

EDI 膜组件与电极结构优化设计及流体动力学仿真研究

冯涛 钱建斌 张小霞

浙江东大环境工程有限公司 311800

【摘要】本文聚焦于EDI(电去离子)膜组件与电极结构的优化设计,结合流体动力学仿真技术展开深入研究。通过对EDI膜组件工作原理、常见结构以及电极结构对其性能影响的分析,明确了优化目标。针对膜组件和电极结构进行了多方面的优化设计,包括膜材料选择、流道设计、电极材料与形状等。运用计算流体动力学软件对优化后的结构进行仿真分析,得到流场分布、离子浓度分布等结果,并与优化目标进行关联分析。最后通过实际案例验证了优化设计的有效性,为EDI技术在水过滤领域的应用提供了更优的设计方案和理论支持。

【关键词】EDI膜组件;电极结构;优化设计;流体动力学仿真

Optimal design of EDI membrane assembly and electrode structure and fluid dynamics simulation study

Feng Tao Qian Jianbin Zhang Xiaoxia

Zhejiang Dongda Environmental Engineering Co., Ltd. 311800

【Abstract】This paper focuses on the optimization design of EDI(electrodeionized)membrane components and electrode structure, combined with in-depth research on hydrodynamic simulation technology. Through the analysis of the working principle, common structure and the influence of electrode structure on its performance, the optimization goal is defined. The membrane components and electrode structure are optimized in many aspects, including membrane material selection, flow channel design, electrode material and shape, etc. Through the simulation analysis of the optimized structure, the flow field distribution, ion concentration distribution and other results are obtained, and they are associated with the optimization target. Finally, the effectiveness of optimization design is verified through real cases, which provides better design scheme and theoretical support for the application of EDI technology in the field of water filtration.

【Key words】EDI membrane assembly; electrode structure; optimized design; fluid dynamics simulation

一、引言

在当今对水质要求日益严格的时代,水过滤技术在各个领域都发挥着至关重要的作用。EDI(Electrodeionization)技术作为一种先进的水纯化技术,它结合了电渗析和离子交换的优点,能够连续生产高品质的纯水,在电子、电力、制药等行业有着广泛的应用前景。

EDI膜组件和电极结构是EDI系统的核心组成部分,其性能直接影响着整个系统的产水水质、能耗以及运行稳定性。然而,目前市场上的EDI膜组件和电极结构在设计上仍存在一些不足之处,如膜污染问题严重、离子交换效率有待提高、电极能耗较高等。因此,对EDI膜组件与电极结构进行优化设计,以提高其性能和效率,具有重要的现实意义。

流体动力学仿真技术作为一种强大的工具,能够对EDI膜组件内部的流体流动和离子传输过程进行模拟和分析,为优化设计提供直观的依据。通过对流体动力学的研究,可以更好地了解膜组件内部的流场分布、离子浓度分布等情况,从而有针对性地进行结构优化。

二、EDI膜组件与电极结构基础

2.1 EDI膜组件工作原理

EDI膜组件的工作原理基于电渗析和离子交换的耦合作用。在EDI膜组件中,有阳离子交换膜(CEM)和阴离子交换膜(AEM)交替排列,形成多个隔室。在直流电场的

作用下,水中的阳离子向阴极移动,透过阳离子交换膜进入浓水室;阴离子向阳极移动,透过阴离子交换膜进入浓水室。同时,在离子交换树脂的作用下,水中的离子被进一步去除,从而实现水的深度纯化。

在淡水室中,离子交换树脂不断地吸附水中的离子,当树脂达到饱和时,在电场的作用下,树脂上的离子会被交换下来,进入浓水室,从而使树脂得到再生。这种连续的离子交换和再生过程,使得EDI膜组件能够持续稳定地生产高品质的纯水。

2.2 常见EDI膜组件结构

目前,常见的EDI膜组件结构主要有板框式和螺旋卷式两种。

板框式EDI膜组件由多个膜板和隔板交替堆叠而成,膜板上有离子交换膜和电极,隔板上有流道,用于引导水流。板框式膜组件的优点是结构简单,易于组装和维护,膜的更换方便;缺点是占地面积较大,水流分布不均匀,容易出现浓差极化现象。

螺旋卷式EDI膜组件是将离子交换膜、隔网和多孔支撑层等材料卷绕在中心集水管上形成的。螺旋卷式膜组件的优点是单位体积的膜面积大,占地面积小,水流分布相对均匀;缺点是膜组件的制作工艺复杂,膜的更换困难,容易出现膜的污染和堵塞。

2.3 电极结构及其对膜组件性能影响

电极结构是EDI膜组件的重要组成部分,它不仅影响着电场的分布,还对离子的迁移和膜组件的能耗有着重要的影响。

常见的电极材料有钛镀铂电极、钛涂钌电极等。钛镀铂

电极具有良好的导电性和耐腐蚀性，能够提供稳定的电场，但成本较高；钛涂钨电极成本较低，也具有较好的耐腐蚀性和导电性，但在长期使用过程中，涂层可能会出现脱落现象。

电极的形状和尺寸也会影响膜组件的性能。例如，电极的形状会影响电场的均匀性，从而影响离子的迁移效率；电极的尺寸会影响电极的电阻，进而影响膜组件的能耗。此外，电极间距的大小也会对离子的迁移路径和能耗产生影响，合适的电极间距可以提高离子的迁移效率，降低能耗。

三、EDI 膜组件与电极结构优化设计

3.1 优化目标确定

针对 EDI 膜组件应用需求，优化目标如下：提升产水水质，采用复合膜、纳米膜结合电场均匀技术，达超纯水标准；表面改性技术减少污染。降低能耗，用高导电性电极与动态电极间距设计，能耗降至 0.5kWh/m^3 以下；优化流道布局减阻节能。减少膜污染，设涡流挡板或微柱阵列减浓差极化，延长清洗周期；自清洁设计与 EDTA 清洗剂恢复膜通量。提高离子交换效率，树脂梯度填充增容量，脉冲电场驱动再生提速，缩短处理周期。这些优化旨在全面提升 EDI 膜组件性能。

3.2 膜组件结构优化设计

3.2.1 膜材料选择与改进

传统的离子交换膜在性能上存在一定的局限性，包括存在选择透过性不足、化学稳定性差等问题。因此，选择新型的高性能膜材料是提高膜组件性能的关键。

目前，一些新型的膜材料如复合膜、纳米膜等已经得到了广泛的研究和应用。

复合膜：通过多材料复合提升综合性能（如抗污染性、机械强度）；纳米膜：高比表面积与选择性可显著提升离子分离效率，尤其适用于超低离子残留场景。

此外，对膜材料进行表面改性也是提高膜性能的一种有效方法。表面改性技术：通过亲水涂层或官能团修饰，改善膜表面抗污染性能与离子选择性。

3.2.2 膜堆内部流道设计优化

膜堆内部流道的设计直接影响着水流的分布和离子的传输。优化流道设计可以使水流更加均匀地分布在膜堆内部，减少死区和浓差极化现象的发生。

流道形状与布局：采用梯形或蛇形流道设计，增加湍流程度，减少死区与浓差极化现象，提升离子传输效率，同时可采取优化流道宽度与高度比例，确保水流均匀分布。

此外，在流道中集成扰流元件：通过在流道中设置挡板或涡流发生器，改善流体动力学特性，强化传质过程。

3.3 电极结构优化设计

3.3.1 电极材料与形状优化

在电极材料的选择上，除了考虑导电性和耐腐蚀性外，还应考虑材料的成本和环保性。例如，采用碳纳米管复合电极或石墨烯电极，兼顾高导电性（电阻降低 25%）与耐腐蚀性，同时降低材料成本。

电极的形状对电场的分布有着重要的影响。通过优化电极的形状，可以使电场更加均匀地分布在膜组件内部，提高离子的迁移效率。弧形电极：增大有效表面积，优化电场均匀性。网状电极：增强离子迁移路径的覆盖范围，提升电场

利用率。

3.3.2 电极间距与排列方式优化

电极间距的大小直接影响着离子的迁移路径和能耗。适当减小电极间距可以缩短离子的迁移路径，降低电阻，从而减少能耗。但电极间距过小也会导致电场强度过高，增加膜组件的运行风险。通过实验与仿真确定最佳间距（通常为 $1\sim 3\text{mm}$ ），平衡能耗与电场强度，避免运行风险。

同时，电极排列方式进行创新，如采用交错排列，可以减少电场盲区，提升离子迁移效率；而采用对称排列，可以进一步改善电场的分布，优化其分布均匀性，降低局部过热风险。

四、流体动力学仿真分析

4.1 仿真软件与模型建立

为了对优化后的 EDI 膜组件与电极结构进行流体动力学仿真分析，选用 Fluent 作为计算流体动力学（CFD）仿真平台，开展流体动力学与传质过程的耦合分析。并设计出以下具体实施步骤：

1. 几何模型构建

基于优化后的设计方案，构建包含膜堆、流道及电极的三维几何模型，精确表征内部拓扑结构（如梯形流道、涡流挡板等特征）。

2. 网格划分与质量验证

采用混合网格划分策略（结构化网格用于规则区域，非结构化网格用于复杂几何），确保关键区域（如膜表面、电极界面）的网格密度满足分辨率要求；

通过 FluentMesh 模块验证网格无关性，控制网格质量参数（如 $\text{Skewness}<0.8$ 、 $\text{AspectRatio}<5$ ）

3. 物理模型与边界条件设置

激活多相流模型与组分传输模型，模拟水流与离子的动态迁移行为；

入口边界条件：设定流速 $0.1\sim 0.5\text{m/s}$ （雷诺数范围 $500\sim 2500$ ）、温度 25°C ，对应实际工况；

电极边界条件：施加脉冲电场（电压 $1\sim 5\text{V}$ 、频率 $10\sim 50\text{Hz}$ ），模拟离子电迁移与再生过程。

4.2 仿真结果与分析

4.2.1 流场分布分析

通过仿真得到 EDI 膜组件内部的流场分布情况。分析流场分布可以发现，优化后的蛇形流道设计显著提升了流场均匀性（速度标准差降低 30%），有效抑制死区与回流现象。通过湍动能（TKE）分析发现，流道内湍流强度提高 40%，强化了离子与膜表面的传质效率。

4.2.2 离子浓度分布分析

仿真结果还可以得到 EDI 膜组件内部的离子浓度分布情况。通过分析离子浓度分布，可以了解离子在膜组件内部的迁移规律和交换效率。

优化后的膜组件和电极结构能够使离子更加有效地向浓水室迁移，离子残留量降至 $<1\text{ppb}$ ，满足超纯水标准，提高了产水水质。同时，通过调整电极的位置和形状，使离子富集效率提升 25%，同时电场分布均匀性提高（电场强度标准差降低 15%），减少局部过热风险。

4.2.3 与优化目标的关联分析

将仿真结果与优化目标进行关联分析,评估优化设计对提高产水水质、降低能耗、减少膜污染和提高离子交换效率等目标的实现程度。

通过分析可以发现,优化后的 EDI 膜组件与电极结构

在产水水质、能耗和离子交换效率等方面都有了显著的提高,同时减少了膜污染的可能性。这表明优化设计方案是有效的,能够满足实际应用的需求。

优化目标	仿真实验验证指标	达成效果
产水水质提升	淡水室离子浓度<1ppb	达标率 100%
能耗降低	系统总能耗 0.45kWh/m ³	较传统设计降低 28%
膜污染抑制	膜表面污垢沉积速率 0.02 μm/h	污染周期延长至 3 个月
离子交换效率提升	离子迁移速率 $1.2 \times 10^{-4} \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	提升 30%

五、实验验证

5.1 实验装置搭建

为了验证优化设计的可行性和有效性,搭建了一套 EDI 实验装置。

EDI 膜组件采用优化后的设计方案,具体组成如下:

核心组件:

EDI 膜组件:采用梯度填充树脂的膜堆结构,集成蛇形流道与碳纳米管复合电极;

电源系统:直流电源模块(输出范围 0-10V,精度 ± 0.1V),支持脉冲电场模式;

水循环系统:配备精密流量泵(流量范围 0.5-5L/min)

与水质在线监测仪(电阻率检测精度 $0.01 \text{M}\Omega \cdot \text{cm}$)。

辅助单元:

进水预处理单元(含 5 μm 精密过滤器);

数据采集系统(实时记录电阻率、离子浓度及能耗数据)

5.2 实验方案设计

设计了一系列实验方案,包括不同进水水质、不同运行电压和电流等条件下的实验。通过改变这些实验条件,研究优化后的 EDI 膜组件与电极结构在不同工况下的性能表现。

在实验过程中,对进水和出水的水质参数进行实时监测和记录,同时观察膜组件的运行情况,如是否出现膜污染、电极腐蚀等现象。

实验组别	进水水质(TDS)	运行电压(V)	电流密度(A/m ²)
对照组	50-100ppm	5(恒定)	30
优化组	50-100ppm	5(脉冲模式)	30
高盐组	200-300ppm	7(脉冲模式)	50

5.3 实验结果分析

实验结果表明,优化后的 EDI 膜组件与电极结构在产水水质、能耗和离子交换效率等方面都有了明显的改善。通过对比实验数据,验证优化设计的综合性能提升。

产水水质:

优化组产水电阻率稳定在 $18.5-19.2 \text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ (较对照组提升 22%),离子残留量 ≤ 1ppb;

高盐组产水电阻率仍达 $16.8 \text{M}\Omega \cdot \text{cm}$,表明系统对进水波动的适应性显著增强。

能耗与效率:

脉冲电场模式下,系统能耗降至 $0.48 \text{kWh}/\text{m}^3$ (较恒定电压模式降低 28%);

离子交换效率提升 30%,处理周期缩短至 2.5h(对照组为 3.2h)。

抗污染性能:

膜表面污垢沉积速率由 $0.15 \mu\text{m}/\text{h}$ 降至 $0.05 \mu\text{m}/\text{h}$,化学清洗周期延长至 90 天;

SEM 分析显示,优化组膜表面污染层厚度减少 70%。

六、结论与展望

6.1 研究成果总结

本文通过优化设计 EDI 膜组件与电极结构,并进行流体动力学仿真,实现了提高水质、降低能耗、减少污染及提升离子交换效率的目标。优化涵盖膜材料、流道、电极材料形状与间距等,仿真分析验证了设计合理性,实验显示优化结构在多方面均有显著改善。

6.2 研究不足与展望

管取得一定成果,但研究存在模型简化、实验条件限制等不足。未来应完善仿真模型,提高准确性;扩大实验范围,研究不同工况下的性能变化;结合 AI 技术优化运行过程;探索新型 EDI 膜组件与电极结构,提升性能和应用范围,为水过滤领域提供支持。

参考文献

- [1]王宗恒,管山,冯冬菊.异相膜和均相膜对 EDI 过程离子传递的影响[J].天津工业大学学报.2013,(2).
- [2]张治磊,张盼,郭锡伟,等.均相膜电渗析技术在硝酸钠废水处理中的应用研究[J].盐科学与化工.2021,(5).
- [3]张淑芳,刘兆明,傅荣强,等.均相离子交换膜的电渗析水迁移性能研究[J].膜科学与技术.2019,(4).
- [4]俞益波,邱利民,张小斌.基于 CFD 的惯性管流动特性研究[J].低温工程.2011,(1).
- [5]尹建超.城市生活用水水质检验和污水处理方法探讨[J].云南化工.2020,(6).
- [6]杨超,胡艺凡,闫子豪,等.水滴型凸肋通道内流动换热的数值模拟[J].广州化工.2020,(11).