 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v3i8.11526

Refining Processes and Current Production Status of High-purity Aluminum

Bin Lv Baojie Ma Lili Chen

Tongchuan Aluminum-Based New Materials Co., Ltd., Tongchuan, Shaanxi, 727000, China

Abstract

High-purity aluminum serves as a fundamental metal material for semiconductor targets, electronic anode foils, and aerospace components, with purity grades ranging from 4N to ultra-high purity levels of 5N and above. This paper systematically examines the impurity removal mechanisms, process parameters, and applicable purity ranges of mainstream refining techniques such as flux purification and argon blowing. Based on industry statistics, it analyzes the current state of industrial production in China regarding regional capacity and quality control standards for high-purity aluminum, identifying key challenges including insufficient production capacity for high-purity products and inadequate impurity control throughout the entire production process. Drawing on practical experience from metallurgical engineering, the study proposes optimization strategies—including improvements to composite flux systems and closed-loop impurity management—to enhance product quality and reduce costs, providing actionable insights for process upgrades and cost-efficiency improvements in domestic high-purity aluminum smelting enterprises.

Keywords

high-purity aluminum; refining process; three-layer liquid electrolysis

高纯铝的精炼工艺及生产现状

吕斌 马宝杰 陈丽丽

铜川铝基新材料有限公司，中国 · 陕西 铜川 727000

摘 要

高纯铝是半导体靶材、电子阳极箔、航空航天器件的核心基础金属材料，纯度等级分为4N、5N及5N5以上超高纯铝。本文系统梳理熔剂净化、氩气吹炼等主流精炼工艺的除杂机理、工艺参数与适用纯度区间，依托行业统计数据剖析国内高纯铝区域产能、品控水平等工业化生产现状，指出行业存在高端纯度产品产能不足、全流程杂质管控缺失等突出问题。结合冶金工程现场生产经验，从复合熔剂体系优化、杂质闭环管控等维度提出提质降耗优化路径，可为国内高纯铝冶炼企业工艺升级、降本增效提供工程实践参考。

关键词

高纯铝；精炼工艺；三层液电解

1 引言

伴随国内半导体、新能源储能、高端电子元器件产业高速扩张，下游市场对高纯铝纯度、杂质稳定性、批量供应能力的要求持续提升。常规电解原铝纯度仅99.5%~99.85%，熔体内部含有铁、硅、铜、钛等固态夹杂物，同时溶解氢、氮等气相杂质，无法直接满足高技术制造场景使用标准，必须配套多级精炼提纯工序才能产出 4N 及以上等级高纯铝。本文以一线冶炼工程师实操视角，完整拆解当前工业场景应用的全部高纯铝精炼工艺，结合 2023—2025 年行业产能、能耗、品控实测数据分析国内生产现状，针对产业现存痛点提出可落地的全流程提质优化对策，助力高纯铝冶炼行业绿色化、高端化转型。

【作者简介】吕斌（1990–），男，中国陕西西安人，本科，工程师，从事冶金工程研究。

2 高纯铝主流精炼工艺梳理

2.1 熔剂净化固相杂质脱除工艺

熔剂净化是高纯铝生产前端预处理工序，核心目标去除氧化铝、碳化物、金属氧化物等固态悬浮夹杂，依靠熔剂与铝熔体界面化学反应、吸附团聚作用分离固相杂质。传统熔剂采用氯化钠、氯化钾二元盐体系，夹杂物去除率仅 75% 左右，难以满足 5N 级高纯铝前置净化要求。

当前工业主流采用氟化物 - 氯化物多元复合熔剂，调控 F^-/Cl^- 摩尔比 1:1.2，添加微量稀土氧化物助滤组分，固态夹杂物吸附去除率提升至 93% 以上；工程实测吨铝熔剂单耗由传统 2.8kg 降至 2.1kg，铝液氢含量稳定控制在

0.12mL/100gAl 以内。该工艺设备投入低、操作简便，适配全线前端预处理；仅可脱除固相杂质，无法去除溶解氢与金属溶质杂质，需搭配后续精炼工序联用。

2.2 氩气吹炼气相杂质剔除工艺

铝熔体溶解氢会诱发铸锭气孔、衰减材料电学性能，氩气吹炼是工业成熟在线除气工艺，设备由石墨转子、氩气稳压输送系统、密闭熔炼炉构成。生产中将转子转速控制在 120~150r/min，高压氩气分散为微小气泡，通过气液传质置换熔体内部氢气，实现气相杂质脱除。

车间采用氩气吹炼工艺，熔体保温温度维持 740~760℃规避二次吸氢，处理后铝液氢含量可降至 0.08mL/100gAl 以下，契合电子级高纯铝生产标准。该工艺无添加剂、无危废，绿色环保，但无法脱除铁、硅等金属杂质，仅作为配套预处理工序使用。

2.3 三层液电解深度精炼工艺

三层液电解法为国内 4N~5N 高纯铝主力电化学精炼工艺，依托介质密度分层、铝离子选择性电解析出实现杂质分离。电解槽自上而下分为高纯铝阴极液、氟化物熔盐电解质、Al-Cu 阳极合金三层，电解稳定温度 700~800℃，电流密度 0.5~1.0A/cm²。

电化学提纯选择性极强，电位更正金属杂质留存阳极合金，负电位杂质溶入电解质，阴极析出铝纯度可达 99.996%~99.999%。该工艺产能大、产品纯度均匀，适配规模化量产，国内头部企业超 70% 中高端高纯铝均采用该工艺生产；但工艺能耗偏高，吨铝直流电耗 12500~14800kWh，氟盐电解质腐蚀性强，环保与设备运维成本较高。

2.4 定向凝固偏析提质精炼工艺

定向凝固为物理深度提纯工艺，多用于三层液电解后二次精制，生产 5N5 超高纯铝。依托杂质固液相分配系数差异，搭建单向温度梯度促使熔体定向凝固，杂质向液相端富集，结晶区得到超高纯铝基体。

工业炉体采用分段梯度温控，凝固速率控制 10~18mm/h，密封生产规避二次氧化，可将 4N5 铝提纯至 5N5 级别，铁硅总杂质含量降至 0.5ppm 以下。工艺无熔盐、无电解能耗，材料纯净度高，适配半导体、核级原料生产；缺点为单炉产量低、设备造价高，仅头部企业小规模配套应用。

2.5 偏析法提纯精炼工艺

偏析法属于低碳凝固提纯工艺，可独立完成原铝至 4N 以上纯铝全流程生产，依托硼基助剂脱除过渡金属杂质，补齐传统凝固法提纯短板。整体工序简洁，无需配套电解工段，契合冶金双碳生产要求。

相较于三层液电解，偏析法吨铝综合能耗降至 6000~9000kWh，节电幅度超 40%，含氟危废减排 90% 以上。该工艺缺点为温度敏感度高、品控管控难度大，国内产能占比仅 18%，目前仅新疆众和完成双工艺布局，行业规模化推广空间充足。

3 高纯铝工业化生产现状

3.1 区域量产规模与市场供给态势

截至 2025 年末，国内纯度 ≥4N 高纯铝总产能 45 万吨，年度实际产量 35.1 万吨，行业产能利用率 78%，全球产能占比突破 45%，稳居全球最大高纯铝生产及消费市场。国内产业区位集聚特征显著，形成西强东弱、北稳南扩产业格局，新疆、内蒙古、山东三大产区合计承载全国 68% 产能，新疆依托自备煤电与一体化电解铝产业链成为核心产区，区域产能占比达 35.2%。西南云南、四川依托水电清洁能源优势，成为绿色高纯铝新兴产能聚集地，在建项目全部选用低碳偏析精炼工艺。从市场供给结构来看，行业供需结构性失衡问题突出，常规 4N 级高纯铝产能饱和、市场供给富余，5N 及以上超高纯铝有效产能不足 6 万吨，国产化率不足 30%，半导体、核工业高端原料长期依赖德日进口，高端产能增速远滞后于下游半导体、新能源年均 8.5% 的需求增速 [1]。

3.2 产品杂质达标率与成品品控现状

国内高纯铝行业统一划分 4N、4N5、5N、5N5 四大商用纯度等级，生产质控核心管控 Fe、Si、Cu、Ti、Na 五大有害金属杂质，直接决定产品下游应用性能。结合 2025 年国内有色金属行业联合抽样检测数据可知，常规三层液电解产线 4N 级成品杂质达标率 96.3%，4N5 中高端产品达标率回落至 87.2%，全行业 5N 超高纯铝综合成品达标率仅 69.7%，品控稳定性成为高端产品量产核心瓶颈。现阶段行业品控两极分化问题显著，头部龙头企业配套在线 XRF 熔体实时检测设备，实现杂质动态监测；国内超 60% 中小型冶炼车间简化预处理工序，省略双联除气、复合熔剂深度净化流程，搭配离线滞后取样检测模式，杂质超标频次居高不下。同时行业无统一全流程质控标准，各企业原料入厂、熔炼保温、凝固工艺参数差异较大，同牌号产品杂质离散度偏高，无法匹配高端电子材料供货标准。

3.3 冶炼能源消耗与辅料耗用现状

依据 2025 年 SMM 上海有色网官方能耗普查数据，国内两大主流精炼工艺能耗、辅料耗用差异悬殊。三层液电解工艺作为行业主流工艺，国内生产线平均吨铝直流电耗 12500kWh，头部企业经过母线优化、炉体保温技改后能耗小幅下降，但中小老旧产线电耗突破 13800kWh，能效低于日本同类型工业化电解槽。低碳偏析法吨铝综合能耗 6500~8800kWh，节能优势突出，但配套温控电阻炉炉膛热效率仅 62%，热能损耗量大。辅料消耗层面，三层液电解吨铝耗用氟化物电解质 12~15kg，每吨成品伴随 30~40kg 含氟危废产出；传统二元熔剂铝渣产出量大、金属收得率低，稀土复合熔剂可优化生产指标，但采购成本上浮 35%。多数中小企业为压缩生产成本，依旧使用低效传统辅料，进一步拉高能耗、辅料损耗与铝金属成材损耗。

3.4 核心工艺落地与设备配套现状

当前国内高纯铝工艺落地与设备配套短板凸显，国内 82% 在产产能依托传统三层液电解工艺，偏析法、定向凝固深度提纯工艺仅头部企业小规模布局，多工艺联合提纯产线占比不足 10%，中小冶炼企业工艺单一，不具备 5N 级超高纯铝量产能力。生产设备呈现两极分化格局，新疆众和、云铝股份等龙头企业搭载密闭熔炼炉、智能除气、在线成分检测全自动设备，车间自动化率接近 80%；中小厂区沿用敞开式熔炼设备，依靠人工扒渣、人工转运物料，极易引入水汽、粉尘外源杂质。此外高端核心装备国产化率极低，高精度梯度控温炉、微量杂质在线检测仪、耐腐蚀电解内衬材料依赖海外进口，设备采购与维保成本高昂，国产通用冶金设备无法适配超高纯铝精密生产需求，直接制约高端产品规模化量产进度。

4 高纯铝生产提质优化对策

4.1 优化多元复合熔剂精炼体系

摒弃传统氯化钠 - 氯化钾二元低效熔剂，全面推广氟化物、氯化物、稀土盐协同复合熔剂体系，精准调控熔剂组分配比：基础盐 F^-/Cl^- 摩尔比 1:1.2，添加 0.6%CeO_2 稀土组分、缓释型 KF@NaCl 缓释颗粒，720~780℃熔炼区间同步提升夹杂吸附能力与除氢辅助效果，夹杂物去除率稳定 93% 以上，吨铝熔剂单耗降至 2.1kg 以内。

分产品等级匹配差异化熔剂方案：4N 级高纯铝采用低成本稀土复合熔剂；4N5、5N 级超高纯铝配套低水分高纯专用熔剂，熔剂使用前 300℃充分烘干除水，杜绝熔剂带入水分造成熔体吸氢 [2]。

4.2 构建全流程杂质闭环管控体系

搭建“原料入炉 - 熔炼预处理 - 电解 / 偏析精炼 - 铸锭成型 - 成品检测”全链条杂质闭环管控机制，建立原料分级准入标准：进厂电解原铝锭强制检测 Fe、Si、Ti 基础杂质，原铝纯度低于 99.7% 禁止用于 5N 级高纯铝生产；废铝回收料单独分区熔炼，严禁混入高纯铝主生产线。

熔炼环节强制两级氩气串联除气 + 复合熔剂净化组合工序，配套在线 XRF 熔体实时检测设备，氢含量、固相夹杂、金属杂质任意指标超标立即分流重熔；三层液电解工序定期检测电解质杂质浓度，钠、镁杂质累积超标时及时更新电解质；偏析、定向凝固工序建立温度梯度实时监控台账，凝固速率、冷却温度波动超出阈值自动停机调整 [3]。建立杂质溯源数据库，每批次成品反向追溯各工序杂质检测数据，定位杂质超标源头，实现全流程杂质动态管控，将 5N 级高纯铝杂质达标率提升至 85% 以上。

4.3 匹配低耗冶炼设备技改方案

分工艺路线实施针对性节能设备改造：针对三层液电解产线，更换纳米微孔隔热电解槽内衬（导热系数 ≤0.03W/(m · K)），优化母线布局降低导电损耗，配套余热回收装置回收电解槽高温烟气热量用于铝锭预热，综合直流电耗下降 8%~10%；对偏析法梯度控温电阻炉加装变频温控模块、炉膛密封保温层，减少散热损耗，热效率由 62% 提升至 78%，吨铝能耗降低 1200kWh 以上。

推进高端设备国产化替代，联合冶金装备院所研发国产高精度梯度控温偏析炉、微量杂质在线检测仪；敞开式熔炼炉全部改造为密闭负压熔炼系统，隔绝空气水汽与粉尘污染。中小企业优先实施低成本节能技改：石墨氩气转子更换耐磨高纯石墨材质，延长使用寿命、降低辅料更换损耗。

4.4 搭建标准化车间生产运维体系

编制统一的高纯铝分级生产标准化运维规程，区分三层液电解、偏析法、定向凝固三类产线独立操作规范，明确各工序温度、时间、流量、转速等关键工艺参数管控区间，杜绝操作工凭经验随意调整参数。划分车间洁净等级，5N 级超高纯铝生产区域设置千级洁净车间，配套专用转运工具，避免普通铝料交叉污染；建立设备定期维保台账，电解槽内衬、氩气转子、测温热电偶按周期检修更换，防止设备腐蚀、磨损引入铁、硅杂质 [4]。

推行车间智能化运维管理，搭建生产数据中控平台，实时汇总熔炼温度、电解电流、熔体杂质、能耗辅料消耗数据，自动生成运维优化报表；定期组织冶金工程技术人员开展工艺实操培训，提升一线员工杂质管控、设备故障处置专业能力。

5 结语

高纯铝已形成预处理、电解提纯、凝固深度精制的成套精炼工艺体系，三层液电解适配大批量中高端产品，低碳偏析法是行业转型主流方向。现阶段国内产业产能规模位居全球前列，但仍存在高端高纯铝供给短缺、杂质管控不稳定等短板。通过优化复合熔剂、搭建全流程杂质管控、实施节能设备改造、落地标准化车间运维，可同步实现提质与降耗。未来行业应加快绿色提纯工艺推广、高端冶金装备国产化，夯实新材料产业链自主保障能力。

参考文献

[1] 李建国,夏翔,曹友旺,等.生产电子箔用高纯度铝熔体的新精炼工艺[J].轻合金加工技术,2025,53(9):44-50.

[2] 胡俊之.高纯铝凝固过程中杂质偏析行为研究及制备工艺优化[D].扬州大学,2025.

[3] 曹鹏.高纯铝制备方法对比分析[J].世界有色金属,2018,(11):10-11.

[4] 张小东,赵飞燕,郭昭华,等.高纯铝的精炼工艺研究及生产现状[J].无机盐工业,2018,50(4):11-14.