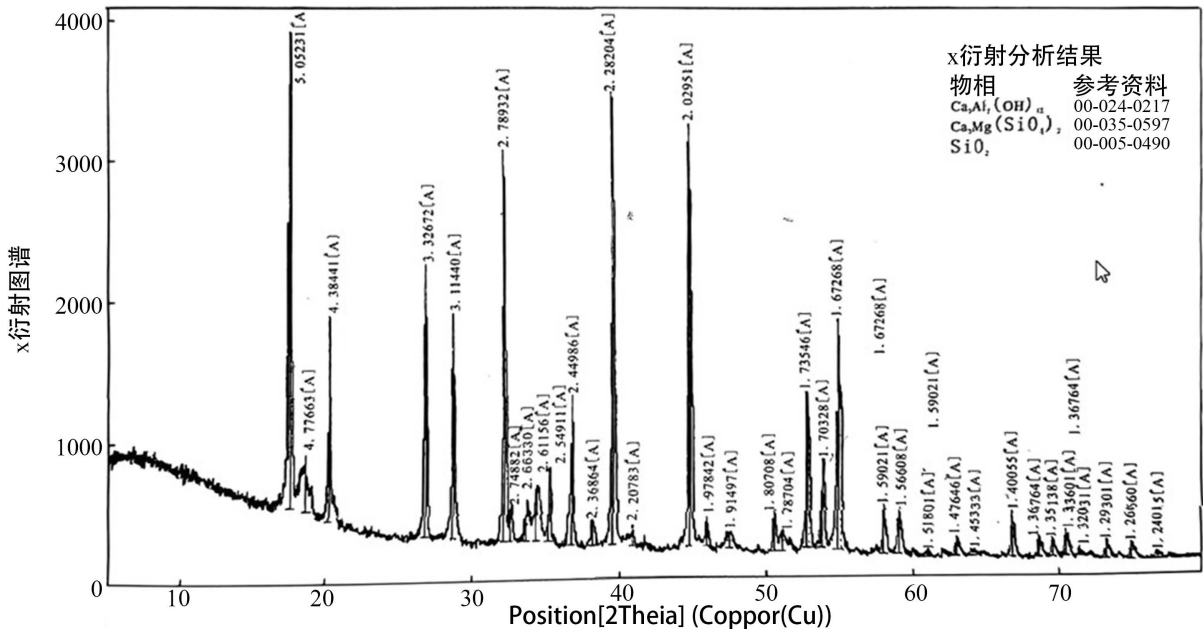


Figure 7. XRD of the iron-silicon slag Figure [30]
 图 7. 铁硅渣的 XRD 图[30]

4.4. 浮选法脱硅

1) 正浮选脱硅法

铝土矿正浮选脱硅技术的核心原理是利用矿石表层的物理和化学性质差异，透过添加浮选药剂，使硅酸盐矿石表面亲水性增强，从而在浮选过程中将其与铝矿物分离。正浮选药剂中通常包括① 捕收剂：用于增强硅酸盐矿石的亲水性，使其在浮选过程中容易附着在气泡上。常见的捕收剂包括胺类和胺盐类化合物；② 起泡剂：用于生成稳定的气泡，以便于硅酸盐矿石的附着和上浮。常见的起泡剂包括醇类和

醚类化合物；③ 调节剂：用于调整矿浆的 pH 值，以优化浮选条件。常见的调节剂包括石灰、硫酸和碳酸钠。而正浮选法的关键在于捕收剂的选取，铝土矿常见的正浮选捕收剂包括油脂酸及皂类、磺酸盐类、羟肟酸类及螯合捕收剂，目前研究较多的捕收剂包括油酸、妥尔油、十二烷基苯磺酸钠、氧化石蜡皂、羟肟酸及 733 等[31]。

郭鑫和其他科学家在研究高铁铝土矿时[32]，他们发现，由于氧化铝和铝硅的含量相当少，三氧化二铁的浓度很大，因此不能单独使用传统的生产氧化铝的技术。因此，他们决定使用浮选脱硅技术，这样可以有效地增加氧化铝的浓度，减少二氧化硅的浓度，从而改善矿石的品质。针对氧化铝的浓度达到 47.82%，铝硅的浓度达到 4.66，他们还通过改变添加剂的种类、改变磨矿的细度、控制捕获剂的使用量和开展实际的实验，最终成功地实施了这一技术。经过正浮选分离[33]，杨林等人发现，该方式可以有效地生产出高质量的氧化铝，其中精矿的氧化铝含量高达 52.5%，而且铝硅比也高达 8.37。此外，通过改变 pH 值、抑制剂的使用、捕收剂的使用以及磨矿的粒径，杨林[33]等人还进行了闭路实验，结果表明，在合理的工艺条件下，浮选分离出的 Al_2O_3 的品位高达 52.16%，而且铝硅比也高达 7.69，其回收率也高达 70.30%。得到了 TFe 含量 20.89% 的浮选铝精矿。

随着技术的不断发展，正浮选脱硅技术已成为铝土矿选矿领域的重要手段，尤其在高硅铝土矿资源的开发利用上，其应用前景十分广阔，可以显著提升资源的利用率，并带来可观的经济效益。

近年来，我国的正浮选法脱硅技术取得了长足的进步，捕收剂、新工艺以及浮选设备的应用都取得了显著的进展。蓝柳佳和他的团队就曾利用 BM-3 和油酸钠的混合物，结合“1 粗 1 精 1 扫”的浮选技术，获取 Al_2O_3 72.28%、14.54 的优质硅铝土矿[34]，其中 9.79 的硅含量大大超过原来的水平。

尽管正浮选脱硅技术具有许多优势，比如不受粗粒度影响，药剂消耗少，产品产率较高，流程设计简单，易操纵，但它仍有一些不足之处，比如产品上浮量较大，使用的药剂种类繁多，消耗的能源较多，产生的泡沫较厚，导致精矿中的药物残留较多，使得最终的产品很难沉淀，从而影响了后续的工艺进行。

2) 反浮选脱硅法

通过反浮选脱硅法，可有效地将一水硬铝石、硅矿物及其他矿物分离开来。该法的核心原理是通过调整剂碳酸钠、淀粉、六偏磷酸钠的选择性作用，有效地阻止一水硬铝石的形成，同时也可以提高硅矿物的选择性，实现硅矿物与一水硬铝石的分离[35] [36]。近年来，反浮选法的研究也获得了重要的进步，尤其针对一水硬铝石型铝土矿，采取的反浮选脱硅法的优势显著，可有效减少硅元素的含量，提高分离效率，例如，简胜等[37]以胺为捕收剂，选用调整剂碳酸钠、淀粉和六偏磷酸钠：研究了反浮选法脱去一水硬铝石型铝土矿中硅元素的适宜工艺条件；研究结果表明，在试验的 16 种胺试剂中，浮选效果最好的是 Wi-13，且在酸性条件下，尤其是在 pH 值在 4 左右时，作业回收率、精矿的铝硅比和品位都比在碱性条件下更优异。

在铝土矿的反浮选流程中，捕收剂的类型大致划分为阴电离捕收剂和阳电离捕收剂。阴电离捕收剂，例如脂肪酸盐，往往会添加金属离子来提高其吸附能力，而这种方法的工艺流程比较繁琐，因此其吸附能力往往也比较弱。尽管烷基胺在捕获石英、萤石等矿物方面取得了许多进步[38]-[41]，但在捕获层状的高岭石、叶蜡石等矿物方面的研究仍非常匮乏。因此，在我们的实际工作中，高岭石、叶蜡石以及其他类似的矿物的捕获率往往都比较低。为了改善铝矿的性能，开发出具有较强脱硅能力的技术显得尤为迫切。根据有关的研究结果，这种技术可有效地应对具有较高硅元素的铝土矿资源的污染问题[38] [39]。虽然用烷基胺浮选石英等硅酸盐矿物[40]和萤石盐类矿物[41]的相关研究已经在河南省，苏欢欢[42]和他的团队选择了当地的铝土矿和单独的石头，并使用了 4 种常见的胺类和实验室制造的 C_{401} 作为吸附剂。通过这些测试，他们探讨了不同类型的吸附剂在处理这些材料时的浮选脱硅能力。最终，他们发现季铵盐

类吸附剂 1227、1231 和 C₄₀₁ 的浮选脱硅能力最优。在这些测试中, 我们发现, 在特定的测试条件下, 这些吸附剂能够很好地处理铝硅比和产率。在这项实验中, 我们将-0.074 mm 的粗砂作为主要成分, 占比达到 75%。此外, 我们还调整了 pH 值, 经过实验测定, 5 号胺类捕收剂 C₄₀₁ 的有效捕收率达到 150 g/t, 其中 1227 号胺类捕收率较强, 而 1231 号胺类捕收率较差, 十二胺和季铵盐的捕收率则依次递减, 而且当矿浆 pH 从碱性变为酸性时, 捕收率也会相应提升。周杰强等人在重庆一处高硫高硅铝土矿的浮选实践中, 通过混合加药的方式, 发现 5 号胺类捕收剂的有效捕收率优于十二胺和季铵盐, 其中 5 号胺类捕收率更优。采取一种革命性的一粗两扫反浮选工艺, 在磨矿粗细达-0.075 mm、矿浆 pH 值达 8.0、浮选矿浆数量达 25% 的情况下, 结合采用水玻璃作为控制剂, 以及松醇油作为起泡剂, 并以季铵盐与丁基黄药作为组合捕获剂, 终于取得了高质量的精矿氧化物铝, 其中硫成分达 0.11%, 而且氧化物铝的回收率达 79.67% [9], 表现出色。

尽管反浮选脱硅具备许多显著的优势, 比如比正浮选脱硅更加高效、准确、灵活, 它仍未能完全满足当今的实际需求, 这是因为它的结构特征、材料特征、污染特征、环境特征等都存在着诸多挑战, 这些挑战导致了它目前尚未达到完全成熟的水平, 尤其是针对细泥的处置, 更是需要采取阳离子捕收剂, 才能更好地控制污染源, 提高净化效率, 从而达到更好的经济效益。由于它的特殊特征, 它的选择性和捕获效率都很低[14]。

4.5. 生物脱硅法

铝土矿生物脱硅技术是一种新兴的环保矿物脱硅加工方法, 通过在特定环境下利用微生物的代谢活动, 使其代谢产物与硅酸盐矿物之间发生相互作用, 改变硅酸盐矿物的化学性质, 分解或溶解硅酸盐矿物, 从而从铝土矿中去除硅元素。常用的微生物主要包括细菌、真菌和藻类。其中环状芽孢杆菌、粘液芽孢杆菌、胶质芽孢杆菌以及黑曲霉菌等是主要的脱硅细菌[43]。

张贤珍利用多种诱变工艺技术, 主要是紫外光诱变、生化诱变、复筛、传代测试[44], 最终成功培养出具有良好的浸矿脱硅性能的 JG-02-U₀₂, 它使河南某工厂的铝土矿的铝硅比得到有效的改善, 由原来的 5.17 升至 9.77, 而且在长期的传代进程中, 这种改善仍然维持着良好的水平。此外, 张贤珍还深入研究了混合菌株与连续浸出技术的相互作用, 结果表明, 当两种工艺技术相互配置, 经过数天的连续浸出, 就能够有效地改善铝硅比, 达到 13.21。脱硅率达到 57.4%, 说明菌株混合使用并采用连续浸出工艺有助于深度脱硅。单宇[45]分别比较了三株菌株(M78 H19 D27)在三种培养基中的脱硅效果, 研究结果显示三株菌株均在有氮培养基中脱硅效果最优。研究人员对三株细菌的实验条件采用了单因素实验优化; 培养基碳源氮源比例采用响应面分析法优化; 在优化之后的培养条件及培养基里进行 7 d 浸矿实验, 结果显示在优化后的培养基里 H19 D27 发酵液中的二氧化硅浓度分别达 55 mg/L, 54 mg/L 分别高于优化前的 50 mg/L, 51 mg/L, 而在 M78 中脱硅效果没有显著变化。Vasan S. S. 等人[46]研究采用杆菌胶质类细菌对哈萨克斯坦矿床的高岭石进行浸出, 研究发现, 当浸出温度控制在 28℃~30℃时, 浸出液固比为 5 时, 经长达 9 d 的时间浸出后, 原矿中有 62% 左右的硅酸盐被脱除, 所得精矿 Al₂O₃ 的回收率高达 99%。

经钟娟娟[47]、Zhou [48]及其他多种环状芽孢杆菌的实验证实, 它们的脱硅能力极为出色, 而且还拥有良好的酸碱分离、糖分分离以及形成明确的微生态-矿物复合体的特点。此外, 多黏类芽孢杆菌还会与高岭石结合, 生成丰富的富含硅的悬浮液, 从而提升对硅矿物的浮选率; 而且, 由于菌群及其代谢物的共存, 铁矿物的溶解度也要远远超出高岭石, 从而提升了铝土矿的净化率。因此, 多黏类芽孢杆菌可以显著提高铝土矿的含量, 从而实现铁和硅的高效去除。

通过以上的分析, 得到国内外脱硅方法的对比, 如下表 1。

Table 1. Comparison of silicone removal methods at home and abroad
表 1. 国内外脱硅方法对比

脱硅方法	国内研究情况	国外研究情况
化学脱硅	杨佳丽用化学法获得精矿；蒋正帅等实现碱液循环与脱硫脱硅及精矿质量提升	原理似国内，重试剂研发与连续化生产优化
生物脱硅	张贤珍诱变育优菌提铝硅比，单字筛菌定最佳培养基	广筛微生物，深研机制，借基因工程强化功能
浮选脱硅	正浮选郭鑫等用于高铁矿增效，杨林等优条件提质；反浮选简胜等明条件，周杰强等创新工艺提质	重高效环保药剂研发，设备智能精准，浮选流程成熟灵活，细粒浮选理论实践领先

5. 脱硅技术未来导向

首先对当前我国的氧化铝厂进行改造，即采用低成本，高效率的选矿脱硅工艺以及氧化铝生产工艺是今后氧化铝工业的重要研究方向。

新型脱硅剂的研发：开发高效、低毒、可生物降解的脱硅剂，提高脱硅效率，降低环境影响。降低脱硅剂的消耗，提高回收率也是目前研究的重点，解决该问题可进一步推广化学脱硅法。

生物脱硅技术：研究利用微生物代谢产物或酶解脱硅的方法，探索生物脱硅的可行性和经济性。目前由于微生物培育周期较长且浸出效率较低，仍无法大面积使用，但具有十分大的潜力，成为未来铝土矿脱硅的可靠选择。

纳米技术应用：通过纳米材料和纳米技术提高脱硅过程的选择性和效率，减少硅杂质的同时保持铝氧化物的高回收率。

工艺流程优化：结合计算机模拟和大数据分析，优化脱硅工艺流程，提高自动化和智能化水平。

通过对 DSP(难溶性硅酸盐)的有效分析，我们能够有效地回收并进行综合利用，从而大大降低废弃物的污染，同时又能够有助于资源的有效循环。此外，通过对铝土矿的脱硅处理，尾矿可以被有效地再次使用，从而为建筑材料、耐火材料、水泥材料等多种领域带来更多的经济价值[49]。DSP 的逆溶解性使得它能够随着温度的升高而变得越来越难被吸附，从而使得它们能够变得越来越细微，最终变得像一种微粒子一样，无论它们能够沉淀到多大的颗粒，都能够被吸附到拜尔法的管道内，从而造成管道的堵塞，阻塞了液体的循环，从而影响了液体的生产，此外，DSP 的污染也会使得热交换器的效率受到损害，因此，要想获得较好的铝回收率，就必须对 DSP 进行合适的处理，比如调整溶出、脱硅等参数，减少 DSP 的生成，定期对设备进行维护，还要对沉淀过程进行改进，从而达到最佳的结果。应当尽可能地降低它们给工厂带来的不利影响。针对铝土矿的选矿拜耳法工艺，目前的研究重点在于改善反浮选脱硅工艺，尤其是开发出具有更高选择性和更强捕收性的药剂，以期达到提高铝土矿的铝硅比的目的。此外，结合当前国内外的研究成果，以及本土氧化铝产业的实际情况，进一步改善正浮选脱硅工艺和药剂[14]，将是当前氧化铝生产行业的重要任务。

在进行脱硅处理时，正确的使用方法对于获得良好的脱硅效果至关重要。因此，在使用这种物料时，应该结合矿物特征、环境温湿度等因素，精准地调节使用剂的比例，使之符合要求。比如，在铝酸钠溶液中，应当按照硅含量的大小，调整使用剂的比例，从而获得更好的脱硅效率。此外，还应该进行相关的试验，结合实际情况，调整使用剂的比例，从而获得更好的脱硅结果。然而，王干干等人研究发现，超出正常范围的应用可能带来严重的后果，例如大幅度的污染物排放、严重的资源浪费以及对氧化铝的不良回收。因此，为了达到更好的经济性，应当合理添加棕刚玉除尘灰[50]，以及调整精矿的铝硅比，以期达到更好的资源循环利用效果。

6. 结语与展望

由于氧化铝工业的快速增长，许多原来有价值的铝土矿被过度消耗，只留下了一小部分。因此，如

何有效地利用这些资源，一直是一个值得深入探讨的课题。但是，现有的氧化铝生产技术，尤其是针对中低品位的铝土矿，依旧存在的问题。因此，有必要提升我们的氧化铝加工能力，并寻求更有效的解决办。一个可能的解决办就是引入先进的选矿和脱硅技术，并结合最新的科学知识，提升整个生态系统的可持续性。另外，可能会引入一系列的新型的环保和节能技术，来提升整个经济的可持续性。通过精心设计的选矿工艺，有效地去除了铝土矿中的杂质，大大增加了其中的铝和硅的含量，从而达到了满足客户要求的氧化铝生产效果。

拜耳法制备氧化铝过程中脱硅是一个复杂且重要的环节，直接影响氧化铝的质量和生产效率。随着对高纯度氧化铝需求的增加，尤其在高端电子和先进陶瓷材料领域，脱硅技术的研究正在向更高效、低成本和环保的方向发展。新的化学添加剂、改进的工艺参数调控以及更先进的设备正在研发中，通过合理选择脱硅剂、优化工艺条件和控制 DSP 生成，可以有效提高脱硅效果，进而提高氧化铝的纯度和回收率。未来的研究应继续关注新型高效脱硅剂的开发和工艺优化，以进一步提升拜耳法的经济性和环保性。

总而言之，拜耳法的脱硅技术是提升广西铝工业生产效率和产品质量的关键，它的发展将为广西铝行业的可持续发展带来重大影响力。

参考文献

- [1] 刘平, 晏阳. 广西铝土矿资源特征和现状及开发利用发展分析[J]. 前卫, 2021(16): 163-165.
- [2] 雷廷亮, 施柏钦, 李春焕. 广西铝土矿成分分析及除锌探究[J]. 山东化工, 2021, 50(17): 129-130, 133.
- [3] 何海洲, 杨志强, 郑力. 广西铝土矿资源特征及利用现状[J]. 中国矿业, 2014, 23(5): 14-17, 22.
- [4] 凌石生, 章晓林, 尚旭, 等. 铝土矿物理选矿脱硅研究概述[J]. 国外金属矿选矿, 2006, 43(7): 9-12.
- [5] 邱廷省, 吴紧钢, 吴承优. 铝土矿脱硅技术及其发展现状[J]. 矿山机械, 2015, 43(4): 8-13.
- [6] 陈占华, 陈湘清, 李莎莎, 等. 混合型铝土矿浮选脱硅试验研究[J]. 湖南有色金属, 2013, 29(4): 8-10.
- [7] 张志永, 田应忠. 河南某铝土矿新型捕收剂试验研究[J]. 轻金属, 2023(6): 1-4.
- [8] 张云海, 魏明安. 铝土矿反浮选脱硅技术研究[J]. 有色金属: 选矿部分, 2012(5): 37-39.
- [9] 周杰强, 严峥, 梅光军, 等. 重庆某铝土矿反浮选脱硅脱硅工艺技术研究[J]. 矿业工程, 2022, 42(1): 61-63, 67.
- [10] 邱怡锦. 低品位铝土矿的化学预脱硅与硅的资源化利用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- [11] 孙德四, 钟婵娟, 肖国光. 铝土矿预脱硅研究进展[J]. 江西科学, 2008, 26(2): 256-262.
- [12] 杨桂丽. 高硅铝土矿的综合利用[J]. 铝镁通讯, 2012(3): 13-14.
- [13] 李克庆. 铝土矿资源特征及其选矿脱硅技术[J]. 世界有色金属, 2017(13): 223-224.
- [14] 马智敏, 陈兴华, 王玉才, 等. 铝土矿选矿脱硅技术研究现状及前景展望[J]. 矿产综合利用, 2015(1): 1-6, 13.
- [15] 钮因健, 邱冠周, 周吉奎, 等. 硅酸盐细菌的选育及铝土矿细菌脱硅效果[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(2): 280-285.
- [16] 张贤珍, 林海, 孙德四. 直接/间接接触模式下 1 株硅酸盐细菌铝土矿脱硅研究[J]. 功能材料, 2013, 44(17): 2460-2464.
- [17] Dopson, M., Lövgren, L. and Boström, D. (2009) Silicate Mineral Dissolution in the Presence of Acidophilic Microorganisms: Implications for Heap Bioleaching. *Hydrometallurgy*, **96**, 288-293. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.11.004>
- [18] Mockovčiaková, A., Iveta, Š., Jiří, Š. and Ivana, K. (2008) Characterization of Changes of Low and High Defect Kaolinite after Bioleaching. *Applied Clay Science*, **39**, 202-207. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2007.06.002>
- [19] Groudev, S.N. (1987) Use of Heterotrophic Microorganisms in Mineral Biotechnology. *Acta Biotechnologica*, **7**, 299-306. <https://doi.org/10.1002/abio.370070404>
- [20] 曾晓希, 汤建新, 刘学端, 等. 一株有脱硅作用的产气肠杆菌的筛选和鉴定[J]. 工业微生物, 2007, 37(4): 50-54.
- [21] 李小坚. 烧碱法生产氧化铝石灰脱硅研究[J]. 世界有色金属, 2018(24): 6-7.
- [22] 齐利娟, 杨桂丽, 路晓涛, 等. 高镁石灰对铝土矿预脱硅及溶出性能的影响研究[J]. 轻金属, 2023(2): 11-14.

- [23] 蒋正帅, 夏飞龙, 张姗姗, 等. 低品位铝土矿的高效脱硫脱硅工艺研究[J]. 有色金属科学与工程, 2022, 13(3): 26-34.
- [24] 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.
- [25] Yuan, S., Xiao, H., Yu, T., Li, Y. and Gao, P. (2020) Enhanced Removal of Iron Minerals from High-Iron Bauxite with Advanced Roasting Technology for Enrichment of Aluminum. *Powder Technology*, **372**, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.05.112>
- [26] Lee, K.Y. and Mooney, D.J. (2012) Alginate: Properties and Biomedical Applications. *Progress in Polymer Science*, **37**, 106-126. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.06.003>
- [27] 刘瑛瑛, 张丽云. 铝酸钠溶液深度脱硅[J]. 轻金属, 2011, 56(10): 17-19, 52.
- [28] Rayzman, V. (1996) More Complete Desilication of Aluminate Solution Is the Key-Factor to Radical Improvement of Alumina Refining. Minerals, Metals and Materials Society.
- [29] Noworyta, A. (1981) On the Removal of Silica from Aluminate Solutions: Mechanism and Kinetics of the Process. *Hydrometallurgy*, **7**, 99-106. [https://doi.org/10.1016/0304-386x\(81\)90015-3](https://doi.org/10.1016/0304-386x(81)90015-3)
- [30] 和晓才, 谢刚, 李怀仁, 等. 超声波场下铝酸钠溶液脱除硅、铁工艺研究[J]. 轻金属, 2014(8): 17-22.
- [31] 王妍, 王旭, 薛凯, 等. 内蒙古某含银多金属硫化矿强化选别试验研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(5): 49-52, 57.
- [32] 郭鑫, 田应忠, 任朋. 西南某地高铁铝土矿浮选脱硅试验研究[J]. 轻金属, 2021(9): 10-12, 24.
- [33] 杨林, 锦仙, 阚赛琼, 等. 云南某堆积型高铁铝土矿铝、硅、铁分离工艺试验研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(3): 75-78, 83.
- [34] 蓝柳佳, 王丽, 孙伟, 等. 某高铝高硅铝土矿提质试验研究[J]. 非金属矿, 2022, 45(2): 59-62.
- [35] 黄传兵, 王毓华, 陈兴华, 等. 铝土矿反浮选脱硅研究综述[J]. 金属矿山, 2005(6): 21-24.
- [36] 李继文, 谢敬佩, 杨涤心. 现代冶金新技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [37] 简胜, 李晓阳, 付丹. 中低品位铝土矿反浮选脱硅研究[J]. 有色金属: 选矿部分, 2012(5): 40-43.
- [38] 王世辉, 叶雪均. 某难选铜矿石铜硫浮选分离试验[J]. 有色金属(选矿部分), 2007(5): 17-19.
- [39] 凌石生, 张文彬. 铝土矿反浮选脱硅药剂研究概述[J]. 国外金属矿选矿, 2008, 45(2): 20-24.
- [40] Smith, R.W. and L Scott, J. (1990) Mechanisms of Dodecylamine Flotation of Quartz. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, **7**, 81-94. <https://doi.org/10.1080/08827509008952667>
- [41] Bruque, J.M., Gonzalez-Caballero, F., Pardo, G. and Perea, R. (1982) Flotation of Fluorite with N-Alkylammonium Chlorides. *International Journal of Mineral Processing*, **9**, 75-86. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(82\)90007-2](https://doi.org/10.1016/0301-7516(82)90007-2)
- [42] 苏欢欢, 程敢, 马俊伟, 等. 胺类捕收剂对铝硅矿物反浮选脱硅试验[J]. 轻金属, 2021(8): 5-9.
- [43] 李广泽, 王洪江, 吴爱祥, 等. 生物浸矿技术研究现状[J]. 湿法冶金, 2014(2): 82-85.
- [44] 张贤珍. 硅酸盐细菌在铝土矿生物脱硅中的应用与机理研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2015.
- [45] 单宇. 铝土矿高效脱硅细菌的筛选及脱硅性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- [46] Vasan, S.S., Modak, J.M. and Natarajan, K.A. (2001) Some Recent Advances in the Bioprocessing of Bauxite. *International Journal of Mineral Processing*, **62**, 173-186. [https://doi.org/10.1016/s0301-7516\(00\)00051-x](https://doi.org/10.1016/s0301-7516(00)00051-x)
- [47] 钟婵娟, 肖国光, 曹飞, 等. 铝土矿脱硅微生物的定向筛选及脱硅性能[J]. 高校地质学报, 2013, 19(4): 692-699.
- [48] Zhou, Y., Wang, R., Lu, X. and Chen, T. (2010) Roles of Adhered Paenibacillus Polymyxa in the Dissolution and Flotation of Bauxite: A Dialytic Investigation. *Frontiers of Earth Science in China*, **4**, 167-173. <https://doi.org/10.1007/s11707-010-0021-9>
- [49] Chai, W., Huang, Y., Peng, W., Han, G., Cao, Y. and Liu, J. (2018) Enhanced Separation of Pyrite from High-Sulfur Bauxite Using 2-Mercaptobenzimidazole as Chelate Collector: Flotation Optimization and Interaction Mechanisms. *Minerals Engineering*, **129**, 93-101. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.09.017>
- [50] 王干干, 陈朝轶, 李军旗. 棕刚玉除尘灰协同低品位铝土矿脱硅[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2022, 39(1): 120-124.