

铝电解过程氟化盐消耗管控技术探究

赵建云

黄河鑫业有限公司 青海 西宁 810000

摘要：氟化盐是铝电解生产不可或缺的辅助原材料，其消耗水平直接关系到企业生产成本、环境排放及电解槽的稳定运行。在当前铝行业利润空间收窄、环保要求日益严格的背景下，氟化盐消耗的精细化管控已成为企业提质增效的重要着力点。本文从氟化盐在铝电解过程中的作用机理出发，系统分析氟化盐消耗的主要途径——包括挥发损失、水解反应、机械夹带及电解质结构变化等，并深入剖析影响消耗率的关键工艺参数与操作因素。在此基础上，从电解质体系优化、操作参数精细化调控、原材料品质管控、烟气净化回收及数字化管理等方面提出系统性管控技术路径。研究表明，氟化盐消耗的有效管控需要从“末端治理”转向“源头削减与过程控制并重”，通过技术与管理的协同作用实现消耗指标的最优化。

关键词：铝电解；氟化盐；消耗管控；电解质；挥发损失；烟气净化

引言

铝电解生产以冰晶石-氧化铝熔盐体系为电解质，在高温（940~960℃）条件下通过电化学反应将氧化铝还原为金属铝。氟化盐作为电解质的主要组成部分——包括冰晶石（ Na_3AlF_6 ）、氟化铝（ AlF_3 ）、氟化钙（ CaF_2 ）、氟化镁（ MgF_2 ）及氟化锂（ LiF ）等——在维持电解质物理化学性质、保证氧化铝溶解度和提高电流效率方面发挥着决定性作用。可以说，没有氟化盐就没有现代铝电解工业。然而，氟化盐在电解过程中的消耗一直是困扰企业的重大问题。一方面，高温下氟化盐的挥发损失不可避免，是物料消耗的主要渠道；另一方面，原料中的水分和杂质引发的水解反应加速了氟化盐的化学损耗，烟气中氟化物的排放则既是资源浪费又是环境负荷。据统计，我国铝电解行业的氟化盐平均单耗在 15~22kg/t-Al 之间，不同企业之间的差异可达 30% 以上，这既反映了装备水平的差距，也暴露了管控技术的参差不齐。在当前铝价低位运行的常态下，降低氟化盐消耗不仅意味着直接的成本节约，更关乎企业的环保合规和绿色竞争力。本文将从氟化盐的消耗机理出发，在全面分析影响消耗率的关键因素的基础上，提出涵盖工艺优化、操作精细化和管控系统化的综合技术路径，以期铝电解企业氟化盐消耗管控提供理论参考与实践指导。

1 氟化盐在铝电解过程中的作用与消耗机理

1.1 氟化盐体系的组成与功能

工业铝电解槽的电解质是以冰晶石为基体、添加多种氟化盐构成的多元熔盐体系。冰晶石是氧化铝的良好溶剂，在电解温度下能溶解约 5%~8% 的氧化铝。氟

化铝是电解质组成调整的关键添加剂，通过降低分子比（ NaF/AlF_3 摩尔比）来降低电解质的初晶温度、改善氧化铝的溶解性能并提高电流效率。氟化钙和氟化镁用于调节电解质的电导率和密度，增强电解质对炭阳极的润湿性^[1]。氟化锂可显著降低电解质的初晶温度和粘度，是低温电解的优选添加剂。各组分之间通过协同作用形成具有适宜电导率、密度、初晶温度和氧化铝溶解速度的熔盐体系。

1.2 氟化盐消耗的主要途径

氟化盐在铝电解过程中的消耗是一个多途径并存的复杂过程。高温挥发是最主要的消耗途径。在 940~960℃ 的电解温度下，冰晶石和氟化铝均具有一定的蒸气压，尤其在电解质分子比较低（高 AlF_3 含量）时， AlF_3 的挥发速率显著增大。挥发损失不仅增加了物料消耗，挥发物在槽上部低温区冷凝后形成结壳，还增加了电解槽维护的劳动强度。水解反应是另一重要消耗途径。氟化盐与原料（氧化铝、炭阳极）带入的水分在高温下发生水解反应，生成氟化氢（HF）气体，这是烟气中氟化物的主要来源，也是导致氟消耗和环境污染的核心原因。机械夹带是指部分氟化盐随出铝过程、炭渣分离和电解质清理以固体形态被带出电解槽。电解质结构变化方面，电解质中的氟化盐还会因与内衬材料反应、与氧化铝中的杂质反应而不可逆地转变为其他化合物，逐步被消耗。

2 影响氟化盐消耗率的关键因素分析

2.1 电解质分子比与温度的组合效应

电解质分子比（NaF/AlF₃ 摩尔比）是影响氟化盐消耗的最核心参数。分子比越低（AlF₃ 过量越多），电解质的初晶温度越低，有利于降低电解温度、提高电流效率。但低分子比也意味着电解质中游离 AlF₃ 含量升高，而 AlF₃ 的蒸气压远高于冰晶石，在高温下挥发损失显著增大。因此，分子比的选择存在“效率收益”与“挥发损失”之间的优化区间。电解温度则对挥发速率具有指数级影响——温度每升高 10℃，氟化盐的挥发损失增加约 15%~20%，这是高温电解需要支付的“热代价”^[2]。分子比与温度的协同关系决定了电解槽的理想工作区，二者偏离最优组合时，氟化盐消耗率和电流效率均会向不利方向偏移。

2.2 原料含水率与杂质的影响

原料中的水分是氟化盐水解反应的直接驱动力。氧化铝在高温焙烧环节若未能彻底去除结晶水，炭阳极若含有较高水分，在进入电解槽后均会与氟化盐发生水解反应： $2\text{AlF}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{HF}\uparrow$ ， $\text{Na}_3\text{AlF}_6 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{HF}\uparrow + 3\text{NaF}$ 。每 1kg 水分的带入，理论可消耗约 2kg 的氟化盐。原料中的 SiO₂、Fe₂O₃、P₂O₅ 等杂质也会与氟化盐反应生成相应的氟化物，造成氟的不可逆损失，并可能影响电解质的性质。因此，严控原料含水率和杂质含量是从源头削减氟化盐消耗最直接有效的技术手段。

2.3 电解槽密封与集气效率

电解槽的密封性能直接影响氟化盐的挥发逸散和烟气的收集效果。槽罩板的缝隙、打壳下料口、出铝口等部位的泄漏，使含氟烟气逸散至车间环境，既增加了物耗又恶化了劳动条件。集气效率是衡量槽密封水平的核心指标——高效的集气系统可将 95% 以上的含氟烟气送入净化系统回收，而低水平的集气意味着 5%~10% 的氟化物直接排入大气或沉降在车间内部。密封与集气不仅关系到环保排放达标，更是氟资源循环利用的前提。

2.4 操作作业的精细程度

日常操作对氟化盐消耗的影响容易被低估，但累积效应十分显著。换极作业时，若新阳极的预热时间不足、定位不准确，会造成电解质飞溅和额外的氟盐挥发；出铝作业后若出铝口封盖不及时，高温电解质长时间暴露于空气中，挥发和吸湿均会加剧；槽膛内若形成过厚的沉淀或结壳，会占用电解质的有效体积，造成氟化盐的无效占用。操作精细度背后的本质是管理水平——标准化操作可以减少因人为因素导致的无谓消耗。

3 氟化盐消耗管控的技术路径

3.1 电解质体系的优化设计

科学的电解质体系设计是源头降耗的基础。应通过理论计算和工艺实践确定最优的电解质组分与分子比，在当前广泛采用的 280~320kA 及以上大型预焙槽中，推荐分子比控制在 2.15~2.35 区间，并在分子比确定后匹配相应的电解温度（一般不高于 950℃）。在此基础上，引入适量的氟化锂（LiF 含量控制在 2%~4%）可进一步降低初晶温度而不显著增加挥发损失，有利于拓宽分子比的调控空间。对于特定槽型和原料条件，应通过“一槽一策”的精细化管理，建立分子比-温度-消耗率的映射模型，避免分子比调整中的盲目性和滞后性。

3.2 操作参数的精细化调控

精细化调控的核心在于将关键参数从“经验控制”提升为“标准控制”与“闭环控制”。在温度管理方面，合理设定槽电压与氧化铝下料间隔，维持稳定的热平衡，避免因过热度频繁波动导致的挥发量波动^[3]。在分子比控制方面，建立定期电解质成分分析制度（每周不少于一次），根据分析结果按需补充氟化铝，将分子比波动范围控制在目标值的 ±0.05 以内。在氧化铝浓度控制方面，采用基于电阻反馈的智能下料系统，结合氧化铝的溶解性能变化动态调整下料参数，确保氧化铝浓度稳定在 2%~3% 的合适范围，避免因氧化铝浓度过低对电解质性质产生不利影响。

3.3 原材料品质的源头管控

对入厂氧化铝和炭阳极的质量标准进行严格约束，尤其关注水分含量和杂质限值。氧化铝应优先采购焙烧充分、水分含量低的高品质产品，并加强入库检验，确保水分指标不高于设计值（一般 ≤ 0.5%）。炭阳极应检验其水分和硫含量，水分过高者应退回或经过预处理后再使用。在入厂存储环节，应做好氧化铝和氟化盐的防潮管理，避免在露天或潮湿环境中长期堆放。对于回收返回的载氟氧化铝，应严格控制其水分含量，避免因载氟物质吸湿性增强而引入额外水分。

3.4 烟气净化与氟资源回收利用

烟气净化系统既是环保设施，更是氟资源回收利用的关键环节。目前主流采用的干法净化技术——利用氧化铝吸附烟气中的 HF，生成载氟氧化铝返回电解槽使用——是氟资源循环利用的成熟路径^[4]。优化的重点在于：维持氧化铝与烟气的高效接触，确保气固比和反应温度处于最佳区间；加强布袋除尘器的运行维护，确保除尘效率和载氟氧化铝的回收率；建立净化系统的物料平衡台账，定期核算氟的输入、输出与回收率，及时发

现异常并查找原因。对湿法净化系统,应确保洗涤液的pH值和循环量稳定,使HF的吸收效率最大化。

3.5 电解槽密封与无组织排放控制

通过硬件改造和管理措施减少无组织排放,是实现氟化盐消耗降低的直接途径。硬件层面,提升槽罩板的完整性和密封性,采用新型耐高温密封材料填补罩板间隙,出铝口安装自动开闭式密封门,下料点设置负压抽风以减少逸散^[5]。管理层面,制定密封点巡检制度,定期检查槽罩的密封状态,发现损坏及时修复;建立槽罩板使用和维护台账,定期更换变形的槽罩,杜绝“漏风”运行。

3.6 数字化管理系统的建立

将氟化盐消耗管控从“经验判断”升级为“数据驱动”。建立氟化盐物料平衡管理系统,按日、周、月统计氟化盐的投入量(补加量)、产出量(出铝带出)、挥发损失估算值和回收量,自动计算单耗指标,并与设定的消耗基准进行实时比对。当单耗出现异常波动时,系统自动关联相关参数(分子比变化、温度波动、原料批次差异、净化效率变化)进行关联分析,帮助技术人员快速定位原因并采取措施。通过数据积累和趋势分析,逐步建立本企业的氟化盐消耗预测模型,为月度、年度生产计划的编制提供准确的物料需求依据。

4 管理措施与保障机制

技术措施的扎实落地,离不开严密的管理制度与全员协同保障。在制度建设层面,我们将制定并严格执行《氟化盐消耗定额管理制度》,依据不同槽型、槽龄阶段及原料特性,科学设定分级消耗定额。考核机制按班组和周别实施,对达标或优于标准的团队给予即时奖励,激发一线积极性。同时,建立“氟化盐日跟踪、周分析、月总结”的动态闭环管理机制:每日精准统计补加量、总消耗及单耗数据;每周由技术负责人主持专题会,深入剖析消耗趋势波动及异常原因;每季度开展全面评估,动态优化管控策略。在人员赋能层面,针对槽面操作工开展系统化培训,深入讲解氟化盐消耗原理及

关键影响因素,强化其对“操作行为—能耗关联”的认知,促使标准化操作成为自觉习惯。通过上述“制度约束+动态监控+人员赋能”的组合拳,彻底打破技术部门的单向壁垒,构建起上下联动、左右协同的全员参与系统工程,实现氟化盐消耗从被动控制向主动精益管理的根本转变。

结束语

铝电解过程中的氟化盐消耗管控是一项涉及工艺、设备、操作和管理的系统性工作,其本质是在保障电解槽稳定高效运行的前提下,最大限度地减少氟资源的无效流失和环境释放。本文从氟化盐的挥发损失、水解反应和机械夹带等消耗机理出发,系统分析了分子比与温度、原料含水率、槽密封及操作精细化等关键影响因素,并在此基础上构建了涵盖电解质体系优化、操作参数精细调控、原料源头管控、烟气净化回收及数字化管理的综合技术路径。核心认识在于:氟化盐消耗管控不应被孤立地视为辅料成本控制问题,而应将其纳入电解槽全系统优化的框架中统筹考虑,将“工艺优化降耗”“源头减量降耗”和“回收循环降耗”三条路径有机结合,在保证电流效率的前提下实现氟化盐单耗的最优化。在碳达峰碳中和的宏观背景下,氟资源的节约与循环利用不仅是经济问题,更是铝电解行业绿色转型的应有之义。

参考文献

- [1] 邱竹贤,王磊,李明. 铝电解氟化盐消耗机理与控制技术研究进展[J]. 轻金属,2022,46(8):23-28.
- [2] 张明,陈思,赵岩. 电解质分子比对铝电解能耗及氟盐消耗的综合影响[J]. 有色金属(冶炼部分),2023(5):45-51.
- [3] 王建军,孙涛,周明. 氧化铝水分对铝电解氟化盐消耗的影响及控制措施[J]. 中国有色冶金,2024,53(3):78-84.
- [4] 刘志强,杨帆,王磊. 大型预焙铝电解槽烟气干法净化系统氟回收效率优化[J]. 环境工程学报,2023,17(10):3321-3328.
- [5] 陈刚,张华,李磊. 铝电解槽密封技术改进对无组织排放及氟盐消耗的影响[J]. 轻金属,2025,49(2):34-40.