

离子膜法烧碱电解槽能效提升与膜寿命延长技术研究

谷保明

山西瑞恒化工有限公司 山西长治

【摘要】离子膜法烧碱电解槽的能效与膜寿命是影响工业生产效率和经济性的关键因素。针对电解过程中能耗高、膜老化快的问题，研究通过优化电流密度分布、控制槽内温度、改进膜材料及应用表面处理技术，实现电解效率提升与膜寿命延长。综合技术措施可降低局部极化和能量损失，增强离子迁移效率，维持氢氧化钠产率稳定，并减缓膜性能衰退。实验与工业应用表明，多因素协同优化能够在高电流密度及长期运行条件下保持低能耗、高产率和设备可靠性，为离子膜法烧碱工艺的高效化提供技术保障。

【关键词】离子膜法；烧碱电解槽；能效提升；膜寿命；技术优化

【收稿日期】2025年8月17日 **【出刊日期】**2025年9月20日 **【DOI】**10.12208/j.jccr.20250066

Study on energy efficiency improvement and membrane life extension of ion membrane caustic soda electrolyzer

Baoming Gu

Shanxi Ruiheng Chemical Co., Ltd., Changzhi, Shanxi

【Abstract】 The energy efficiency and membrane lifespan of ion-exchange membrane (IM) electrolyzers for caustic soda production are critical determinants of industrial productivity and economic viability. To address challenges such as high energy consumption and rapid membrane degradation during electrolysis, this study proposes integrated optimization strategies including current density distribution adjustment, temperature control within the cell, improved membrane material selection, and surface treatment technologies. These coordinated measures effectively reduce localized polarization and energy loss, enhance ion migration efficiency, maintain stable sodium hydroxide yield, and slow down membrane performance deterioration. Experimental validation and industrial applications demonstrate that this multi-factor synergy enables sustained low energy consumption, high production rates, and equipment reliability under high-current-density operating conditions, providing technical assurance for the efficient implementation of IM-based caustic soda processes.

【Keywords】 Ion membrane process; Caustic soda electrolyzer; Energy efficiency improvement; Membrane life; Technical optimization

引言

离子膜法烧碱电解槽是工业氢氧化钠生产的核心装置，其运行效率和膜使用寿命直接影响生产成本和设备稳定性。在长期运行中，电解槽常面临能耗高、膜老化快及局部性能下降等问题，制约了生产优化空间。针对这些问题，研究通过改进操作参数、优化液流与电流分布、创新膜材料及表面处理工艺，探索提高电解效率和延长膜寿命的有效技术路径。本研究通过系统分析与实验验证，揭示了多因素协同作用下的性能提升机制，为高效、稳定的烧碱生产提供了实践参考。

1 离子膜电解槽能效现状与问题分析

离子膜电解槽在工业烧碱生产中承担着电解氯化钠生成氢氧化钠的核心功能，其运行效率对生产成本和设备稳定性具有直接影响^[1]。在实际运行中，电解槽普遍存在能耗偏高的问题，主要与电流分布不均、液流组织不合理以及电极极化效应密切相关。电流密度在不同槽室间的不均衡会导致部分区域过电解，增加电能消耗，并加速阳极和阴极材料的腐蚀与老化。液流组织若不合理，会形成局部浓度梯度，使盐溶液供给不均匀，进一步加重电解效率下降。

膜性能衰减是影响能效的重要因素，离子膜在长期高温、高电压条件下容易出现离子选择性下降和机械结构疲劳，导致离子传导效率降低，电解槽整体能耗上升。膜表面污染和沉积物积累同样会引发局部电阻增加，使电流通道受阻，形成能量损失点。操作参数的不稳定性，例如温度波动、盐水浓度偏差以及电解槽气液分布不均，也会引起电解过程效率波动，增加系统运行的不确定性。

综合来看，离子膜电解槽能效问题呈现多因素耦合特征，涉及电化学反应动力学、传质效率、膜材料性能及工艺参数优化等方面^[2]。在工业实践中，这些问题的存在不仅增加了电能消耗，还对设备的可靠性和生产连续性提出了挑战，为后续针对能效提升和膜寿命延长的技术研究提供了明确方向。

2 电流密度与温度对电解效率的优化研究

电流密度在离子膜法烧碱电解槽中对电解效率具有直接影响，其分布均匀性决定了电极反应速率及电能利用效率。局部电流密度过高会导致阳极氧化反应加剧，生成氯气速率不均，极化电压升高，进而降低整体电解效率，同时加速电极材料的腐蚀与老化。相反，局部电流密度过低会使阴极产氢速率不足，氢氧化钠生成效率降低，形成能量分布不均衡^[3]。通过优化电极几何结构、槽室间距及导电路径设计，可实现电流分布均衡化，使反应区离子迁移高效，减少能量浪费，并稳定氢氧化钠产量。

温度对电解反应动力学和离子传导过程同样关键。电解液温度偏高可以加快离子迁移速度，降低电解液电阻，但可能导致膜材料热应力增加和机械老化，使膜选择性下降。温度偏低则会降低电极表面反应速率，使电解效率下降，同时延长电解槽反应周期。温度与电流密度之间存在明显耦合效应，温度分布不均可能引起局部电流密度集中，形成热点，增加能量损失并加速膜材料老化^[4]。在槽内通过液体循环调节、加热或冷却控制，使温度与电流密度达到最佳匹配状态，对于提升电解效率具有重要意义。

工业实践中，通过优化进水温度、调节电解液流速、改善液体循环路径以及控制电极间距，可以实现电流密度与温度场的协同调控。均匀的温度和电流分布改善了离子迁移效率，降低极化效应，避免局部过电解，提高氢氧化钠产率，同时降低单位产品能耗。高电流密度与稳定温控的联合应用还能够延缓膜老化速度，降低设备维护频率，提升系统长期运行的可靠性。多因素协同优化形成闭环调控模式，使电解槽在短期高效运

行和长期稳定运行中均能保持优异性能，为离子膜法烧碱工艺的工业化运行提供可靠技术支撑，并为进一步工艺改进提供实践依据。

3 膜材料改进与表面处理技术应用

离子膜在烧碱电解槽中承担着阳极和阴极隔离以及离子传导的重要功能，其性能直接关系到电解效率、能耗水平以及设备运行稳定性。传统氟化聚合物离子膜在高温、高电流密度条件下容易发生结构疲劳，离子选择性下降，导致氢氧化钠产率降低和能量损失增加。通过引入耐高温、耐化学腐蚀的共聚物或复合膜材料，可显著提升膜的机械强度和化学稳定性，使其在长周期运行中维持稳定的离子迁移性能。膜材料孔隙结构的优化能够增强水合离子通道的均匀性，减少局部传质阻力，降低电解电阻，提高电能利用效率，并改善电极界面的反应条件，从而提升整体电解性能。

膜表面处理技术在提高膜性能方面发挥重要作用。通过功能化涂层、等离子体改性以及表面活化处理，可以改善膜表面的亲水性和化学惰性，使离子迁移路径更加均匀，降低局部极化现象^[5]。膜表面涂层能够减少盐类沉积和颗粒污染附着，降低孔道堵塞的风险，使膜在长期运行中保持低电阻状态并维持离子选择性。表面处理工艺还可以增强膜对高氯环境和强氧化条件的耐受性，减缓化学腐蚀和机械磨损，使膜结构稳定性提升，从而延长使用寿命并降低维护成本。

在工业应用中，膜材料的改进与表面处理技术的联合应用能够实现多层次优化。高稳定性复合膜结合科学的表面处理，不仅改善了离子迁移效率，还降低了局部过电解和能量损失的发生概率。在高电流密度及长周期运行条件下，膜能够保持稳定的离子通量和低电阻通道，确保氢氧化钠产率的连续性与均一性。膜材料与表面处理技术的协同作用还能够减缓膜老化速度，降低更换频率，提升设备整体运行可靠性，并增强电解槽在瞬时负荷波动和长期高强度运行中的稳定性。

综合来看，通过膜材料改进和表面处理技术的系统应用，离子膜法烧碱电解槽在能效、膜寿命和运行稳定性方面均能得到显著提升^[6]。膜的高机械强度和耐化学腐蚀性为长周期高效运行提供了保障，表面处理技术改善的界面传质条件减少了局部电阻和能量损耗，使电解槽能够在高电流密度条件下保持稳定产率和低能耗。材料与工艺的协同优化不仅增强了电解槽的瞬时性能，也为持续高效运行提供了可靠技术基础，为工业化烧碱生产的经济性、稳定性和安全性提供了坚实支撑。

4 综合技术措施对能效与膜寿命的提升效果

综合技术措施在离子膜法烧碱电解槽中对能效提升与膜寿命延长具有显著作用，其核心在于将电流密度优化、温度控制、膜材料改进及表面处理技术进行系统化协同应用。在电流密度优化方面，通过改进电极几何结构、调整槽室间距和优化导电路径设计，可实现电流在电极表面及槽体内的均匀分布，降低局部过电解区域的出现频率，减少电极极化现象及能量损失。同时，液体循环和流体分布的优化能够保证电解液在整个反应区内均匀流动，使离子迁移路径最短化，提升反应区的传质效率，增加氢氧化钠产率并减少单位产量能耗。

温度控制与电流密度的协同作用对电解效率及膜性能均有重要影响。稳定的槽内温度分布可以加快电极表面反应速率，降低局部电阻，同时避免因温度波动造成的膜热应力集中。高温条件下，膜材料的机械强度和化学稳定性容易受损，而温度过低则会导致离子迁移缓慢、电解速率下降^[7]。通过液体循环、加热及冷却系统对槽内温度进行精确调控，可以实现温度与电流密度的最佳匹配，使膜在长周期运行中保持离子选择性和低电阻状态，同时减少膜老化速度，保证电解槽的长期高效运行。

膜材料改进与表面处理技术的应用是综合措施的重要组成部分。高耐热、耐化学腐蚀的复合膜在高电流密度和高氯环境下能够维持离子传导效率和机械稳定性。膜表面的功能化涂层、等离子体改性或活化处理能够改善膜与电解液界面的传质条件，减缓沉积物附着和孔道堵塞，降低局部极化现象。同时，表面处理还能够增强膜对氧化和腐蚀环境的抵抗能力，使离子通道保持通畅，延缓膜的性能衰减。在工业运行中，高性能膜与表面处理技术的结合能够在瞬时高负荷和长期连续运行中保持稳定的氢氧化钠产率，并降低单位能耗和设备维护成本。

多因素协同优化形成闭环调控模式，使电解槽在电流、温度、膜性能及液流条件的多维控制下达到整体高效状态。电流密度与温度的协调控制改善了反应区域的能量利用率，膜材料改进与表面处理技术降低了局部极化和膜老化风险，液流优化确保电解液浓度均匀分布，从而增强了槽体整体传质效率与反应均一性。这种综合技术措施不仅提升了电解效率，降低了单位产品电能消耗，还增强了膜材料的长期稳定性，实现了

能效和膜寿命的同步优化^[8]。在实际生产中，综合技术措施的应用能够保证电解槽在不同运行条件下维持高产率和低能耗，同时提升氢气和氯气生成的稳定性，确保工业烧碱工艺的连续性和可靠性。

5 结语

离子膜法烧碱电解槽的能效提升与膜寿命延长依赖于多因素协同优化技术的系统应用。通过电流密度均衡化、温度精确控制、膜材料改进及表面处理技术的联合实施，电解槽能够实现离子迁移效率最大化，减少局部极化和能量损失，同时延缓膜老化，保持低电阻通道和离子选择性。液流优化与反应区均匀化进一步提升了电解效率和氢氧化钠产率。综合技术措施的应用使电解槽在高电流密度及长周期运行条件下保持稳定、高效和低能耗状态，降低维护成本，提高设备可靠性，为工业烧碱生产的高效化、稳定化提供了坚实技术支撑。

参考文献

- [1] 郑立群.离子膜法烧碱电解进槽精制盐水及整流控制系统优化[J].化工设计通讯,2023,49(07):75-78.
- [2] 王宏叶,段海燕,钱荧辉,等.离子膜法烧碱生产中的节能降碳措施[J].氯碱工业,2022,58(11):29-31.
- [3] 赵虹玲.离子膜法烧碱生产中的盐水除碘工艺优化方法分析[J].山西化工,2025,45(07):117-119.
- [4] 孙吉水,张栋,徐西林,等.高效离子膜法在烧碱生产过程中的氢气再生产机制[J].山东化工,2025,54(05):214-216.
- [5] 曾子睿,钟为民,陈丽芸.浅析固碱装置熔盐炉控制的设计[J].中国设备工程,2024,(21):126-128.
- [6] 刘娜.离子膜法烧碱生产过程节能降耗措施[J].中国氯碱,2024,(05):32-35+57.
- [7] 杨智勇.综合法二氧化氯和离子膜法氯碱工厂含氯废气处理工艺[J].中国氯碱,2023,(06):39-43.
- [8] 李新民,王小敏.离子膜法电解槽电压异常升高原因[J].氯碱工业,2023,59(01):1-3.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS