

# 大尺寸 AEM 电解槽流场结构与传质特性研究

董皓

浙江亿孚氢能装备有限公司 314000

**【摘要】**在绿氢制备装备大型化、高效化发展趋势下，大尺寸碱性阴离子交换膜（AEM）电解槽的性能提升成为行业核心攻关方向，流场结构设计直接决定传质效率与运行稳定性。本文立足大尺寸AEM电解槽工作机理，剖析流场构型、流道参数与内部传质过程的耦合关系，揭示不同流场结构对物料分配、反应均匀性及输出性能的影响规律，梳理当前大尺寸AEM电解槽流场设计存在的物料分布不均、局部水淹/饥饿、压降损耗偏高、结构适配性不足等问题，从构型优化、参数匹配、多场协同、仿真验证、工艺适配等层面提出改进路径，旨在强化流场结构与传质过程的适配性，提升大尺寸AEM电解槽能量转换效率与耐久性能，推动大型化绿氢制备装备高质量发展。

**【关键词】**大尺寸AEM电解槽；流场结构

Research on Flow Field Structure Design and Mass Transfer Characteristics of Large-Sized AEM Electrolyzers

Dong Hao

Zhejiang Yifu Hydrogen Energy Equipment Co., Ltd. 314000

**【Abstract】**Amid the trend toward larger-scale and more efficient green hydrogen production equipment, enhancing the performance of large-scale alkaline anion exchange membrane (AEM) electrolyzers has become a core industry focus. The flow field structure directly determines mass transfer efficiency and operational stability. This study examines the working mechanisms of large-scale AEM electrolyzers, analyzes the coupling relationships between flow field configurations, flow channel parameters, and internal mass transfer processes, and elucidates how different flow field designs affect material distribution, reaction uniformity, and output performance. It identifies current challenges in AEM electrolyzer flow field design—including uneven material distribution, localized flooding/starvation, excessive pressure drop losses, and inadequate structural compatibility—and proposes improvement strategies encompassing configuration optimization, parameter tuning, multi-field coordination, simulation validation, and process adaptation. The aim is to enhance the compatibility between flow field structures and mass transfer processes, improve energy conversion efficiency and durability of large-scale AEM electrolyzers, and advance the high-quality development of large-scale green hydrogen production systems.

**【Key words】** large-size AEM electrolyzer; flow field structure;

随着氢能产业规模化推进，电解水制氢装备向大功率、大尺寸、高效率方向快速升级，碱性阴离子交换膜（AEM）电解技术因兼具低成本与高适配性，成为大型化制氢装备的重要技术路线。大尺寸AEM电解槽因电极面积增大，传质不均、温度分布波动、流场阻力损耗等问题显著加剧，传统小尺寸流场结构已无法满足大型化装备需求。流场结构作为大尺寸AEM电解槽的核心部件，承担着物料输送、反应产物排出、电子传导及热量传递的关键功能，其结构合理性直接决定传质特性与整体性能<sup>[1]</sup>。当前大尺寸AEM电解槽流场设计普遍存在构型单一、参数匹配粗糙、多物理场耦合考虑不足等问题，制约装备性能释放。基于此，深入探究流场结构设计规律与传质特性关联机制，针对性优化结构方案，对提升大尺寸AEM电解槽运行效率、推动大型化装备工程化

落地具有重要理论与工程价值。

## 1 大尺寸 AEM 电解槽流场结构与传质特性的核心关联价值

大尺寸AEM电解槽内部涉及流体传输、电化学反应、热量传递、气液两相流动等多物理场耦合过程，流场结构是保障物料均匀供给、反应稳定进行的核心载体。流场通过预设流道引导电解液均匀分布至膜电极全表面，及时排出氢气、氧气等气相产物，避免局部水淹、物料短缺等现象，维持反应界面稳定。流场结构的核心价值不仅体现在流体输送，更在于实现传质、传热、导电、力学承载的协同平衡，通过优化流道布局降低压降损耗、提升反应均匀性，减少膜

电极性能衰减,延长电解槽使用寿命,同时提升大尺寸装备的功率密度与能效水平,维护系统运行稳定性与经济性,推动大型化电解槽高效可靠运行。

### 1.1 流场构型设计对初始传质分配的影响

流场构型是决定大尺寸 AEM 电解槽初始传质效果的基础,合理构型可实现电解液在大尺寸电极面上的快速均匀分配。常见流场构型包括平行流场、蛇形流场、网状流场、交指流场及仿生流场等,不同流场的流体路径、分布方式、扰动强度存在显著差异。平行流场加工简便、压降小,但大尺寸下易出现分配不均;蛇形流场扰动强、排水能力优,但流阻大、能耗高;交指流场依靠强制对流强化传质,却易引发局部压力集中。在大尺寸条件下,流场构型需兼顾均匀性、低阻性与排水性,避免因路径过长、流量偏差导致边缘与中心区域传质差异过大,从源头保障反应物料供给均衡,为稳定传质奠定基础<sup>[2]</sup>。

### 1.2 流场结构参数对过程传质效率的作用

流道宽度、深度、间距、截面形状等关键参数直接影响大尺寸 AEM 电解槽内部传质效率。流道尺寸过小会增加流体阻力,导致供液不足、产物排出不畅;尺寸过大会减少有效反应面积,降低电流密度。流道间距决定扩散层物料补给速率,间距过宽易引发中间区域物料饥饿,间距过密则削弱结构强度。在大尺寸条件下,参数匹配需考虑沿程压力损失与流量衰减规律,通过梯度化参数设计补偿长距离传输偏差,强化气液两相扰动,提升界面传质系数,确保全尺寸范围内传质速率与反应速率匹配,避免局部过冷/过热、水淹/干燥等问题。

### 1.3 流场-膜电极适配对整体传质稳定性的保障

流场结构与膜电组件(MEA)的界面适配性是维持大尺寸 AEM 电解槽长期稳定传质的关键。流场表面平整度、接触压力分布、密封边界设计直接影响电解液渗透与气体扩散路径。接触压力不均会导致局部接触不良或过度压缩,破坏扩散层孔隙结构,阻碍传质通道。流场出口布局与气液分离路径适配性不足,会造成产物滞留,加剧传质阻力。良好的适配性可保障反应界面稳定、物料交换顺畅,抑制局部性能衰减,提升大尺寸电解槽在变工况、长时间运行下的传质稳定性与输出一致性。同时,流场与 MEA 的界面适配性还能有效缓解界面腐蚀与机械疲劳,减少离子传导损耗,避免因局部过热引发的性能衰减。优化界面匹配可增强电解槽结构可靠性,为规模化、长周期稳定运行提供核心支撑,进一步推动碱性阴离子交换膜电解水制氢技术工程化应用。

## 2 大尺寸 AEM 电解槽流场设计与传质过程现存突出问题

受尺寸效应、两相流动、多场耦合等复杂因素影响,当前大尺寸 AEM 电解槽流场结构与传质调控仍存在诸多短板,导致装备性能难以达到理论预期,制约大型化应用推广。

### 2.1 流场构型适配性不足,大尺寸传质不均

现有流场多沿用小尺寸设计思路,未针对大尺寸长路径、大面积特点进行定制化优化,普遍存在构型单一、适应性差等问题。平行流场在大尺寸下沿程流量衰减明显,中心与边缘供液差异显著;蛇形流场路径过长导致压降急剧上升,泵耗大幅增加;仿生、交指等新型流场在大尺寸下易出现应力集中、加工难度大等问题。整体表现为物料分布不均、局部反应剧烈或迟缓,膜电极表面电流密度偏差大,引发局部过热、性能衰减,制约大尺寸电解槽性能一致性<sup>[3]</sup>。

### 2.2 流场参数匹配粗糙,传质阻力与能耗偏高

流道尺寸、间距、截面等参数多依赖经验设计,缺乏基于大尺寸效应的多目标优化,导致传质阻力与压降损耗偏高。部分流道截面单一,无法兼顾供液与排气需求;流道沿程参数无梯度变化,无法补偿压力损失与流量衰减;参数设计未考虑气液两相流动规律,易形成气泡堵塞,加剧传质恶化。高压降导致辅助系统能耗上升,降低系统整体能效,同时不均匀流动引发局部疲劳损伤,影响长期运行可靠性。

### 2.3 多物理场耦合考虑不足,传质-传热-导电协同失衡

大尺寸 AEM 电解槽内部传质、传热、导电、力学分布高度耦合,而现有流场设计多单一聚焦流体传输,忽视温度场、电场、应力场协同影响。传质不均导致反应速率差异,引发局部温度过高或过低;温度分布波动进一步改变电解液黏度与扩散速率,形成恶性循环;流场结构强度不足易产生变形,破坏接触压力与传质通道。多场失衡导致性能曲线漂移、运行区间变窄,难以在宽工况下维持高效稳定传质。

### 2.4 结构-工艺-装配匹配性差,长期传质稳定性不足

流场结构与材料选型、加工工艺、装配方案脱节,导致实际传质效果偏离仿真预期。双极板材料导电性、耐腐蚀性与流场结构不匹配;微细流道加工精度不足,出现毛刺、缩颈、偏差等缺陷,干扰流动规律;装配压力控制不当造成接触压力不均,局部通道堵塞或泄漏。长期运行中,流道腐蚀、结垢、变形等问题逐步加剧,传质效率持续下降,故障频发,难以满足大型化装备长寿命要求。

## 3 大尺寸 AEM 电解槽流场结构与传质特性优化策略

针对大尺寸 AEM 电解槽流场设计与传质调控痛点,需从构型创新、参数优化、多场协同、仿真验证、工艺适配等维度构建一体化优化体系,实现流场结构与传质特性精

准匹配。

### 3.1 创新大尺寸专用流场构型, 提升全域传质均匀性

摒弃小尺寸构型照搬思路, 开发适配大尺寸的专用流场构型。采用分区供液、多级分流、梯度路径等设计, 缩短平均传输距离, 降低沿程偏差; 组合平行-蛇形、交指-网状等复合流场, 兼顾低阻、强扰动、高排水能力; 引入仿生叶脉、分形树状等仿生流场, 实现流量自平衡与均匀分配。通过构型创新, 消除大尺寸下流量衰减、局部饥饿、产物滞留等问题, 实现全尺寸范围内传质均匀化。

### 3.2 精细化参数匹配与梯度优化, 降低传质阻力损耗

建立基于计算流体力学 (CFD) 的参数化优化模型, 以均匀性、压降、传质系数为目标, 对宽度、深度、间距、截面形状、倾角等进行多目标优化。采用沿程渐变式流道参数设计, 补偿压力损失与流量衰减; 优化入口/出口布局, 减少涡流与死区; 采用梯形、弧形等流线型截面, 降低流动阻力。通过精细化匹配, 在保证传质强化的同时, 将压降损耗控制在最优区间, 提升系统能效。

### 3.3 构建多物理场协同设计机制, 实现传质-传热-导电平衡

建立传质、传热、电场、应力场耦合仿真模型, 同步优化流体传输、温度分布、电流密度分布与结构强度。通过流场结构调控实现温度场均匀化, 避免局部过热; 优化导电通路与接触压力分布, 提升电子传导效率; 强化结构刚度, 抑制运行变形。实现“物料输运均衡、热量及时耗散、电子高效传导、结构稳定可靠”的多目标协同, 拓宽高效运行区间。

### 3.4 强化仿真验证与实验对标, 提升设计精准度

构建“仿真预判—样件试制—实验测试—迭代修正”闭环验证体系。采用 CFD、多物理场有限元仿真开展两相流动、传质特性、压降特性、温度分布模拟, 提前预判缺陷; 开展流场可视化、传质系数、压降曲线、性能曲线等实验测试, 对标修正模型; 建立大尺寸流场性能数据库, 形成标准化设计流程, 提升设计可靠性与工程转化率。例如可针对不同功率等级、运行工况开展多维度对标试验, 采集流量分布、电

流密度均匀性、长期耐久性等关键数据, 持续修正仿真边界条件。依托闭环验证体系快速迭代设计方案, 缩短研发周期、降低试制成本, 为大尺寸 AEM 电解槽流场结构工程化落地提供完整技术依据。

### 3.5 推进材料-工艺-装配一体化适配, 保障长期稳定传质

优选高导电、耐腐蚀、易成型的流场材料, 适配大尺寸加工与长期运行需求; 优化微细铣削、蚀刻、冲压等加工工艺, 提升流道精度与表面质量; 建立标准化装配工艺与压力管控方案, 保证接触压力均匀。通过全链条适配, 减少加工与装配带来的传质干扰, 提升长期运行下的结构稳定性与传质耐久性, 支撑大尺寸电解槽长寿命可靠运行。同时结合数值模拟与工况测试, 建立流场材料、工艺参数与装配压力的匹配数据库, 形成可复制的量产制造规范。针对长期运行中的腐蚀、磨损与微变形问题, 引入表面改性 with 寿命预测技术, 进一步提升流场结构可靠性, 为大尺寸 AEM 电解槽工业化稳定运行提供坚实保障。

## 4 结论

流场结构设计是决定大尺寸 AEM 电解槽传质特性与综合性能的核心因素, 二者存在强耦合、强关联机制。在大型化装备开发中, 流场结构需承担物料均匀输送、产物高效排出、热量均衡传递、电子稳定传导等多重功能, 直接影响电解槽效率、功率密度与使用寿命。针对当前大尺寸 AEM 电解槽存在的构型适配不足、参数匹配粗糙、多场协同失衡、工艺匹配性差等问题, 需通过创新专用构型、精细化参数优化、多物理场协同设计、全流程验证、材料工艺一体化适配等措施, 构建高效、均匀、低阻、稳定的流场系统, 显著提升传质特性与综合性能。未来需持续深化大尺寸效应与两相流动机理研究, 推动流场结构向智能化、轻量化、集成化方向升级, 为大功率绿氢制备装备发展提供核心技术支撑。

## 参考文献

- [1]董云芳,马守营,伍永福,等. 稀土熔盐电解槽物理场研究现状 [J]. 稀土, 2026, 47 (02): 130-143.
  - [2]赵卓尧,王鹏飞,黄丹极,等. 拉伸网流道结构对碱性水电解槽流动与电化学特性影响的模拟研究 [J]. 工程科学学报, 2026, 48 (03): 671-685.
  - [3]王子朋,王晶晶,王延飞,等. 质子交换膜电解槽流场结构研究现状及展望 [J]. 石油炼制与化工, 2026, 57 (02): 1-12.
- 作者简介: 董皓, 出生年月: 1981年9月, 男, 汉族, 籍贯: 山东省济宁市, 学历: 硕士, 研究方向: 电解水制氢设备, AEM 电解水制氢产业化技术。