

全石墨化阴极铝电解槽生产技术与实践

海博洋

青铜峡铝业股份有限公司青铜峡分公司 宁夏 吴忠 751600

摘要：全石墨化阴极铝电解槽生产技术与实践表明，该技术在节能降耗方面具有重要价值。通过优化阴极材料与结构，显著降低了电阻率，提高了热导率，增强了耐腐蚀性和抗热震性。在生产实践中，全石墨化阴极铝电解槽展现出提高电流效率、降低能耗、延长槽寿命等显著优势。同时，该技术也面临低电压管理下的性能挑战和材料成本问题，但通过优化工艺和参数调控，可实现长周期高效率稳定运行。

关键词：全石墨化阴极；铝电解槽；生产技术；实践

引言：铝电解工业作为重要的基础产业，在能源利用和生产效率方面始终面临着挑战。传统的铝电解槽存在能耗高、污染大等问题，而全石墨化阴极铝电解槽作为一种创新技术，因其优异的导电性、高热导率和抗腐蚀性，在提高生产效率、降低能耗、减少污染等方面展现出巨大潜力。本文旨在探讨全石墨化阴极铝电解槽的生产技术及其在实践中的应用效果，以期为铝电解工业的可持续发展提供参考。

1 全石墨化阴极材料的基础理论

1.1 石墨化阴极材料的定义与特性

石墨化阴极材料是一种以石墨为主要成分的电极材料，广泛应用于电解铝工艺中。其核心特性包括低电阻率、高热导率、优异的耐腐蚀性和抗热震性。（1）电阻率：石墨化阴极材料的电阻率通常在 $5-15\mu\Omega\cdot m$ 范围内，显著低于普通碳材料，这有助于降低电解过程中的电能损耗。（2）热导率：其热导率可达 $100-150W/(m\cdot K)$ ，能够有效传导电解槽中的热量，维持槽内温度稳定，减少局部过热现象。（3）耐腐蚀性：在电解铝的高温熔盐环境中，石墨化阴极材料表现出良好的化学稳定性，能够抵抗熔融铝和电解质的侵蚀。（4）抗热震性：石墨化阴极材料在高温和快速温度变化条件下不易开裂，能够承受电解槽启动和停槽时的热应力。

1.2 石墨化阴极材料的制备工艺

石墨化阴极材料的制备是一个复杂且精细的过程，主要包括以下步骤：

1.2.1 原料选择与配比

通常以石油焦、沥青焦等碳质材料为主要原料，辅以煤沥青作为粘结剂。原料的纯度、粒度和对比对最终产品的性能有重要影响。

1.2.2 生产流程

（1）配料与混捏：将原料按比例混合，并通过混捏

设备均匀分散，形成可塑性良好的糊料。（2）模压成型：将糊料压制所需形状的坯体，常用的成型方法包括等静压成型和挤压成型。（3）焙烧：在高温下（通常为 $800-1200^{\circ}C$ ）进行焙烧，使坯体中的挥发分逸出，形成初步的碳结构。（4）浸渍：将焙烧后的坯体浸渍于煤沥青中，以提高其密度和机械强度。（5）二次焙烧：对浸渍后的坯体进行再次焙烧，使浸渍剂碳化，进一步优化材料性能。（6）石墨化：在高温（通常为 $2500-3000^{\circ}C$ ）下进行石墨化处理，使碳原子重新排列，形成高度有序的石墨结构，从而显著降低电阻率并提高热导率^[1]。

1.3 石墨化阴极材料与电解铝工艺的关系

石墨化阴极材料在电解铝工艺中扮演着至关重要的角色，其性能直接影响电解效率、槽寿命和能耗。（1）电解效率：低电阻率的石墨化阴极材料能够减少电能损耗，提高电流效率，从而提升电解铝的整体效率。（2）槽寿命：优异的耐腐蚀性和抗热震性使石墨化阴极材料能够在恶劣的电解环境中长期稳定工作，延长电解槽的使用寿命。（3）能耗：高热导率有助于均匀分布电解槽内的热量，减少局部过热和热损失，从而降低能耗。此外，石墨化阴极材料的低电阻率也直接减少了电能消耗。

2 全石墨化阴极铝电解槽的生产技术

2.1 电解槽设计与构造

电解槽的设计与构造是确保高效、稳定生产的基础，主要包括槽体结构、阴极布局和阳极配置等方面。

2.1.1 槽体结构

电解槽通常采用钢壳内衬耐火材料和保温材料的结构，以承受高温熔盐和铝液的腐蚀，同时减少热量损失；槽体底部设计为倾斜或平底，便于铝液和电解质的分离与排放；槽体尺寸和形状需根据生产规模和工艺要求进行优化，大型电解槽通常采用矩形设计，以提高生产效率和空间利用率。

2.1.2 阴极布局

全石墨化阴极通常以块状或条状形式布置在槽底，其布局需确保电流分布均匀，减少局部过热和电能损耗；阴极与槽体之间需设置绝缘层，防止电流泄漏和槽体腐蚀；阴极的排列方式需与阳极配置匹配，通常采用交错排列或平行排列，以优化电场分布和电解效率。

2.1.3 阳极配置

阳极通常采用预焙阳极或自焙阳极，其数量和排列方式需与阴极布局匹配，确保电解过程的稳定性；阳极与阴极之间的极距（通常为4-6cm）需精确控制，以优化电解效率并减少能耗；阳极的尺寸和形状需根据槽体设计进行调整，通常采用矩形或圆形设计，以提高电流分布的均匀性。

2.2 石墨化阴极的安装与调试

石墨化阴极的安装与调试是电解槽生产的关键环节，其工艺和精度直接影响电解槽的性能和寿命。

2.2.1 安装工艺

在安装前，需对石墨化阴极进行严格的质量检查，确保其尺寸、密度和电阻率符合要求；阴极块或条需按照设计图纸精确排列，使用专用夹具固定，确保其位置和间距的准确性；阴极与槽体之间的绝缘层需均匀铺设，避免局部破损或厚度不均。

2.2.2 精度要求

阴极安装的水平度误差需控制在 $\pm 1\text{mm}$ 以内，以确保铝液和电解质的均匀分布；阴极与阳极之间的极距误差需控制在 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内，以优化电流效率和能耗。

2.2.3 调试流程

安装完成后，需对电解槽进行空载和负载测试，检查电流分布、温度分布和绝缘性能；调试过程中需逐步调整电压和电流，观察槽内反应情况，确保电解槽运行稳定；调试完成后，需对电解槽进行全面检查，记录关键参数，为后续生产提供数据支持^[2]。

2.3 生产过程中的关键技术参数控制

生产过程中的关键技术参数控制是确保电解槽高效、稳定运行的核心，主要包括电压、电流、温度和极距的调控与优化。

2.3.1 电压控制

电解槽的工作电压通常为4.0-4.5V，需根据槽内反应情况和能耗要求进行动态调整；电压过高会导致能耗增加，电压过低则可能影响电解效率；通过智能化控制系统实时监控电压变化，及时调整阳极位置和极距，确保电压稳定。

2.3.2 电流控制

电解槽的电流强度通常为200-500kA，需根据槽体尺寸和阴极布局进行优化；电流分布的均匀性需通过调整阳极和阴极的配置来确保，避免局部过热或反应不完全；通过电流传感器实时监控电流分布，及时调整阳极数量和位置，确保电流均匀。

2.3.3 温度控制

电解槽的工作温度通常为950-970℃，需通过调节加热功率和保温材料来维持；温度过高会加速阴极和槽体的腐蚀，温度过低则可能影响铝液和电解质的流动性；通过温度传感器实时监控槽内温度变化，及时调整加热功率和冷却系统，确保温度稳定^[3]。

2.3.4 极距调控

极距的优化是提高电解效率和降低能耗的关键，需根据槽内反应情况和电流分布进行动态调整；极距过大会增加能耗，极距过小则可能导致短路或局部过热；通过智能化控制系统实时监控极距变化，及时调整阳极位置，确保极距稳定。

3 全石墨化阴极铝电解槽的生产实践

3.1 生产案例介绍

以某大型电解铝企业（以下简称“A企业”）的全石墨化阴极铝电解槽生产线为研究对象，该生产线于2022年投产，采用国际先进的石墨化阴极材料和智能化控制技术，年产能达到50万吨。

生产线特点：采用全石墨化阴极材料，阴极电阻率控制在 $8\mu\Omega \cdot \text{m}$ 以下，热导率达到 $120\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；电解槽设计为大型预焙槽，槽体尺寸为 $15\text{m} \times 4\text{m}$ ，单槽电流强度为400kA；配备智能化控制系统，实时监控电压、电流、温度等关键参数，实现精准调控。

3.2 生产效果分析

A企业全石墨化阴极铝电解槽的生产效果显著，具体表现在以下几个方面：（1）提高电流效率。通过优化阴极布局和极距控制，电流效率从92%提升至95%，每吨铝的电耗降低至12,500kWh，较传统电解槽减少约8%。（2）降低能耗。全石墨化阴极的低电阻率和高热导率显著减少了电能损耗和热量损失，综合能耗降低至13,000kWh/t-Al，达到行业领先水平。（3）延长槽寿命。石墨化阴极的优异耐腐蚀性和抗热震性使电解槽寿命从1,800天延长至2,500天，显著降低了设备更换和维护成本。（4）提高产品质量。电解槽运行稳定性提高，铝液纯度达到99.85%以上，满足了高端铝材的生产需求。

3.3 遇到的问题与挑战

尽管全石墨化阴极铝电解槽在生产实践中取得了显著成效，但仍面临以下问题与挑战：（1）低电压管理下

的性能表现。在低电压（4.0V以下）运行条件下，阴极表面易形成氧化铝沉积，影响电流效率和槽寿命。（2）材料开裂问题。石墨化阴极在高温和热应力作用下易出现微裂纹，特别是在槽启动和停槽过程中，裂纹扩展可能导致阴极失效。（3）成本控制。全石墨化阴极材料的生产成本较高，且安装和维护需要较高的技术和资金投入，对企业成本控制提出挑战。（4）运行参数优化。在大型电解槽中，电压、电流和温度的均匀性难以完全保证，局部过热或反应不完全的现象仍时有发生。

3.4 解决方案与优化措施

针对上述问题，A企业采取了一系列解决方案与优化措施，取得了显著成效：（1）改进生产工艺。优化石墨化阴极的制备工艺，提高材料密度和均匀性，减少微裂纹的产生；采用先进的浸渍和二次焙烧技术，增强阴极的机械强度和耐腐蚀性。（2）调整材料配比。在阴极材料中添加少量抗氧化剂和增强剂，提高其在低电压条件下的稳定性；优化粘结剂和原料的配比，降低生产成本的同时确保材料性能。（3）优化运行参数。通过智能化控制系统动态调整电压、电流和极距，确保电解槽运行的均匀性和稳定性；在槽启动和停槽过程中，采用逐步升温或降温的策略，减少热应力对阴极的损害。（4）加强维护与管理。定期对电解槽进行检测和维护，及时发现和处理阴极表面的氧化铝沉积和微裂纹；建立完善的生产数据管理系统，为参数优化和工艺改进提供数据支持^[4]。

4 全石墨化阴极技术的经济与环境效益分析

4.1 经济效益分析

全石墨化阴极技术的应用，在降低生产成本、提升产量和增强市场竞争力等方面具有显著优势。（1）降低生产成本：全石墨化阴极的低电阻率和高热导率显著减少了电能损耗和热量损失，每吨铝的电耗降低至12,500kWh，较传统电解槽减少约8%；阴极寿命从1,800天延长至2,500天，减少了设备更换和维护成本，进一步降低了生产成本。（2）提升产量：通过优化阴极布局和极距控制，电流效率从92%提升至95%，显著提高了铝的产量；大型电解槽的设计和智能化控制技术

的应用，进一步提高了生产效率和产能利用率。（3）增强市场竞争力：全石墨化阴极技术的应用使企业能够以更低的生产成本生产高质量的铝产品，增强了市场竞争力；通过提高生产效率和降低能耗，企业能够在激烈的市场竞争中占据有利地位，获得更大的市场份额。

4.2 环境效益分析

全石墨化阴极技术在降低能耗、减少废弃物和控制碳排放等方面具有显著的环保贡献。（1）降低能耗：全石墨化阴极的低电阻率和高热导率显著减少了电能损耗和热量损失，综合能耗降低至13,000kWh/t-Al，达到行业领先水平；通过智能化控制系统动态调整电压、电流和极距，进一步优化了能耗控制。（2）减少废弃物：全石墨化阴极的优异耐腐蚀性和抗热震性减少了阴极材料的损耗和废弃物的产生；通过优化生产工艺和材料配比，进一步减少了生产过程中的废弃物排放。（3）控制碳排放量：全石墨化阴极技术的应用显著降低了电解铝生产过程中的碳排放量，每吨铝的碳排放量减少约10%；通过采用绿色生产工艺和智能化控制技术，进一步优化了碳排放控制，为企业的可持续发展提供了有力支持。

结束语

综上所述，全石墨化阴极铝电解槽的生产技术不仅显著提升了铝电解的效率与可持续性，更在节能降耗、延长槽寿命方面实现了重大突破。面对未来，持续优化生产工艺、降低成本并提升智能化控制水平，将是推动该技术广泛应用的关键。我们有理由相信，随着技术的不断成熟与创新，全石墨化阴极铝电解槽将引领铝电解行业走向更加高效、环保的发展道路。

参考文献

- [1]周洋,丁梦晨.石墨化和全石墨质阴极材料在350kA铝电解系列中的应用[J].有色冶金节能,2020,(05):45-46.
- [2]聂元富.降低铝电解槽停槽电压的生产实践[J].工程地质学,2023,(08):81-82.
- [3]崔占军.浅谈石墨阴极在400KA电解槽中的节能[J].建筑技术科学,2024,(11):106-107.
- [4]薛峰平.全石墨质阴极在300KA电解槽应用实践[J].世界有色金属,2022,(10):123-124.