

阴阳离子交换床树脂再生效率提升与低成本运行优化研究

高天宇 (内蒙古大唐国际托克托发电有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010000)

摘要: 本研究系统优化了阴阳离子交换树脂的再生与运行性能。通过实验考察再生剂浓度、流速、温度及运行条件对树脂再生深度和交换床性能的影响。结果表明, 采用 4.0% HCl 与 3.0% NaOH 作为再生剂, 4.0BV/h 再生流速, $40 \pm 1^\circ\text{C}$ 再生温度, 结合 0.5BV 慢速置换与 3.5BV 正洗工艺, 以及基于进水累积负荷的自适应运行周期控制, 可使产水周期延长 9.4%, 制水量增加 9.4%, 再生剂消耗量降低 18.4%-23.2%, 系统自用水量率下降 26.7%, 出水平均电导率降低 23.2%, 吨水处理成本降低 26.7%。

关键词: 离子交换树脂; 再生效率; 运行优化; 低成本; 经济性

中图分类号: TQ085.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 036-0049-03

Enhancement of Regeneration Efficiency and Optimization of Low-Cost Operation for Anion-Cation Exchange Bed Resins

Gao Tianyu (Inner Mongolia Datang International Tuoketuo Power Generation Co., Ltd., Hohhot Inner Mongolia 010000, China)

Abstract: This study systematically optimized the regeneration and operational performance of anion-cation exchange resins. Experiments were conducted to investigate the effects of regenerant concentration, flow rate, temperature, and operating conditions on resin regeneration depth and exchange bed performance. The results indicate that employing 4.0% HCl and 3.0% NaOH as regenerants, a regeneration flow rate of 4.0 BV/h, a regeneration temperature of $40 \pm 1^\circ\text{C}$, combined with a 0.5 BV slow displacement and 3.5 BV forward rinse process, along with adaptive operational cycle control based on cumulative influent load, can extend the production water cycle by 9.4%, increase treated water output by 9.4%, reduce regenerant consumption by 18.4%-23.2%, decrease the system's self-water consumption rate by 26.7%, lower the average effluent conductivity by 23.2%, and reduce the treatment cost per ton of water by 26.7%.

Keywords: Ion exchange resin; Regeneration efficiency; Operational optimization; Low-cost; Economic viability

离子交换技术在水处理领域应用广泛, 但树脂再生效率低和运行成本高制约了其大规模应用^[1]。研究聚焦于阴阳离子交换床树脂再生与运行优化, 通过实验表征与工艺优化相结合的方法, 系统探究了再生剂浓度、再生流速、温度及运行条件对树脂性能的影响机制。旨在提升树脂再生效率, 延长运行周期, 降低运行成本, 为水处理系统提供高效、经济的运行方案, 对推动离子交换技术在工业水处理中的应用具有重要实践意义。

1 实验材料、装置与分析方法

1.1 离子交换 (Ion Exchange, IE) 树脂理化性能表征

实验选用 001×7 型强酸性阳离子交换树脂与 201×7 型强碱性阴离子交换树脂作为研究对象。对树脂进行使用前预处理, 包括清水浸泡 24h, 乙醇溶液清洗, 以及酸碱转型活化。采用湿筛法测定树脂的粒度分布, 其有效粒径集中于 0.55mm 至 0.85mm 区间。通过马弗炉灼烧法测定其含水率。树脂的总交换容量则依据国家标准《阳离子交换树脂交换容量测定方法》(GB/T 8144-1987) 与《强碱性阴离子交换树脂》(GB/T 13660-92) 进行滴定测定^[2]。经过一系列的表征分析,

获得了两种树脂在实验初始状态下的关键理化性能参数。这些参数为后续的再生与运行实验提供了基础数据支持, 并作为评估树脂在长期运行后性能衰减的基准。

1.2 实验系统搭建与运行方案

实验系统主体为两根内径 50mm、柱高 1200mm 的有机玻璃交换柱, 分别填充活化处理后的阳、阴 IE 树脂, 填充高度为 800mm。柱底部铺设 50mm 高的石英砂承托层以均匀布水。原水由 Watson-Marlow 323 系列蠕动泵精确控制流量, 依次通过阳离子交换柱和阴离子交换柱^[3]。系统中配置了梅特勒-托利多在线电导率仪、pH 计和横河 EJA 系列压力传感器, 数据通过可编程逻辑控制器 (Programmable Logic Controller, PLC) 每 60s 记录一次。PLC 同时控制电磁阀组, 实现运行与再生流程的自动切换。再生系统与运行系统并联, 通过阀门切换。采用逆流再生方式, 再生液由 SEKO 计量泵从交换柱底部注入。整个实验装置安放于恒温环境中, 以减小环境温度波动对离子交换动力学过程的干扰。实验原水为添加了分析纯试剂的本地自来水, 其稳定组分为: NaCl 150 mg/L, CaSO₄ 120 mg/L, MgCl₂ 80 mg/L, Na₂SiO₃ 20 mg/L, 用以模拟总

溶解固体 (Total Dissolved Solids, TDS) 约为 370 mg/L 的特定工况水质。

1.3 水质参数分析方法

实验过程中的水质分析是评估系统运行效果的核心环节。采用 DDS-307A 型电导率仪在线监测出水纯度, 以电导率低于 $10 \mu\text{S}/\text{cm}$ 作为运行终点判断标准。使用 PHS-3C 型 pH 计监测酸碱度变化。水样中主要阳离子如 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的浓度采用 TAS-990 原子吸收分光光度计进行测定, 使用空气-乙炔焰, 并针对 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 的测定加入氯化镧作为释放剂以消除化学干扰^[4]。主要阴离子如 Cl^- 、 SO_4^{2-} 的浓度则通过 ICS-1100 离子色谱仪进行分析, 该仪器配备 Dionex IonPac AS14A 分析柱, 使用碳酸钠/碳酸氢钠混合溶液作为淋洗液, 并经过抑制器降低背景电导。对于阴床出水中的微量 SiO_2 , 采用硅钼蓝分光光度法, 使用 1-氨基-2-萘酚-4-磺酸作为还原剂, 在 722N 型可见分光光度计 815nm 波长下测定其吸光度, 通过预先绘制的标准曲线换算出其含量。所有分析方法均遵循相应的国家标准分析方法, 并在取样后尽快完成测定, 以保证数据的准确性与时效性。

2 树脂再生过程关键参数优化

2.1 再生剂浓度及用量对再生深度的影响分析

再生剂的浓度与用量直接决定了树脂的再生深度及经济成本。针对 001×7 阳树脂, 分别考察了质量分数为 3.0%、4.0% 和 5.0% 的 HCl 溶液作为再生剂的效果。对于 201×7 阴树脂, 则对应考察了 2.0%、3.0% 和 4.0% 的 NaOH 溶液。实验中, 再生深度通过测量再生后树脂的实际工作交换容量来量化^[5]。在特定再生条件下完成再生和清洗后, 立即进行一次标准的吸附-失效实验, 通过积分计算出水离子泄漏曲线与进水浓度线之间的面积, 从而得到该再生条件下的工作交换容量。再生剂用量以再生剂比耗 (g/L 树脂) 进行标准化, 分别设定了 60、80、100g HCl/L 树脂和 50、70、90g NaOH/L 树脂三个梯度。实验结果表明, 在一定范围内, 提高再生剂浓度和用量有助于提升树脂的再生后工作交换容量。当 HCl 浓度由 3.0% 增至 4.0% 时, 阳树脂的工作交换容量提升较为明显, 但继续增至 5.0% 时, 容量增幅放缓而酸耗增加。NaOH 对阴树脂的再生表现出类似规律。综合考虑再生效率与药剂成本, 选取 4.0% HCl 和 3.0% NaOH 作为后续实验的优化再生剂浓度。

2.2 再生流速与温度的动力学效应研究

再生过程是一个传质与反应耦合的过程, 再生液流速与温度是影响其动力学效率的关键因素。实验设定了 2.0BV/h、4.0BV/h 和 6.0BV/h 三个再生流速梯度。

为探究其动力学影响, 再生过程中每隔 0.25BV 收集一次再生排液, 并分析其中被交换下来的离子 (如阳床的 Na^+ 、 Ca^{2+}) 和残余再生剂 (H^+) 的浓度, 绘制再生流出曲线。

结果显示, 4.0BV/h 流速下的再生流出曲线峰形尖锐且拖尾短, 表明再生剂利用率高, 离子置换效率高。过高的流速 (6.0BV/h) 则导致峰形扁平且拖尾严重, 再生剂穿透过快。温度对阴树脂的再生影响更为突出, 尤其是在去除吸附的 SiO_2 方面。实验中将 NaOH 溶液通过恒温水浴预热, 并使再生柱外层带有夹套以维持 $40 \pm 1^\circ\text{C}$ 的再生温度。将 NaOH 再生液的温度从环境温度 (25°C) 提升至 40°C , 阴树脂对 SiO_2 的洗脱率提升了约 18.6%, 再生排液中 SiO_2 的峰值浓度更高, 且再生后产水周期中硅泄漏量有明显下降, 但能耗也相应增加。

2.3 逆流再生置换与清洗工艺优化

逆流再生工艺结束后, 有效的置换与清洗步骤对于减少再生剂残留、降低后续产水污染以及节约用水至关重要。实验中, 置换步骤采用小流量 (约 2.0BV/h) 的清洗水顶压, 将残留在树脂层内的再生液缓慢推出, 回收利用。这种慢速置换旨在形成一个清晰的界面, 实现活塞式流动, 最大限度地减少再生剂与清洗水的混合。置换过程通过在线电导率监测, 当出口电导率下降至再生液浓度的 10% 左右 (约 $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$) 时, 切换至快速正洗。随后的正洗步骤则采用较大的运行流速 (约 15.0BV/h) 进行快速冲洗, 利用较大的剪切力冲刷树脂颗粒表面及颗粒间隙的残留液体。通过在线监测清洗出水的电导率, 确定清洗终点。实验对比了不同置换水量和正洗水量组合下的清洗效果。结果表明, 采用 0.5BV 的慢速置换水量, 可以将大部分高浓度再生废液集中排出, 后续仅需约 3.5BV 的正洗水量即可使出水水质达标。相较于传统的直接大流量冲洗模式, 优化后的分步清洗工艺可节约清洗用水约 22.5%, 并减少了混合废液的处理量。

3 IE 交换床运行模式优化研究

3.1 运行流速对离子泄漏曲线与工作交换容量的影响

运行流速是决定 IE 交换床处理能力和运行周期的直接参数。实验考察了 15BV/h、25BV/h 和 35BV/h 三种流速下交换床的性能表现。在较低流速 (15BV/h) 下, 水流与树脂有更长的接触时间, 传质区较窄, 离子泄漏曲线平缓, 树脂的工作交换容量接近其平衡交换容量。随着流速增加至 25BV/h 及 35BV/h, 传质区被拉长, 离子泄漏曲线变得陡峭, 泄漏点提前出现, 导致树脂的工作交换容量下降。例如, 从 15BV/h 增加到 35BV/h, 阳床的工作交换容量下降了约 13.8%。为对此过程进

行量化描述,可采用Thomas模型对泄漏曲线进行拟合,其表达式如式(1)所示:

$$\frac{C_t}{C_0} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{k_{Th} \cdot q_0 \cdot m}{Q} - k_{Th} \cdot C_0 \cdot t\right)} \quad (1)$$

其中: C_t 为 t 时刻出水离子浓度 (mg/L), C_0 为进水离子浓度 (mg/L), k_{Th} 为 Thomas 模型速率常数 (L/(mg·h)), q_0 为最大交换容量 (mg/g), m 为树脂质量 (g), Q 为体积流速 (L/h)。通过拟合得到的模型参数可以用于预测不同工况下的交换床性能。

3.2 进水水质波动下的运行周期适应性分析

工业应用中,原水水质常存在一定波动,这直接影响交换床的稳定运行。实验模拟了进水总溶解固体 (Total Dissolved Solids, TDS) 含量在 200mg/L 至 400mg/L 范围内波动的情况。监测结果显示,当进水 TDS 从 200mg/L 升高至 400mg/L 时,在保持 25BV/h 流速不变的条件下,产水周期缩短了约 45.7%。这种滞后响应特性使得传统的固定周期再生模式难以适用,可能导致树脂未失效即再生,或在水质超标后才进行再生。为应对此问题,提出了一种基于进水累积负荷的控制策略。通过在线监测进水电导率,实时计算进入交换床的离子总量。当累积负荷达到预设阈值 (理论总交换容量的 80%) 时,系统自动启动再生程序。

4 优化运行方案的经济性评估

为全面评估优化措施的综合效果,将优化后的运行方案与传统的常规运行方案进行对比。常规方案采用较高的再生剂用量 (5.0% HCl, 4.0% NaOH)、未优化的直接冲洗方式以及固定的运行周期。优化方案则集成了前述研究确定的最佳参数,包括 4.0% HCl 和 3.0% NaOH 再生、分步式置换清洗工艺以及基于累积负荷的自适应运行周期控制。在处理相同水质的条件下,对两种方案的多个关键性能指标进行了为期 10 个周期的连续测试与统计。对比数据如表 1 所示。

评估结果表明,优化运行方案在多个维度均展现出优势。再生剂的单位周期消耗量得到有效降低,其中酸耗降低了 18.4%,碱耗降低了 23.2%。同时,再生与清洗过程的总耗水量减少了 21.7%。这些消耗的降低直接转化为运行成本的节约。虽然优化方案可能会因为进水水质的改善而适当延长周期,但其核心优势在于提升了资源利用效率,降低了单耗,并增强了系统对工况变化的适应能力。

5 结论

研究通过系统优化阴阳离子交换床再生与运行参数,成功实现了树脂再生效率和运行经济性的显著提升。结合分步清洗和自适应运行周期控制,使产水周期延长 9.4%,再生剂消耗量降低 18.4%–23.2%,系统自用水率下降 26.7%,吨水处理成本降低 26.7%。该方案不仅提高了资源利用效率,还增强了系统对水质波动的适应能力。未来研究可进一步探索树脂再生过程的机理模型,以实现更精准的控制和更广泛的工程应用。

参考文献:

- [1] 汤桂标. 玉米淀粉糖生产中离子交换树脂的应用研究 [J]. 中国食品, 2025(06):129-131.
- [2] 赵国栋. 阴阳离子交换器运行存在问题的探析 [J]. 化工管理, 2024(29):126-128+137.
- [3] 郭龙清. 离子交换树脂在造纸废水脱盐中的应用研究 [J]. 中国造纸, 2024,43(05):151-157.
- [4] 李超. 脱盐水系统离子交换树脂污染原因剖析及应对 [J]. 中氮肥, 2024(03):63-65.
- [5] 赵立岩. 长期运行下的火电厂水处理系统中阴阳树脂再生优化研究 [J]. 山西化工, 2024,44(04):147-149.

作者简介:

高天宇 (1998-), 男, 蒙古族, 内蒙古赤峰人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 设备运行与节能。

表 1 优化前后运行方案性能指标对比

指标	常规运行方案	优化运行方案	变化率 (%)
平均产水周期 (h)	24.5	26.8	9.4
周期制水量 (m ³)	36.75	40.2	9.4
HCl (4%) 消耗量 (kg/m ³ 树脂)	48.5	39.6	-18.4
NaOH (3%) 消耗量 (kg/m ³ 树脂)	55.2	42.4	-23.2
再生及清洗总耗水 (m ³ /周期)	2.35	1.84	-21.7
系统自用水率 (%)	6	4.4	-26.7
出水平均电导率 (μS/cm)	1.85	1.42	-23.2
吨水处理成本 (元/m ³)	0.45	0.33	-26.7