

新型电解铝槽技术及其设备改进分析

朱文昊

青铜峡铝业股份有限公司宁东铝业分公司, 宁夏 银川 750411

DOI:10.61369/ERA.2025090011

摘 要： 铝是一种特殊金属材料，常被应用在航空航天、建筑等领域。随着全球经济的持续发展，铝的需求量大幅度增长，这推动了铝工业的发展。当前，铝工业发展过程中的核心设备 – 电解铝槽暴露出生产效率低、高能耗和高污染等问题，已经难以满足铝工业的可持续发展需求。基于此，下文将详细分析低温低电压电解技术、新型结构电解槽技术等新型电解铝槽技术，并从阴极结构、阳极材料等方面提出电解铝槽设备的改进措施。希望加快铝工业的改进步伐。

关 键 词： 新型电解铝槽技术；电解铝槽；设备改进

Analysis of New Electrolytic Aluminum Cell Technology and Its Equipment Improvement

Zhu Wenhao

Qingtongxia Aluminium Industry Co., LTD. Ningdong Aluminium Industry Branch, Yinchuan, Ningxia 750411

Abstract： Aluminium is a special metallic material and is often applied in fields such as aerospace and construction. With the continuous development of the global economy, the demand for aluminium has increased significantly, which has promoted the development of the aluminium industry. At present, the core equipment in the development process of the aluminum industry – electrolytic aluminum cells – have exposed problems such as low production efficiency, high energy consumption and high pollution, and are no longer able to meet the sustainable development needs of the aluminum industry. Based on this, the following text will conduct a detailed analysis of new electrolytic aluminum cell technologies such as low-temperature and low-voltage electrolysis technology and new-structured electrolytic cell technology, and propose improvement measures for electrolytic aluminum cell equipment from aspects such as cathode structure and anode materials. It is hoped to accelerate the improvement pace of the aluminium industry.

Keywords： new electrolytic aluminum cell technology; electrolytic aluminum cell; equipment improvement

引言

现阶段，传统电解铝槽技术及设备暴露出诸多弊端，已经难以满足铝工业对于绿色、节能、高效生产的要求。因此，必须加大新型电解铝槽技术的研发力度，不断改进电解铝槽设备，这样才能提高铝工业生产效率、降低能耗、减少环境污染。

一、传统电解铝槽设备存在的问题

（一）高能耗

传统电解铝槽是能耗大户，这与其电解质体系的导电性不佳、易产生热损失有很大的关联。简单来讲，传统的冰晶石 – 氧化铝熔盐电解质导电性不佳，铝厂要想确保电解反应正常进行，就需要消耗大量电能克服电解质电阻，这不仅会增加能耗，还会增加整体的生产成本；铝厂的电解铝槽一般在高温环境下运行，

传统电解铝槽保温性不佳，热量容易通过槽壁、槽顶不断散失。尤其是冬季，外部温度较低，电解铝槽的散热速度更快。要想维持电解铝槽内部的温度，就要消耗更多电能补充热量。一般情况下中小型铝厂冬季的电解槽散热损失能够达到总能耗的25%左右。

（二）高污染

传统电解铝槽在运行过程中会产生大量的二氧化硫、氟化物等污染物，易对周边环境造成污染。在电解过程中，冰晶石等一

些含氟物质在分解时会产生大量氟化氢气体。如果铝厂直接排放，就会污染大气环境、影响周边植被与农作物的正常生长。例如：某中小型铝厂每生产1吨铝就会排放1.5千克的氟化氢气体。据当地农业部门调查，周边农作物近些年在氟化氢的影响下减产幅度达到25%，这给当地农户造成了巨大的经济损失；与此同时，传统电解铝槽使用的是炭阳极，在电解时易产生二氧化硫气体。这是一种刺激性气体，既会危害人类的身体健康，又会降低空气质量，增加当地的酸雨降雨量。^[1]

（三）生产效率低

传统电解铝槽的电流效率最多为92%，这表明还有少部分电能没有应用在铝生产环节，而是消耗在副反应上。这与阳极效应和铝的二次溶解有很大关联。在生产过程中如果阳极表面的氧化铝浓度超标就会产生阳极效应。这会导致电解铝槽的电压急剧上升、电流分布不均，进而降低电流效率。例如：某中小型铝厂在进行生产统计后发现每发生一次阳极效应，电流效率会降低1.5%。这会降低铝的产量与质量；在电解过程中，一些铝会溶解在电解质中，之后氧化为氧化铝。这种二次溶解的问题不仅会降低电流效率，还严重降低了铝的产量。例如：某中小型铝厂由于设备工艺较为落后，易产生铝的二次溶解现象。该厂每月因铝的二次溶解造成的损失占总产量的5%左右。这大幅度降低了该厂的生产效率，增加了生产成本。

（四）设备使用寿命短

传统电解铝槽的内衬一般使用的是粘土砖等传统材料，易在高温、高腐蚀环境下损坏，这会直接降低设备的使用寿命。电解铝槽内部的温度较高，会导致内衬材料出现热膨胀与收缩的情况，久而久之就会出现裂纹、剥落现象。电解过程中冰晶石-氧化铝熔盐电解质的腐蚀性较强，也会溶解内衬材料，导致内衬逐渐变薄。因此很多铝厂的电解铝槽在使用2至3年后，就会出现内衬损坏的现象，只能重新更换设备。这既会增加设备更换成本，又会影响生产的稳定性；铝液在流动时也会磨损内衬材料，降低设备的使用寿命。例如：某铝厂设计的电解铝槽不合理，导致铝液的流动速度较快。内衬材料在铝液的冲刷下出现磨损。仅运行两年该电解铝槽就无法正常使用。^[2]

二、新型电解铝槽技术分析

（一）低温低电压电解技术

低温低电压电解技术是一种通过优化电解质体系降低电解质熔点、提高电解质导电性，进而在低温低电压下进行电解铝的技术。在具体落实过程中需要铝厂添加锂盐、镁盐等添加剂，改善电解质的物理化学性质，将其熔点从940-960℃降到800-900℃。由于该技术能够降低电解温度，因此能够大幅度减小电解质电阻，减少电能消耗。这种稍低温环境还能够减慢铝的二次溶解速度，降低阳极效应的发生几率。这个过程还可以减轻内衬材料的热应力，进一步延长电解铝槽的使用寿命。例如：某铝厂在应用低温低电压电解技术后，直流电耗从原有的13500KWh/t-Al调整为11900KWh/t-Al，降低了12%左右。电流效率也由原来

的91%转变为了94%。电解铝槽的使用寿命从两年转变为三年半。这不仅能够为铝厂节约大量的成本支出，还提高了铝厂的生产效率。^[2]

（二）惰性阳极电解技术

惰性阳极电解技术是将传统的炭阳极替换为不消耗的惰性阳极，这样在电解时惰性阳极既可以正常导电，又不会参与化学反应。这样能够节约炭阳极的消耗，减少二氧化碳等温室气体的排放量。例如：某铝厂在运用惰性阳极电解技术后，当月实现了二氧化碳零排放。在经过一段时间后，周围的空气质量大幅度提升。同时，铝厂以往在使用炭阳极时需要频繁更换，整体成本较高。而应用惰性阳极后更换频率大幅度降低，整体的成本支出缩减了35%左右。此外，惰性阳极也不会像炭阳极那样产生污染杂质，能够生产出更高质量、更高纯净度的铝。该铝厂的与产品纯净度由原有的99.6%提升至99.8%，这提升了铝厂的产品质量，推动了铝厂的可持续性发展。

（三）新型结构电解槽技术

新型结构电解槽技术能够优化原有的电解铝槽结构，调整电解质电场与热场分布、改善电解质的流动状态。例如：应用新型阴极结构能够减少铝液波动，降低铝液二次溶解几率；优化调整阳极排列方式，能够改善电场分布，提升电流效率。某铝厂在应用新型结构电解槽技术后，将电解效率从原有的92%提升至95%。这是因为优化调整后的电解铝槽结构更加合理，电解质能够在电解槽内均匀流动，电场与热场能够均匀分布，这些都能够提升电解反应的速率与效率。

三、电解铝槽设备的改进措施

（一）改进阴极结构

第一，应用新型阴极材料。传统阴极材料大多是炭块，导电性和抗腐蚀性不佳。因此，铝厂可以利用新型阴极材料改善阴极性能。例如：石墨化阴极。石墨化处理能够让炭块的晶体结构更加规整，提升其导电性。同时其表面的化学稳定性较好，可以有效抵抗电解质的侵蚀。某铝厂在应用石墨化阴极后阴极电压降低了13%，电流效率提升了2%；陶瓷阴极。陶瓷材料的化学性质较为稳定，能够适应高温、强腐蚀等多种环境，因此陶瓷阴极能够延长阴极的使用寿命，帮助铝厂节约更换阴极材料的成本。

第二，优化阴极形状。在不同形状的阴极下，铝液的流动状态各不相同。铝厂要想减少铝的二次溶解几率，提高电解反应的稳定性，就要优化阴极形状。例如：阶梯式阴极。能够增加铝液和阴极的接触面积，确保铝液平稳流动。某铝厂应用了阶梯式阴极后铝的二次溶解几率降低了30%。这是因为阶梯式结构改变了铝液的流动路径，能够防止铝液出现较多的波动和漩涡，铝也就不需长时间与电解质接触；波纹式阴极。波纹式阴极可以增加阴极的表面积，改变铝液的流动方向，形成湍流。这样电流能够均匀分布，电解反应能够稳定高效进行。

（二）改进阳极材料

第一，使用高性能炭阳极。由于传统炭阳极在应用过程中存

在诸多问题，因此铝厂必须加快改进步伐，使用高性能炭阳极材料。例如：浸渍阳极。铝厂需要在炭阳极中添加硼系物、硅系物等特殊添加剂。硅系物主要成分是二氧化硅，有较强的吸附性与耐高温性。在高温状态下能够与氧化硼产生相互作用，生成一层玻璃态的晶体覆盖在炭阳极孔隙内壁。能够阻隔气体扩散，减少氧化反应。某铝厂应用浸渍阳极后，将浸渍剂填充在了炭阳极的孔隙处，有效隔绝了氧气与电解质的入侵。不仅降低了阳极的消耗速度，还提升了阳极的使用寿命。

第二，研发应用惰性阳极。惰性阳极可以减少电解过程中产生的能耗与温室气体的排放量。但在具体运用时还存在一些技术问题。包括：制备工艺。不同的制备方法会导致阳极材料的晶体结构、孔隙率产生显著的差异，进而降低其导电性、耐腐蚀性等。现阶段，一些科研团队正在探索利用粉末冶金法制备惰性阳极材料，希望能够精确控制原料配比与制备工艺。包括：球磨时间与烧结温度等，希望能够优化阳极材料的性能。^[4]

（三）改进内衬材料

第一，应用新型耐火材料。上文已经提到传统电解铝槽的内衬材料一般是高铝砖、粘土砖，其耐高温与耐腐蚀性能不佳。因此，铝厂必须应用新型耐火材料，提高内衬性能。例如：碳化硅砖。这种材料在高温状态下也可以保持稳定的物理化学性能，能够有效抵抗电解质的侵蚀。如果将碳化硅砖作为内衬材料，可以有效延长内衬的使用寿命；氮化硅结合碳化硅砖。这是一种复合型耐火材料，有极佳的耐腐蚀与耐高温性。碳化硅颗粒能够看作是硬度较强的骨架，氮化硅可以看作是防护衣，能够在碳化硅颗粒表面建立完善的保护层。在电解过程中这种内衬材料可以承受高温与强腐蚀的冲击，有效延长电解槽的使用寿命。这种稳定的内衬性还能够提升电解槽内部温度、化学环境以及电场的稳定性，降低因内衬问题引发的铝杂质含量高、质量不稳定等问题。

第二，优化内衬结构。优化内衬结构是减少内衬热损失、提升内衬稳定性的一种有效方式。现阶段，铝厂可以应用多层复合内衬结构，将碳化硅砖作为电解质的内层材料，有效抵挡电解质

的侵蚀。中层使用陶瓷纤维等隔热性能好的材料。陶瓷纤维材料的热导率较低，能够减少热量从内到外的传递量，减少热损失。最外层使用高铝砖等强度较高的材料。这样即使设备受到了外力作用，也不会影响到内衬结构的稳定性。在各层材料优势互补的情况下，可以有效延长内衬的使用寿命。

（四）改进供电系统

第一，应用高效整流器。高效整流器能够在控制技术与先进的功率半导体器件的支持下，将交流电转化为直流电。与普通的整流器相比，高效整流器应用的是“MOSFET、IGBT”等高频开关技术，可以减少能量损耗，将转换效率提升至99%左右。

第二，开发智能供电控制系统。铝厂要结合实际情况开发智能供电控制系统。该系统能够根据电解铝槽的运行情况，调整电流强度、电压等供电参数，确保电解铝槽始终处在最佳运行状态。例如：某铝厂开发的智能供电控制系统能够利用传感器监测电解铝槽的温度、电压等各项参数。这些数据会传输到数据分析与决策模块，在预设算法下进行分析判断。同时还会结合历史数据与电解工艺的要求进行分析，给出最合理的供电参数调整方案。执行机构会按照调整方案自动调整参数。如果电解铝槽的温度较高，则表明电解反应比较剧烈，产生了较多热量。系统经过分析后会降低电流强度，减少电能输入。系统还会根据一段时间的温度变化进行温度预测，及早采取温度控制措施。该系统有效提升了铝厂电解铝生产效率，降低了生产成本^[3]。

四、结束语

新时期，要想推动铝工业的可持续发展，提高电解铝生产质量。就要改进传统的电解铝槽设备、应用新型电解铝槽技术。本文针对传统电解铝槽设备高污染、效率低等问题进行详细分析，探索了低温低电压电解技术、惰性阳极电解技术等新技术的具体应用，并提出了改进阴极结构、阴极材料、供电系统等措施。希望能够提高电解铝槽的可靠性，推动铝工业高效发展。

参考文献

- [1] 刘文奇. 电解铝企业脱硫净化技术的应用研究 [J]. 中国金属通报, 2025, (S1): 104-107.
- [2] 黄荣钢, 耿洪永, 张晓莹, 等. 降低电解铝综合交流电耗的措施探析 [J]. 云南冶金, 2025, 54(02): 136-139.
- [3] 孙伟麟. 电解铝出铝环节工艺参数智能调控技术探索 [J]. 冶金与材料, 2025, 45(02): 46-48.
- [4] 王彦斌. 电解铝行业碳排放现状与节能降碳路径 [J]. 资源节约与环保, 2025, (02): 14-19.