

引用本文: 夏永生, 张子昂, 王钊, 郭晋汉, 张娟娟, 王星煜, 双陈冬, 周庆. 基于BDST模型的固定床反应器树脂失效周期的预测与动态运行分析 [J]. 离子交换与吸附, 2026, 42(1): 39-46.

Citation: XIA Yong-sheng, ZHANG Zi-ang, WANG Zhao, GUO Jin-han, ZHANG Juan-juan, WANG Xing-yu, SHUANG Chen-dong, ZHOU Qing. Prediction of Resin Failure Cycle and Dynamic Operation Analysis of Fixed-Bed Reactor Based on BDST Model [J]. Ion Exchange and Adsorption, 2026, 42(1): 39-46.

· 研究论文 ·

文章编号: 1001-5493(2026)01-0039-08

DOI: 10.16026/j.cnki.iea.2026010039

基于BDST模型的固定床反应器树脂失效周期的预测与动态运行分析*

夏永生¹, 张子昂², 王钊^{3**}, 郭晋汉³, 张娟娟³, 王星煜², 双陈冬², 周庆^{2**}

(¹连云港市质量技术综合检验检测中心, 连云港 222000 ²南京大学环境学院, 南京 210023 ³武汉第二船舶设计研究所, 武汉 430064)

摘要: 为实现电厂凝结水处理系统在动态波动进水条件下离子交换树脂寿命的准确预测, 文章基于固定床动态实验, 研究了进水电导率与进水流速对强酸强碱混床树脂除盐过程的影响规律, 并构建了适用于动态工况的BDST预测模型。关键模型参数分析表明, 树脂的平衡吸附容量 N_0 约为 $8.73 \times 10^4 \mu\text{S}/\text{cm}$, 受进水条件影响不显著; 反应速率常数 K_a 与流速呈正相关, 证实了本实验条件下离子交换过程主要受液膜传质控制。模型验证结果表明, 其在单一稳定工况及模拟实际“泄漏-维修”波动工况下, 穿透时间预测相对误差均在 $\pm 5\%$ 以内。该模型可为凝结水精处理系统实现树脂工作状态实时评估与预判性运行提供有效的理论工具。

关键词: 固定床, 混床树脂, 离子交换, BDST预测模型

中图分类号: TM621 **文献标志码:** A

1 前言

电厂凝结水净化系统是防止热力设备腐蚀结垢的关键环节。值得注意的是, 国内很多大型火力发电厂分布于沿海地区, 处在海水资源丰富的环境中, 普遍采用海水直流冷却技术, 将海水作为电厂热力设备的冷却水使用^[1-3]。凝结水净化系统中的离子交换混床树脂虽能有效除盐, 但其有限的吸附容量在面对海水泄漏等突发性高盐负荷时, 存在迅速穿透失效的风险^[4-6]。目前, 工程中普遍依赖固定周期更换或出口水质超标报警, 这种滞后性的管理方法既可能造成树脂浪费, 又难以及时预警水质恶化导致的出水超标。因此, 实现对树脂失效周期的准确动态预测, 对于保障水质安全、优化运行成本具有重要意义。

固定床穿透模型是预测失效周期的理论基础, 但诸如Thomas、Yoon-Nelson等传统模型多适用于稳定工况, 难以描述电厂实际运行中负荷调整与泄漏维修引起的流量与电导率动态波动过程^[7-10]。BDST (Bed Depth Service Time) 模型因其参数物理意义明确、对动态吸附过程适应性强, 为本研究提供了建模基础^[11-12]。本研究旨在基于BDST模型, 构建一个能够适应进水条件动态变化、并可实时预测树脂剩余容量的失效周期预测模型。

本研究通过系统实验获取穿透数据, 深入分析模型参数与操作条件的关联机制, 最终构建并验证了一个高精度的动态预测模型, 为推动电厂水处理从“定期维护”向“状态预判”的转型提供了支持。

* 收稿日期: 2025-12-18

基金项目: 国家自然科学基金 (项目号 22376099)。

作者简介: 夏永生 (1980—), 高级工程师。

**通信作者: 周庆, E-mail: zhouqing@nju.edu.cn; 王钊, E-mail: njuwangzhao@163.com。

2 材料与方法

2.1 实验材料与仪器

实验采用美国杜邦公司耐高温型强酸性阳离子交换树脂 HPR650 H 与强碱性阴离子交换树脂 HPR550 OH, 按体积比 1:2 混合装填。2 种树脂的物化性质表征结果见表 1。

模拟海水根据标准海水离子组成^[13], 使用

NaCl、KCl、CaCl₂、MgSO₄ 及超纯水配制。上述试剂均为分析纯, 购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

本研究使用的仪器包括自动化中试树脂固定床实验装置 (如图 1 所示, 可实现流量、温度、电导率自动控制与数据采集)、梅特勒-托利多电导率仪 (S700+SD30)、蠕动泵、恒温循环水浴锅等。

表 1 树脂的物化性质表征。

Table 1 Physicochemical property characterization of resin.

树脂名称	质量强型基团交换容量 (mmol/g)	体积交换容量 (mmol/mL)
HPR550 OH	4.72	1.15
HPR650 H	5.30	2.14



图 1 自动化中试树脂固定床装置。

Figure 1 Automated pilot-scale resin fixed-bed device.

2.2 实验方法

2.2.1 小试规模穿透实验

将混合树脂 (HPR650 H 与 HPR550 OH 体积比为 1:2) 装填至固定床反应器内 (内径 26 mm, 树脂柱高 28.7 mm)。小试规模穿透实验共设置了 6 个进水电导率水平 (10、20、50、75、100、250 μS/cm) 和 5 个等效进水流速水平 (9、35、60、90、125 m/h) (注: 等效流速指单位床层截面积上的流速 u , $u=Q/A$, 其中 Q 为体积流量, A 为床层横截面积)。当出水电导率 >0.6 μS/cm 时, 即判定除盐树脂固定床反应器到达穿透点, 树脂固定床失效。小试实验数据用于 BDST 模型参数的拟合与分析。

2.2.2 BDST 模型参数的拟合与计算

BDST 模型描述了处理时间 t 与反应床中吸附剂的高度 Z 之间的关系, 其方程可以表示为:

$$t = \frac{N_0 Z}{C_0 F} - \frac{1}{K_a C_0} \ln \left(\frac{C_0}{C_t} - 1 \right) \quad (1)$$

式中: F 为流速, cm/min; N_0 为填料柱的吸附容量, mg/L; K_a 为吸附速率常数, L/(min·mg); t 为填料柱运行时间, min; Z 为填料柱中吸附剂的高度, cm; C_t 为吸附质的流出浓度, mg/L; C_0 为吸附质进口浓度, mg/L。 K_a 的值表征了从液相到固相的转移速率。在本实验涉及的低浓度范围内, 电导率与总溶解固体浓度可近似为线性关系, 因此在后续模型计算中, 溶液浓度 C (包括 C_t 和 C_0) 均以其对应浓度下的电导率替代。

2.2.3 中试规模验证实验

中试规模验证实验分为单一工况验证实验和复杂工况验证实验 2 部分。单一工况验证实验涵盖 4 个电导率水平 (10、50、75、100 μS/cm) 与 3 个进水流速水平 (30、70、150 m/h), 共 12 组。复杂工况验证实验共设置 4 个组别, 每组试验均包含 (1) 正常运行 (16 h, 低电导)、(2) 小泄漏 (2 h, 电导率阶跃升高)、(3) 维修 (2 h) 和 (4) 恢复 (4 h) 4 个假想工况, 并按照顺序 1-4 每日循环, 直至反应器被穿透。各阶段具体参数设计如表 2 所示。

3 结果与讨论

3.1 树脂失效周期预测模型验证

为充分评估除盐树脂固定床的除盐能力, 通过小试实验分析了除盐离子交换柱树脂的关键性能参数。

在不同进水电导率条件下, 穿透曲线均呈典

表2 中试运行参数设置。

Table 2 Parameter settings for pilot-scale operation.				
组别	顺序	进水流速 (m/h)	泄漏电导率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	运行时长 (h)
1	1	150	0.830	16
	2	150	13.182	2
	3	75	31.392	2
	4	75	0.830	4
2	1	150	0.862	16
	2	150	26.100	2
	3	75	74.112	2
	4	75	0.862	4
3	1	150	0.848	16
	2	150	11.589	2
	3	75	73.169	2
	4	75	0.848	4
4	1	150	0.847	16
	2	150	24.106	2
	3	75	33.797	2
	4	75	0.847	4

型的“S”型(图2),符合BDST穿透模型特征^[14]。根据出水电导率变化,可将除盐过程划分为工作段、上升段、饱和段3个阶段。在工作段内,除盐树脂固定床可以将进水有效处理至穿透阈值($0.6 \mu\text{S}/\text{cm}$)以下,且处理水量与进水电导率呈显著负相关,即进水电导率越高,有效处理时间越短。在上升段内,除盐穿透曲线呈现先快后慢的上升趋势,该段穿透曲线对应于树脂固定床内的工作层从开始到结束的过程。在饱和段内,出水电导率缓慢上升并接近进水电导率,表明除盐树脂固定床基本丧失净化能力,直至到达饱和终点(即出水电导率为进水电导率的99%)。

小试规模除盐穿透时间与进水流速 u 和进水电导率 C_0 的关系如图3所示,穿透时间与二者均呈显著负相关。当 C_0 从 $10 \mu\text{S}/\text{cm}$ 升至 $100 \mu\text{S}/\text{cm}$ 时,在 $u=125 \text{ m/h}$ 条件下,穿透时间从 56.5 h 急剧缩

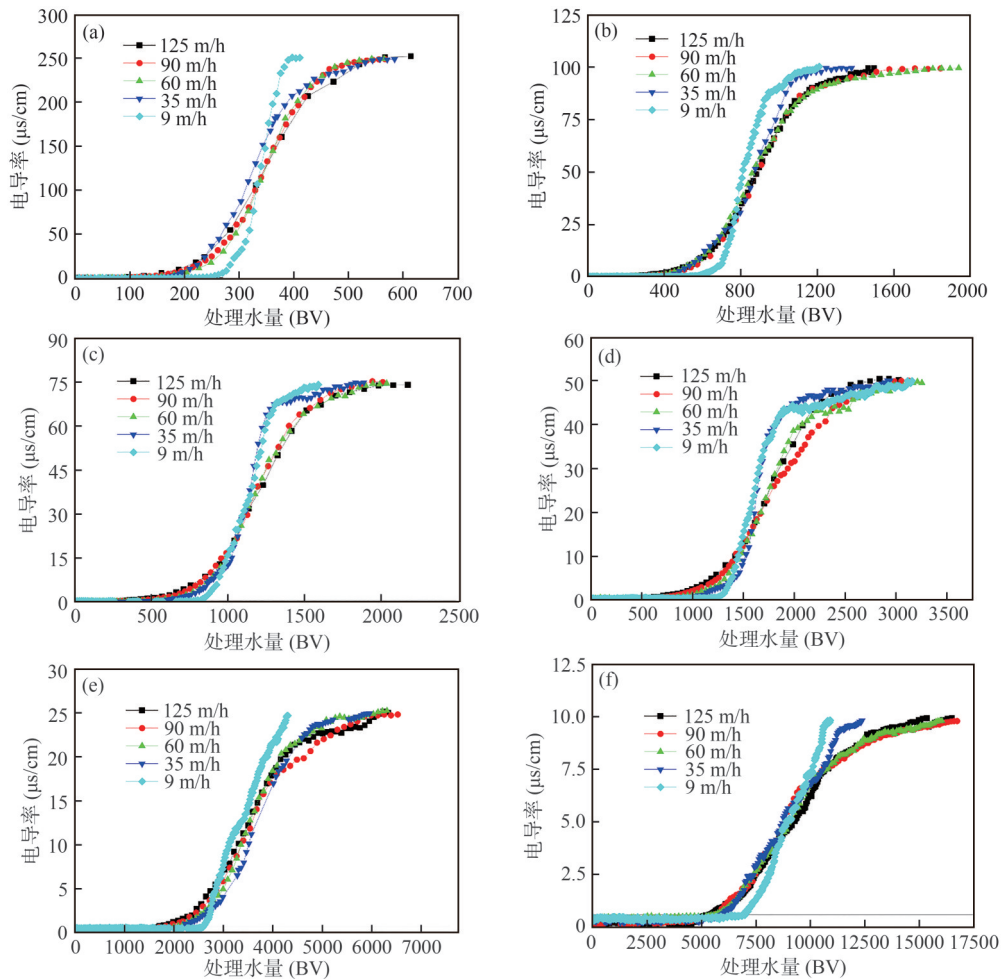


图2 不同进水电导率水平小试规模的除盐穿透曲线: (a) $250 \mu\text{S}/\text{cm}$; (b) $100 \mu\text{S}/\text{cm}$; (c) $75 \mu\text{S}/\text{cm}$; (d) $50 \mu\text{S}/\text{cm}$; (e) $25 \mu\text{S}/\text{cm}$; (f) $10 \mu\text{S}/\text{cm}$ 。

Figure 2 Desalination breakthrough curves at lab-scale with different feedwater conductivity levels: (a) $250 \mu\text{S}/\text{cm}$; (b) $100 \mu\text{S}/\text{cm}$; (c) $75 \mu\text{S}/\text{cm}$; (d) $50 \mu\text{S}/\text{cm}$; (e) $25 \mu\text{S}/\text{cm}$; (f) $10 \mu\text{S}/\text{cm}$ 。

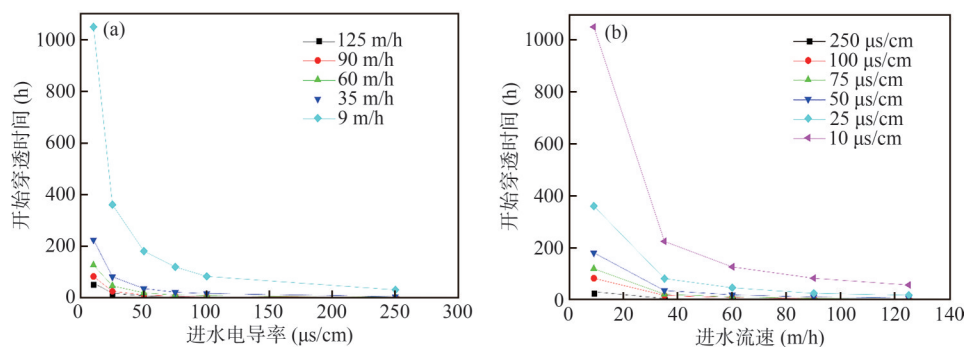


图3 小试规模除盐穿透时间与进水电导率 (a) 和进水流速 (b) 的关系。

Figure 3 Relationships between desalination breakthrough time and feedwater conductivity (a) as well as feedwater flow rate (b) at lab-scale.

短至 2.5 h; 保持 $C_0=50 \mu\text{S}/\text{cm}$, u 从 35 m/h 提升至 125 m/h 时, 穿透时间也从 35.5 h 缩短至 6.5 h。这种规律主要由两方面机制决定: (1) 传质推动力增大与树脂容量加速消耗, 更高的进水电导率意味着单位体积进水的离子负荷更大, 树脂交换位点更快饱和; (2) 传质效率下降与接触时间缩短, 更高的进水流速导致水在床层中的停留时间缩短, 离子与树脂颗粒的有效接触时间减少。

3.2 BDST 模型应用及分析

根据小试实验数据, 应用 BDST 固定床穿透模型, 可确定吸附容量 N_0 、反应速率常数 K_a 与进水浓度 C_0 、进水流速 u 的关系, 从而为构建准确的树脂失效周期预测模型提供依据。

3.2.1 吸附容量

吸附容量可以反映单位体积的阴、阳离子交换树脂混合体系对海水中盐分的处理能力, 是树脂体系的固有参数, 一般不随进水条件、运行条件、反应器条件的改变而改变。

如表 3 所示, 计算得到的吸附容量 N_0 值在 $(8.41\sim 9.18) \times 10^4 \mu\text{S}/\text{cm}$ 范围内波动, 平均值为 $8.73 \times 10^4 \mu\text{S}/\text{cm}$ 。根据吸附容量与进水电导率和进水流速的关系 (图 4) 可知, N_0 与 C_0 和 u 无显著相关性 ($p>0.05$)。这说明在实验涉及的浓度与流速范围内, N_0 主要由树脂本身的总交换容量和微观结构决定, 可作为模型的固有特性常数, 从而为模型简化提供了依据。

表3 小试规模除盐树脂吸附容量汇总。

Table 3 Summary of desalination resin adsorption capacity at lab-scale.

电导率/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	250	100	75	50	25	10
进水流速/ $(\text{m}\cdot\text{h}^{-1})$						
125	87450	87807	89087	88543	89842	91633
90	87047	88669	89036	91808	91416	91315
60	87149	90857	90498	90633	88999	89097
35	84117	85701	85793	84344	91510	86812
9	84218	85511	84409	85496	84045	85890

3.2.2 反应速率常数

树脂的反应速率常数描述了树脂在特定条件下对溶质进行吸附、解吸、扩散等过程的综合速率, 反映了树脂与溶质之间的相互作用及离子在固液两相间传输的效率。

如表 4 与图 5 所示, 与 N_0 不同, K_a 对操作条件具有明显依赖性。 K_a 与进水流速 u 呈显著正相关, 例如, 在 $C_0=100 \mu\text{S}/\text{cm}$ 时, 随着 u 从 35 m/h 增至 125 m/h, K_a 从 $4.74 \times 10^{-5} \mu^{-1}\cdot\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$ 增至

$12.18 \times 10^{-5} \mu\text{S}^{-1}\cdot\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。然而, C_0 对 K_a 的影响则可以忽略不计。这一现象表明, 在本研究的高温凝结水除盐体系中, 离子交换过程受液膜扩散 (外部传质) 控制。随着进水流速的增加, 离子在单位时间内更易达到树脂颗粒表面, 从而促进离子交换作用的发生并提高交换速率。如果吸附过程受到颗粒内传质控制, 较慢的流速将为吸附提供更长的停留时间, 床层处理能力也会更强, 颗粒内反应速率通常与停留时间的

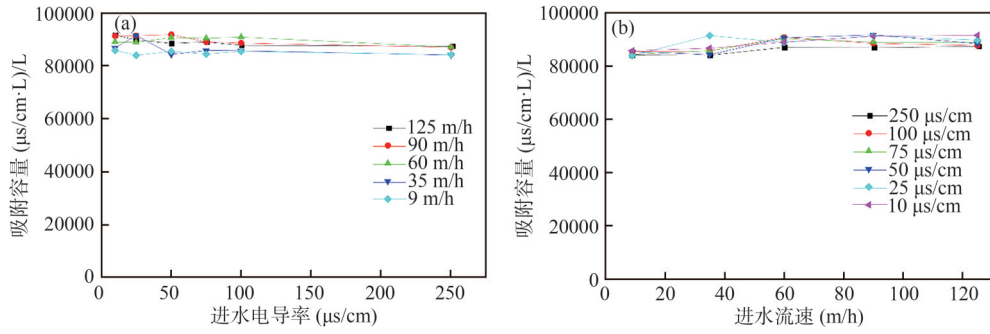


图4 吸附容量与进水电导率 (a) 和进水流速 (b) 的关系。

Figure 4 The relationships between adsorption capacity, feedwater conductivity (a) and feedwater flow rate (b).

表4 小试规模除盐树脂吸附容量汇总。

Table 4 Summary of reaction rate constants of desalination resin at lab-scale.

电导率/(μS·cm ⁻¹)	250	100	75	50	25	10
125	12.417	12.178	11.903	12.069	11.944	11.419
90	10.064	9.505	9.314	8.809	8.589	8.808
60	7.662	6.816	6.801	6.992	7.239	6.190
35	5.437	4.735	4.947	5.299	4.265	4.441
9	2.424	2.132	2.140	2.194	2.390	1.809

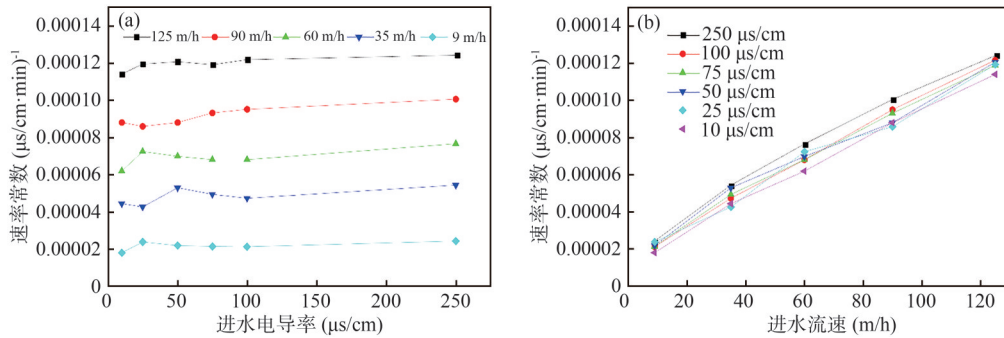


图5 反应速率常数与进水电导率 (a) 和进水流速 (b) 的关系。

Figure 5 The relationships between reaction rate constant, feedwater conductivity (a) and feedwater flow rate (b).

平方根相关；如果该过程受到外部传质控制，较高的流速可通过降低薄膜电阻，显著提升整体反应速率^[15,16]。

3.2.3 BDST模型的构建

(1) 吸附容量的计算与模拟。吸附容量 N_0 的计算采用对实验数据进行积分的方法，公式如下：

$$N_0 = \frac{Q}{V_{re}} \int_0^{t_s} (C_0 - C_t) dt \quad (2)$$

式中： N_0 为吸附容量（等效电导率表示），μS/cm； Q 为进水流量，m³/h； V_{re} 为树脂体积，L； t_s 为树脂饱和时间，h； C_0 为进水浓度（等效电导率表示），μS/cm； C_t 为出水浓度（等效电导

率表示），μS/cm。

在进行上述积分计算时，由于实验得到的是离散数据点，无法进行解析积分，因此采用数值积分。具体采用Newton-Cotes积分中的梯形积分公式。对于相邻2次数据采集所对应的点，连接这两点并分别向 t 轴作垂线，这3条线段与 t 轴共同围成的梯形面积便是该时间区间的积分近似值。将所有时间区间的积分相加，便可得到式(2)的积分值，进而求出 N_0 。

由于吸附容量的计算是依靠实验数据积分，在缺乏完整实验数据时，只能通过有限的数据进行拟合。依据现有实验数据，发现吸附容量随进水电导率与进水流速的变化并未呈现量级

上的变化,但存在一定波动。考虑到吸附容量是与树脂本身特性有关的物理量,取所有 N_0 的平均值作为其近似值,即 $N_0=8.73 \times 10^4 \mu\text{S}/\text{cm}$ 。

(2) 反应速率常数的计算与模拟。在获得 N_0 后,基于BDST模型推导反应速率常数 K_a 。 K_a 反映了离子从液相到固相的转移速率: K_a 值越大,体系的工作层高度越小; K_a 值越小,则需更长的树脂床层以避免树脂床被过早穿透。基于BDST模型,反应速率常数 K_a 可表示为:

$$K_a = \frac{\ln(C_0/C_t - 1)}{N_0 Z/u - C_0 \cdot t} \quad (3)$$

式中: K_a 为反应速率常数, $\mu\text{S} \cdot \text{l} \cdot \text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$; Z 为树脂柱高, cm 。在实际计算中,取饱和电导率 $C_t=0.99C_0$,对应的时间 t 为树脂饱和时间。

在计算反应速率常数的过程中,由于饱和时间 t 随着进水参数的改变而变化,因此需要对其进行数学处理以消除不确定性。

实验数据表明, $C_0 \cdot t$ 与进水流速 u 呈负相关。因此,建立 $C_0 \cdot t$ 与 u 之间的经验关系式,再通过幂函数优化得到二者的定量关系。在定量关系得出后,便可以将 t 进行代换。与饱和时间 t 对应的,饱和电导率 $C_t=0.99C_0$,则 $C_0/C_t-1=1/99$,为确定值。

经过上述数学处理, K_a 可由以下公式进行模拟:

$$K_a = \frac{\ln(1/99)}{N_0 Z/u - \beta / (u_{eq}/\gamma)^\alpha} \quad (4)$$

式中: u_{eq} 为等效进水流速, m/h ; α 为流速

补偿指数常数; β 为流速补偿常数; γ 为流速分数常数。 α 、 β 和 γ 均为根据小试实验结果拟合得到的常数,其值分别为 $\alpha=0.77621$ 、 $\beta=3930476$ 、 $\gamma=28$ 。

(3) 穿透时间的预测。在获得吸附容量 N_0 和反应速率常数 K_a 的模拟结果后,便可将穿透点对应的相关参数代入BDST模型,进行穿透时间 t_c 的预测。

在除盐工况中,对于给定的进水条件(C_0 、 u),考虑以下2种情况:①若 $C_0 > 0.6 \mu\text{S}/\text{cm}$,则认为进水受污染、含盐量高,此时穿透点出水电导率取 $C_p=0.6 \mu\text{S}/\text{cm}$,得到当前进水条件下穿透时间 t_c 的预测值;②若 $C_0 \leq 0.6 \mu\text{S}/\text{cm}$,则认为进水未受污染,此时穿透点出水电导率取 $C_p=0.99C_0$,得到当前进水条件下穿透时间 t_c 的预测值。

3.3 中试规模除盐树脂固定床失效周期验证实验

根据小试实验测得的基础数据,并结合BDST模型中分析得到的吸附容量、反应速率常数与进水电导率、进水流速之间的关系,确定了适用于该特征高径比反应器的BDST预测模型。随后,在保持树脂类型、装填比例一致的前提下,在更大规模的固定床装置(中试规模,内径265 mm,树脂床高292.9 mm)中进行了穿透实验及模型预测验证。

3.3.1 单一工况下除盐树脂固定床的失效周期准确度

基于中试除盐工况的实验数据,利用失效周期预测模型得到了12种工况的穿透时间预测值

表5 单一工况下中试规模预测穿透时间。

Table 5 Predicted breakthrough time of pilot-scale under a single operating condition.

电导率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	进水流速 (m/h)	实际穿透时间 (h)	预测穿透时间 (h)	绝对误差 (h)	相对误差 (%)
100	150	2.7	2.6	-0.1	-3.65
	70	8.8	8.4	-0.4	-4.29
	30	15.6	15.2	-0.4	-2.63
75	150	3.6	3.6	0.1	1.61
	70	11.0	11.0	0.0	0.05
	30	21.8	21.6	-0.2	-0.83
50	150	7.0	6.8	-0.2	-2.16
	70	18.7	18.5	-0.2	-0.81
	30	37.4	37.0	-0.4	-1.05
10	150	56.9	55.7	-1.2	-2.17
	70	136.5	131.7	-4.8	-3.50
	30	222.0	224.0	2.1	0.93

(表5)。各工况预测时间的相对误差为-4.29%~1.61%，预测预测±5%以内。总体来看，该预测模型可以准确地预测中试规模的除盐树脂失效周期，进一步验证了其机理模块的可靠性。

3.3.2 复杂工况下除盐树脂固定床的失效周期准确度

基于复杂工况除盐失效周期实验，利用失

效周期预测模型获得了4种工况的穿透时间预测值(表6)。所有工况下，预测穿透时间与实际穿透时间处于同一循环周期内，各实验组预测值的相对误差为-1.46%~1.44%，均在±2%以内。总体来看，该预测模型可以准确地预测复杂工况的除盐树脂失效周期，验证了其应用模块的可靠性。

表6 复杂工况下中试规模预测穿透时间。

Table 6 Predicted breakthrough time of pilot-scale under complex operating conditions.

复杂工况组别	实际穿透时间 (h)	预测穿透时间 (h)	绝对误差 (h)	相对误差 (%)
泄漏流量1	187.5	184.8	-2.7	-1.46
泄漏流量2	66.5	67.5	1.0	1.44
泄漏流量3	90.5	90.4	-0.1	-0.09
泄漏流量4	137.0	136.3	-0.7	-0.51

4 结 论

(1) 树脂固定床的除盐穿透曲线呈“S”型，符合BDST模型特征。反应器树脂的穿透时间、穿透处理水量与进水电导率、进水流速均呈显著负相关。

(2) 基于BDST模型分析表明，吸附容量 N_0 与进水浓度 C_0 、进水流速 u 均无显著相关性($p > 0.05$)，说明 N_0 主要取决于树脂本身的离子交换能力，可作为模型的固有特性常数。反应速率常数 K_a 与进水流速 u 呈正相关，这意味着离子交换过程受液膜扩散控制，高流速下树脂的吸附速率提高。

(3) 利用树脂失效周期预测模型对中试规模反应器中的树脂寿命进行预测，结果显示，该模型对单一稳定工况及模拟实际“泄漏-维修”波动工况的穿透时间预测误差均在±5%以内。整体来说，树脂失效周期预测模型表现出较高的准确性和可靠性，满足现阶段应用需求。然而，实际电厂进水波动可能更为复杂，如存在随机性波动、多离子共存竞争吸附等。因此，后续研究可进一步拓展至多离子竞争吸附模型，考虑随机波动输入下的动态响应，并探索机器学习等智能算法与BDST模型的融合，以实现模型参数的自适应优化，从而提高模型在真实复杂运行环境中的鲁棒性与预测精度。

参考文献

- 1 满曰南, 王晓娟, 王银涛, 等. 海水淡化技术研究新进展和发展趋势[J]. 工业水处理, 2014, 34(11): 8-12.
- 2 张海春, 范会生, 陆阿定. 新能源海水淡化技术应用进展及其在舟山的现状分析[J]. 水处理技术, 2010, 36(10): 23 - 27.
- 3 李亚红. 我国海水冷却技术的应用现状及发展应对策略[J]. 应用化工, 2017, 46(12): 2431-2434, 2440.
- 4 赵显国, 孙振平, 刘伟. 核电厂凝汽器泄漏监测系统问题研究及改进应用[J]. 电站辅机, 2022, 43(3): 38 - 42.
- 5 谷慧, 荣华, 李吉娃, 等. 核电厂海工构筑物氯盐腐蚀耐久性监测研究综述[J]. 工业建筑, 2022, 52(10): 16-21, 15.
- 6 张振宇, 王今芳, 张毅, 等. 方家山核电机组凝汽器检漏装置技改优化[J]. 中国核电, 2022, 15(4): 542-549.
- 7 王鑫. 海藻酸钠复合吸附剂吸附垃圾渗滤液中重金属离子性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.
- 8 Moscatello N, Swayambhu G, Jones C H, et al. Continuous removal of copper, magnesium, and nickel from industrial wastewater utilizing the natural product yersiniabactin immobilized within a packed-bed column[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 343: 173-179.
- 9 Yuan C Y, Sun Y Z, Yang Y, et al. Performance and modelling of bromide dynamic adsorption onto D301 anion exchange resin[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2020, 20(6): 655-666.

- 10 Futralan C M, Kan C C, Dalida M L, et al. Fixed-bed column studies on the removal of copper using chitosan immobilized on bentonite[J]. *Carbohydrate Polymers*, **2011**, 83(2): 697-704.
- 11 丁思淳. 静态及动态环境下凹凸棒土对重金属的吸附性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, **2022**.
- 12 Bohart G S, Adams E Q. Some aspects of the behavior of charcoal with respect to chlorine[J]. *Journal of the American Chemical Society*, **1920**, 42: 523-544.
- 13 Gros N, Camoes M F, Oliveira C, et al. Ionic composition of seawaters and derived saline solutions determined by ion chromatography and its relation to other water quality parameters[J]. *Journal of Chromatography A*, **2008**, 1210(1): 92-98.
- 14 Maiti S K, Bera D, Chattopadhyay P, et al. Determination of kinetic parameters in the biosorption of Cr(VI) on immobilized *Bacillus cereus* M161 in a continuous packed bed column reactor[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, **2009**, 159(2): 488-504.
- 15 Ko D C K, Porter J F, McKay G. Optimised correlations for the fixed-bed adsorption of metal ions on bone char[J]. *Chemical Engineering Science*, **2000**, 55(23): 5819-5829.
- 16 Chittoo B S, Sutherland C. Column breakthrough studies for the removal and recovery of phosphate by lime-iron sludge: Modeling and optimization using artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **2020**, 28(7): 1847-1859.

Research paper

Prediction of Resin Failure Cycle and Dynamic Operation Analysis of Fixed-Bed Reactor Based on BDST Model

XIA Yong-sheng¹, ZHANG Zi-ang², WANG Zhao^{3*}, GUO Jin-han³, ZHANG Juan-juan³, WANG Xing-yu², SHUANG Chen-dong², ZHOU Qing^{2*}

(¹Lianyungang Comprehensive Inspection and Testing Center for Quality and Technology, Lianyungang, 222000, China; ²School of the Environment, Nanjing University, Nanjing, 210023, China; ³Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan, 430064, China)

Abstract To achieve accurate prediction of the service life of ion-exchange resins in power plant condensate polishing systems under dynamically fluctuating influent water quality, this study investigated the influence of influent conductivity and flow rate on the desalination process of strong-acid strong-base mixed-bed resins through fixed-bed dynamic experiments. A BDST predictive model suitable for dynamic operating conditions was developed. Analysis of key model parameters revealed that the equilibrium adsorption capacity (N_0) of the resin was approximately $8.73 \times 10^4 \mu\text{S}/\text{cm}$, which was not significantly affected by the influent conditions. In contrast, the mass transfer rate constant (K_a) showed a positive correlation with flow rate, confirming that the ion-exchange process in this experimental system was primarily controlled by liquid-film mass transfer. The model was validated, showing prediction errors for breakthrough time of less than 5% for both single steady-state conditions and simulated actual “leakage-repair” fluctuating conditions. This model provides an effective theoretical tool for the real-time assessment of resin working status and predictive operation in condensate polishing systems.

Keywords Fixed-bed, Mixed-bed resin, Ion-exchange, BDST predictive model

* **Corresponding author:** ZHOU Qing, E-mail: zhouqing@nju.edu.cn; WANG Zhao, E-mail: njuwangzhao@163.com.