

铝电解过程节能降耗及排放控制技术进展

肖芝政

遵义铝业股份有限公司 贵州 遵义 563100

摘要：铝电解作为金属铝生产的主要方式，具有生产规模大、能耗高、排放污染严重的特点。随着全球能源危机的加剧和环保要求的提高，铝电解过程中的节能降耗及排放控制技术革新显得尤为重要。本文综述了铝电解过程的能耗现状，探讨了节能降耗的关键技术及其进展，并分析了排放控制技术的最新发展，旨在为铝电解行业的可持续发展提供理论参考和技术支持。

关键词：铝电解；节能降耗；排放控制

引言

铝电解是通过电解熔融的氧化铝生成金属铝的过程，广泛应用于航空航天、汽车制造、建筑装饰等多个领域。然而，铝电解过程能耗巨大，同时产生大量的氟化物等有害气体，对环境造成严重污染。因此，研究铝电解过程的节能降耗及排放控制技术，对于推动铝工业的可持续发展具有重要意义。

1 铝电解过程能耗现状

1.1 能耗特点

铝电解过程的主要能耗来自于电能消耗。在国内的电解铝生产中，每吨铝的制造需要消耗约13000-15000kWh的直流电，这一数值远高于其他有色金属的生产能耗。电能不仅用于维持电解槽的高温状态，还用于驱动电解反应，使氧化铝分解为铝和氧气。然而，这一电能消耗水平占据了铝电解生产成本的相当大一部分，通常超过总成本的30%，使得电能成为铝电解过程中最为关键且耗费最大的资源。

1.2 能耗问题分析

当前铝电解能耗高的原因可以具体归结为以下几个方面：（1）电流效率低下是导致能耗高的一个重要原因。理想情况下，所有的电流都应参与铝的还原反应，但在实际操作中，由于电解槽内电化学反应的复杂性，如电解质的不均匀分布、阳极气泡的产生和逸出等因素，部分电流并未能有效参与反应，而是转化为了热能或其他形式的能量损失。这种无效电流的存在降低了电流的有效利用率，从而增加了电能消耗。（2）阴极电压降偏高也是造成能耗增加的一个显著因素。阴极电压降是指电流在通过电解槽阴极时所产生的电压损失，它主要由阴极材料的电阻、电解槽内电解质的电阻以及阴极与电解质之间的接触电阻组成^[1]。阴极电压降的增加不仅直接增加了电能的消耗，还可能导致电解槽内温度分

布不均，局部过热或过冷，进而影响电解效率和铝的质量。（3）电解槽设计不合理同样对能耗产生了显著影响。电解槽作为铝电解过程的核心设备，其设计直接关系到电能的有效利用和电解效率。然而，当前部分电解槽的设计存在缺陷，如槽体结构不合理导致电流分布不均、材料选择不当导致电阻增大、电解槽尺寸不匹配导致能量损失等。这些问题都可能导致电能的无谓浪费和电解效率的降低，从而增加企业的生产成本。

2 铝电解过程的节能降耗技术进展

2.1 电解槽设计与优化

电解槽作为铝电解过程中的核心设备，其设计合理性直接决定了电解效率和能耗水平。近年来，随着材料科学、热力学及流体力学等学科的进步，电解槽的设计与优化取得了显著进展，为铝电解过程的节能降耗提供了有力支持。

2.1.1 新型材料的应用

半石墨化和石墨化阴极材料相较于传统阴极材料具有更高的导电性、导热性和抗腐蚀性。石墨化阴极炭块通过高温石墨化处理，其电阻率显著降低，通常在20-30 $\mu\Omega \cdot m$ 范围内，而未经石墨化处理的普通阴极炭块的电阻率则在55-65 $\mu\Omega \cdot m$ 。低电阻率意味着在电解过程中，电流通过阴极炭块时的能量损耗更小，从而直接降低阴极电压降，减少电能消耗。此外，石墨化阴极炭块还能有效减少槽熔体区向四周的热流散失，提高电解槽内部热量的集中度，有助于形成稳定的炉帮并维持其完整性，进一步提高电解效率和稳定性。

2.1.2 槽体结构的改进

一是降低极距：现有大型预焙铝电解槽的极距一般在4cm以上，导致槽电压也较高。通过优化电解槽结构，如采用新型双斜面电解槽设计，可以在保证电解槽热平衡的前提下降低极距，从而降低槽电压，减少电能消

耗。降低极距不仅能提高电流效率，还能改善电解槽内的磁场分布，减少电磁力的不利影响，提高电解过程的稳定性^[2]。二是优化气体通道：合理设计电解槽中的气体通道，以保证气体的均匀分布和及时排出，减少阳极气泡的封闭现象，从而提高电解反应的均匀性和效率。

2.1.3 内部布局的优化

优化电解液的配置和循环方式，确保电解质中氧化铝与氟化铝的比例适中，维持电解质的化学平衡和适宜的流动性。通过精确控制电解液的成分和温度，可以减少不必要的能量损失和杂质积累，提高电解效率。其次，可以引入智能化控制系统，对电解槽内的温度、电流、电压等参数进行实时监控和精确调节。通过模型预测和数据分析，优化电解过程参数，实现电解槽的智能化运行和管理，进一步提高电解效率和稳定性，降低能耗。

2.2 电解工艺优化

2.2.1 关键参数的精确控制

一是温度控制：电解槽内的温度是影响电解效率和能耗的重要因素。通过引入先进的温度控制系统，如智能温度传感器和调控算法，可以实时监控并调节电解槽内的温度，确保其在最适宜范围内波动。这有助于降低能耗、提高电流效率并延长设备使用寿命。二是电流与电压管理：精确控制电解槽内的电流和电压是维持电解过程稳定的关键。通过优化电解槽设计，如采用低电阻率的阴极材料，可以降低阴极电压降。同时，利用智能控制系统根据实时数据自动调整电流和电压，保持其在最优工作范围内，从而提高电解效率和铝的产出率。三是电解质成分与液位控制：电解质的成分和液位对电解过程有直接影响。通过定期检测并调整电解质中氧化铝和氟化铝的比例，以及维持适宜的电解质液位，可以保持电解质的化学平衡和流动性，减少杂质积累并提高电解效率。

2.2.2 生产操作流程的精细化管理

首先，换极是电解过程中不可避免的操作环节，但其对电解效率和能耗的影响不容忽视。通过优化换极操作流程，如采用先进的换极设备和技术、减少换极过程中的能量损失和杂质引入，可以有效提高电流效率并降低吨铝炭耗。其次，出铝操作的规范性和及时性对电解槽的稳定运行至关重要。通过制定严格的出铝操作规程、采用自动化出铝设备和实时监控技术，可以确保出铝过程的顺利进行并减少对电解槽的干扰。此外，阳极效应是电解过程中常见的一种现象，它会导致能耗增加和电解效率降低。通过引入自动熄灭阳极效应系统，如通过实时监控阳极电压变化并自动调整电解质成分和温度等参数来熄灭阳极效应，可以显著提高电解效率和降

低能耗。

2.3 能源管理系统的应用

2.3.1 实时监控与数据分析

EMS通过集成各种传感器、计量仪表和数据采集设备，对电解槽的能源消耗进行实时监控。系统能够采集电流、电压、温度、电解质成分等关键参数，并利用大数据分析技术对采集到的数据进行处理和分析。通过实时监测数据的变化趋势，系统能够及时发现异常情况并预警，为生产管理人员提供决策支持。

2.3.2 模型预测与智能化控制

基于实时数据和历史数据，EMS能够建立精确的预测模型，对电解槽的运行状态和电解质成分进行预测。通过模型预测，系统能够提前判断电解槽的运行趋势，并自动调整电流、电压、温度等参数，实现智能化控制。这种智能化控制方式能够显著提高电解过程的稳定性和效率，减少因人为操作不当导致的能源浪费和产量波动。

2.3.3 精确调节与优化调度

EMS具备强大的优化调度功能，能够根据生产需求和能源供应情况，对电解槽的运行状态进行精确调节。系统能够自动计算最优的电流密度、电压设定值和温度范围，以实现最低的能耗和最高的产出率。同时，系统还能够根据能源市场的实时价格信息，对能源使用进行优化调度，进一步降低生产成本。

2.3.4 提高生产效率和产品质量

通过EMS的应用，铝电解过程的生产效率和产品质量均能得到显著提升。实时监控和智能化控制能够确保电解槽始终运行在最佳状态，减少因设备故障或操作不当导致的停机时间。同时，精确调节和优化调度能够确保电解质成分的稳定性和均匀性，从而提高铝的纯度和产出率。这些措施共同作用，使得铝电解过程的生产效率和产品质量均得到大幅提升。

2.3.5 能源管理系统的综合效益

EMS在铝电解过程中的应用不仅能够带来直接的节能降耗效果，还能够提升企业的整体管理水平。通过实时监控和数据分析，企业能够更准确地掌握生产过程中的能源消耗情况，为制定科学合理的能源管理政策提供依据。同时，智能化控制和优化调度能够降低人工干预程度，提高生产自动化水平，减少人为因素对生产过程的影响。这些综合效益使得EMS在铝电解行业中的应用前景十分广阔。

3 铝电解过程的排放控制技术进展

3.1 烟气净化技术

铝电解槽产生的烟气中含有大量的氟化物,这些氟化物如果不经处理直接排放到大气中,会对环境和人类健康造成严重影响。因此,铝电解企业可以采用先进的烟气净化技术,如n型喷射两级逆流吸附干法净化技术,来处理这些烟气。该技术主要利用氧化铝的吸附性能来去除烟气中的氟化物。在净化过程中,新鲜氧化铝作为第一级吸附剂,首先与烟气中的氟化物接触并发生吸附反应。随后,烟气进入第二级吸附区,与载氟氧化铝(即已经吸附了一定量氟化物的氧化铝)进一步接触,实现深度净化。两级逆流吸附的设计可以确保烟气中的氟化物被充分去除,同时提高氧化铝的利用率^[3]。为了实现高效的烟气净化,铝电解企业通常配备有完善的烟气收集和处理系统。这些系统包括集气罩、烟气管道、净化反应器、除尘器以及排放装置等。集气罩用于收集电解槽产生的烟气,烟气通过管道输送至净化反应器进行净化处理。净化后的烟气再经过除尘器去除颗粒物,最终通过排放装置达标排放。

3.2 回收利用技术

在烟气净化过程中产生的载氟氧化铝是一种有价值的副产品。通过特定的工艺流程,可以将载氟氧化铝中的氟化物提取出来,同时回收氧化铝。这些回收的氧化铝可以作为原料重新用于电解过程中,从而降低对新氧化铝的需求和生产成本。回收利用流程包括:(1)收集与分离:首先,将净化过程中产生的载氟氧化铝从净化反应器中收集出来。然后,通过物理或化学方法将载氟氧化铝与未吸附氟化物的氧化铝分离。(2)氟化物提取:对分离出的载氟氧化铝进行处理,提取其中的氟化物。这通常涉及化学反应和分离过程,以将氟化物以纯净的形式提取出来。(3)氧化铝回收:提取氟化物后的剩余物质主要是氧化铝。这些氧化铝经过适当的处理后可以作为原料重新用于电解过程中。(4)再利用:回收的氧化铝被送回电解槽作为原料使用,从而实现了资源的循环利用和成本的降低。

3.3 低碳环保技术的应用

3.3.1 引入可再生能源和清洁能源

铝电解企业应积极扩大风电、光伏等非化石能源的应用比例,通过自建或购买绿色电力证书等方式,增加可再生能源在电解过程中的使用量。这不仅有助于减少对传统化石能源的依赖,还能显著降低碳排放量。在具

备条件的地区,铝电解企业还探索利用水电、生物质能等可再生能源,进一步丰富能源结构,提高清洁能源利用率^[4]。其次,对于现有自备燃煤机组,铝电解企业可以积极实施清洁能源替代计划,逐步淘汰燃煤机组,转而使用天然气、氢气等清洁能源作为替代燃料。这有助于减少二氧化硫、氮氧化物等污染物的排放,提升环保水平。

3.3.2 研发低碳电解槽技术和新型电解液配方

研发和应用惰性阳极是铝电解行业实现低碳化的重要途径之一。惰性阳极在电解过程中不会参与化学反应,因此不会产生传统碳阳极电解过程中产生的二氧化碳排放。目前,惰性阳极技术仍处于研发阶段,但已取得初步成果,未来有望实现商业化应用。此外,低温铝电解技术通过降低电解温度来减少能耗和碳排放。该技术通过优化电解质成分和电解槽结构等方式实现低温电解,虽然面临一些技术难题和挑战,但具有较大的发展潜力。再者,研发和应用新型电解液配方也是降低铝电解过程中碳排放的有效手段之一。新型电解液配方通过优化电解质成分和添加剂的种类及比例等方式提高电解效率并减少能耗和排放。例如,采用低氟或无氟电解液配方可以降低氟化物的排放和污染风险;采用高效添加剂可以提高电解质的导电性和稳定性从而改善电解过程的经济性和环保性。

结语

铝电解过程的节能降耗及排放控制技术是铝工业可持续发展的关键。通过优化电解槽设计、改进电解工艺、应用能源管理系统以及推广烟气净化和回收利用,可以显著降低铝电解过程中的能耗和排放污染。未来,随着全球能源结构调整和环保要求的提高,铝电解行业将进一步加强技术创新和产业升级,实现更高效、更环保的生产方式。

参考文献

- [1]王园英.铝电解过程中的节能降耗措施研究[J].世界有色金属,2023,(18):198-200.
- [2]张坤,练新强,黄峰.铝电解节能降耗技术研究及应用[J].云南冶金,2022,51(06):189-194.
- [3]李雪娇,王铁军,刘建平,等.铝电解氟化物无组织排放的控制[J].轻金属,2020,(06):22-26.
- [4]许晶,宋海琛,李雪娇,等.铝电解车间烟气无组织排放监测方法的探讨[J].轻金属,2023,(12):46-49.