

氧化铝产业绿色化发展关键技术研究及经济性分析

郭庆伦 马晶晶 张卫峰（山东鲁北企业集团总公司，山东 滨州 251909）

摘要：氧化铝是铝工业的重要原料，具有广阔的应用领域。近年来，随着国家对环境保护要求的不断提高和能耗标准的严格规定，我国氧化铝行业逐渐向绿色低碳、高效节能方向发展。推进氧化铝行业绿色化发展，不仅可以保护生态环境，还能够最大限度的实现节能降耗、降低生产运营成本、提高企业经济效益。本文从氧化铝产业发展现状、氧化铝产业绿色化发展关键技术研究与应用、氧化铝产业绿色化发展经济性分析和氧化铝产业发展前景等方面进行了论述，可为氧化铝企业提高企业绿色化水平提供指导和参考。

关键词：氧化铝；绿色化发展；关键技术；经济性分析；经济效益

0 引言

氧化铝作为铝工业的重要原料，可广泛应用陶瓷、耐火材料、电子材料、催化剂、抛光材料、化工和冶金等领域。近年来，随着新能源汽车、光伏等新兴产业的快速发展，对氧化铝等新材料的需求不断增加，推动了氧化铝市场的持续增长。氧化铝上游原料主要是铝土矿、烧碱、石灰等（每生产1吨氧化铝就需要消耗约2.3吨铝土矿），下游主要是生产电解铝、刚玉、陶瓷、耐火材料制品及其他氧化铝化学制品，并最终应用于新能源、电子信息、电力、建筑、包装材料、机械制造、航空航天等领域。在生产氧化铝过程中会产生相应污染物和副产物，且生产能耗较高。积极研发新技术将氧化铝进行绿色化发展，不仅能够保护环境、降低能耗，还能降低企业生产成本、提高企业经济效益。近年来，随着国家“双碳”战略的大力推进，氧化铝产业绿色化发展逐渐受到了广大氧化铝及上下游生产企业的重视。

1 氧化铝产业发展现状

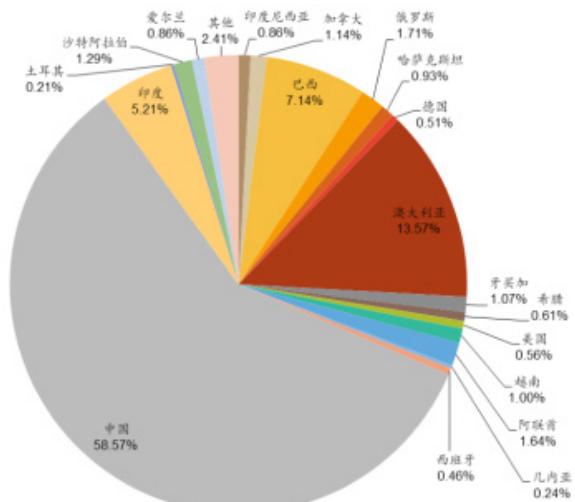


图 1 2023 年全球氧化铝产量占比图

近年来，中国氧化铝产量据全球前列。2023年，全球氧化铝产量1.4亿吨。其中，中国氧化铝产量为8200万吨，占全球产量的58.57%（2023年全球氧化铝产量占比如图1所示）。较高的氧化铝市场占有率，对我国掌握在全球氧化铝市场定价权、银行全球氧化铝产业发展起到重要作用。目前，我国氧化铝产能超1亿吨，山东、山西、广西、河南等省份氧化铝产业规模较大，长期引领行业稳健发展。

2 氧化铝产业绿色化发展关键技术研究与应用

2.1 高效拜耳法生产氧化铝关键技术

高效拜耳法生产技术是当前氧化铝生产的重要工艺之一。该技术是通过优化工艺流程，显著提升氧化铝的溶出率并降低能耗。采用高压釜和管式反应器等新型高效的溶出设备，可以大幅提升溶出效率。这些设备不仅结构紧凑、耐腐蚀，还能在高温高压条件下稳定运行，确保反应过程的安全性和连续性。改进溶出条件也是提高生产效率的关键措施之一。通过精确控制溶出温度和压力，能够显著加快溶出反应速度。此外，添加适当的石灰石或苛性碱等添加剂，可以进一步优化矿浆的流动性，促进铝土矿中氧化铝的有效溶出，从而提高最终产品的纯度和收率。为了实现更加高效的生产，还可以引入先进自动化控制系统。通过实时监测温度、压力、pH值等关键工艺参数，并利用智能算法进行动态调整，可以确保整个溶出过程始终处于最佳状态。这种精准控制不仅有助于提高生产效率，还能减少不必要的能源浪费和原材料损耗。但是，在直接使用拜耳法生产氧化铝的过程中，铝土矿中的铁元素完全进入赤泥之中，过高的铁含量会导致溶出赤泥量较同品位的低铁铝土矿大得多，且赤泥中的铁元素主要以针铁矿、赤铁矿等磁性较弱的矿物形式存在。

2.2 赤泥综合利用制备化工产品关键技术

赤泥是制铝工业提取氧化铝时产生的强碱性极细颗粒工业固体废弃物，因其含铁量较大，外观与赤色泥土相似，故被称为赤泥（或红泥）。据测算，2023年我国赤泥产生量是11953.9万吨，综合利用率仅为9.8%。赤泥的不合理堆放，不仅容易污染大气、土壤和地下水，还占用大量土地和管理成本。近年来，许多企业尝试将赤泥用于建材、路基等领域，并取得了一定成果。本文主要从赤泥的化学特性出发，研究赤泥综合利用制备化工产品关键技术：①从赤泥中分离铁硅并实现钪富集技术：该技术主要是以赤泥为原料，通过还原焙烧-磁选除铁、酸浸出除硅、氢氧化钠溶液浸出除铝得到除铝后的含钪滤渣。该技术能够高效的富集回收赤泥中的钪资源并综合回收铁、铝、硅等有价组分；②用赤泥制备净水/吸附剂技术：由于赤泥颗粒具有分散性好、比表面大、溶液中稳定的特性，导致赤泥拥有良好的吸附性。将赤泥进行改良处理制成吸附材料可以达到以废治废的目的；③赤泥综合利用制备絮凝剂技术：絮凝剂是一种能够使水中的悬浮物、胶体颗粒等聚集形成较大絮体的化学物质，从而实现固液分离的目的。利用赤泥制备絮凝剂主要是基于赤泥中所含的一些金属离子和活性成分的絮凝活性。赤泥综合利用制备絮凝剂技术主要有酸浸法和碱熔法两种工艺。酸浸法是一种常用的利用赤泥制备絮凝剂的方法。该方法通过使用酸溶液对赤泥进行浸出处理，使赤泥中的金属离子溶解出来，然后通过调节溶液的pH值等条件，使金属离子水解生成絮凝剂。碱熔法是另一种利用赤泥制备絮凝剂的方法。该方法通过将赤泥与碱混合，在高温下进行熔融反应，使赤泥中的金属氧化物与碱发生反应，生成可溶的盐类。然后将熔融产物进行水浸处理，使盐类溶解出来，再通过后续的处理步骤制备絮凝剂。

2.3 盐酸加压浸出-浸出液萃取分离-氯化铝溶液直接热解生产氧化铝关键技术

盐酸加压浸出-浸出液萃取分离-氯化铝溶液直接热解生产氧化铝关键技术是由东北大学张廷安课题组提出的一种新型技术（工艺流程图如图2所示），主要技术路线是：①盐酸浸出及装置优化：以高铁铝土矿为原料，采用盐酸浸出的方式来提取其中的铝元素。在这一过程中，盐酸与铝土矿中的铝及其他金属元素发生化学反应，使它们以氯化物的形态进入浸出液。为了提高浸出效果，该技术创新性地使用了新型

内环流叠管式反应装置。这种装置通过特殊的结构设计，能够增强物料的混合和传质效果，使盐酸与铝土矿充分接触，加快反应速率，提高铝元素的浸出率；②浸出液萃取分离：浸出后得到的浸出液中含有多种金属离子，需进行萃取分离以获得纯净的铝离子溶液。在萃取过程中，铝离子存在于水相中，而有机相则通过水反萃取后可循环使用。铁离子及其他金属离子在反萃取过程中进入水相中，形成以氯化铁为主要成分的混合溶液。萃取分离过程的关键在于选择合适的萃取剂和萃取条件，以确保铝离子与其他金属离子的有效分离。通过精确控制萃取剂的浓度、萃取温度、萃取时间等参数，可以实现高效的萃取分离效果，提高产品纯度；③氯化铝溶液直接热解及副产物处理：分离后的氯化铝溶液直接进行热解，得到氧化铝产品。热解过程中，氯化铝分解产生氧化铝和HCl气体，HCl气体可以循环使用，返回至浸出工序，不仅降低了生产成本，还减少了废气的排放。浸出渣主要成分为二氧化硅，该浸出渣可使用微波处理制备碳化硅后用于销售。

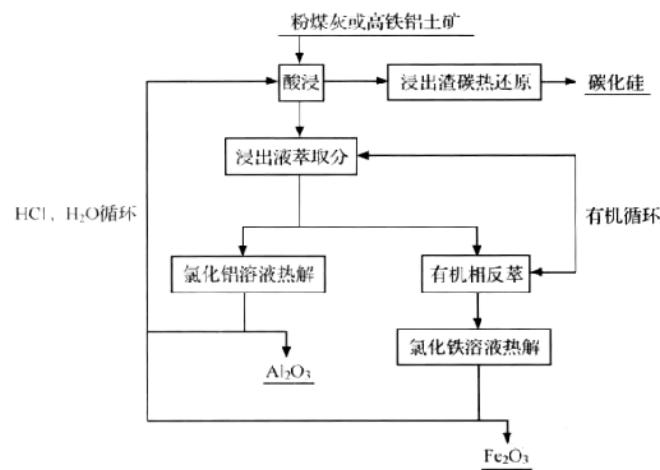


图2 盐酸加压浸出-浸出液萃取分离-氯化铝溶液直接热解生产氧化铝

3 氧化铝产业绿色化发展经济性分析

3.1 鲁北海生生物：打造盐-碱-电-铝产业循环经济产业链

山东鲁北海生生物有限公司公司采用拜耳法氧化铝制取工艺，以国外三水铝土矿为原料，采用低温管道化溶出和一段式分解等先进技术进行生产。公司生产的氧化铝产品质量稳定，化学指标稳定且全部达到国家一级标准，Si低于国标0.012%，Na₂O低于国标0.05%。生产过程中，公司特别重视余热利用，公司焙烧流化床预热利用项目每小时可节省蒸发用蒸汽

2.72 吨，每年可为公司增加经济效益 300 余万元。在乏汽回收方面，每年可为公司回收蒸汽约 7000 吨，为公司节省费用为约 100 万元。

近年来，鲁北海生生物有限公司依托集团总公司现有的百万吨盐场丰富的卤水资源和热电厂的电力生产烧碱；热电厂采用海水冷却、电和蒸汽用于总公司生产，排放的煤灰渣、脱硫石膏用作水泥混合材料；氧化铝装置采用进口铝土矿，以拜耳法工艺生产，所需烧碱来自氯碱厂，蒸汽来自热电厂。氧化铝产品正由冶金型氧化铝向阻燃氢氧化铝、高温氧化铝和 4A 沸石等化学品铝转型，逐步形成了盐-碱-电-铝产业链循环经济产业链，全面实现了氧化铝的清洁生产，经济效益和社会效益显著。

3.2 中铝山东有限公司：绿色低碳发展促企业高质量发展

中铝山东有限公司于 2015 年 1 月 16 日注册成立，是中国铝业股份有限公司的全资子公司，公司主营业务涵盖氧化铝、铝基新材料、热电等领域。该公司作为淄博市金属新材料产业链链主企业，聚焦精细氧化铝主业，不断加快推进转型升级延链拓链，深化与高等院校合作攻关赤泥综合利用世界难题，运用自身科研平台优势，立足高纯超纯产业，打破了国外垄断、服务国家战略，推进承接国家项目落地，聚力科技创新，成功突破“卡脖子”技术，打造世界一流中高端精细氧化铝企业和细分领域专精特新企业。

近年来，该公司充分利用赤泥堆场坝顶及坡面，投资 7568 万元建设第一赤泥堆场及周边设施光伏发电项目。据该公司测算，其建设的第一赤泥堆场及周边设施光伏发电项目年可节约标准煤约为 6125.39 吨，每年可减排 SO_2 约为 52.1 吨、 CO_2 约为 1.6 万吨、 NO_x 约为 45.33 吨；对焙烧炉和蒸发器进行节能技术改造。以全要素对标管理工作为抓手，改善设备能效水平，践行绿色节能降碳，促进能效提升。以技改项目为抓手，2023 年以来累计投资 6000 余万元，实施赤泥预处理胶凝材料、赤泥干燥关键技术研究及工业试验、赤泥压滤工序安全环保治理等项目，赤泥综合利用赤泥消纳难题取得重大突破性进展；投资 5.65 亿元，实施了矿场全封闭环保改造及储运优化、第二赤泥堆场南区优化及生态修复、输送皮带无组织扬尘环保治理等项目，有效减少了颗粒物排放，提升了厂区整体环境质量，公司综合能耗、单位产品污染物排放指标持续下降。通过技改项目的大力推进，公司工业废水实

现“零排放”，粉煤灰、脱硫石膏等固废实现 100% 综合利用。窑炉具备了烟气 $\text{SO}_2 < 50 \text{ mg/Nm}^3$ ， $\text{NO}_x < 50 \text{ mg/Nm}^3$ ，窑炉烟气 $\text{PM} < 10 \text{ mg/Nm}^3$ 的超低排放能力，年减少 SO_2 排放量 92 吨，减少 NO_x 排放量 107 吨；项目建成后，预计每年可增加利税 12000 万元，增加产值 5.2 亿元，经济效益和社会效益非常显著。

4 氧化铝产业绿色化发展前景

近年来，中国氧化铝产业呈现出持续扩张的态势。据有关机构预测，2024 年中国新增氧化铝产能 360 万吨/年，2025 年新增氧化铝产能 1320 万吨/年，2026 年及之后新增氧化铝产能 680 万吨/年。随着全球对环境保护和可持续发展的重视程度不断提高，氧化铝产业的绿色化发展已成为行业的必然趋势。并且，随着新能源、新材料等新兴产业的快速发展，对高品质氧化铝产品的需求也将不断增加，为氧化铝产业的绿色化发展提供了广阔的市场空间。

5 结束语

随着全球对生态环境保护和可持续发展的日益重视，氧化铝产业作为重要的基础原材料产业，正面临着前所未有的绿色转型压力与机遇。绿色化发展需要大量的资金投入和技术支持，特别是对于中小型企业来说绿色化转型尤为困难。所以，氧化铝行业企业应积极探索经济、高效、实用性强的绿色化发展新技术进行应用，不断提高氧化铝产业的绿色化水平。

参考文献：

- [1] 刘爽, 张鹏宇, 滕藤, 等. 脱附土水化活性机理初探与提高途径研究 [J]. 中国水泥, 2021,(S1):103-106.
- [2] 吴世超, 朱立新, 孙体昌, 等. 赤泥综合利用现状及展望 [J]. 金属矿山, 2019,(06):38-44.

作者简介：

1. 郭庆伦 (1975-) , 男, 汉族, 山东省滨州市人, 毕业于东北大学, 大学本科, 工程师, 山东鲁北企业集团总公司, 研究方向: 化工工程、化学分析及质量管理等。
2. 马晶晶 (1985-) , 女, 汉族, 山东省滨州市人, 毕业于青岛科技大学, 大学本科, 工程师, 山东鲁北企业集团总公司, 研究方向: 化工生产技术、系统工艺优化等。
3. 张卫峰 (1991-) , 男, 汉族, 山东省滨州市人, 毕业于宁夏大学, 大学本科, 工程师, 山东鲁北企业集团总公司, 研究方向: 化工工程、化学分析等。