

国内外核电凝结水精处理树脂应用性能评估

陈官权¹, 李显锋¹, 屈勇军¹, 任力¹, 耿忠林¹, 李华升², 汪鹏¹

¹国电投核安科技(重庆)有限公司, 重庆

²国核铀业发展有限责任公司, 北京

收稿日期: 2025年9月16日; 录用日期: 2025年10月9日; 发布日期: 2025年10月15日

摘要

国内核电站凝结水精处理系统所用的树脂几乎为进口品牌, 国产品牌树脂的应用案例非常的少。核电站在选定树脂时, 不仅从静态性能指标上有着严格的要求, 而且实际使用业绩所反映出的良好应用性能也是关键的衡量因素。因此本文通过模拟核电凝结水精处理系统搭建小型试验平台, 验证新型国产树脂的实际应用性能, 并与进口树脂进行对比, 为其工程应用提供数据支撑。

关键词

凝结水精处理, 离子交换, 树脂, 核电厂

Performance Assessment of Resins for Nuclear Condensate Polishing: Domestic and International Comparison

Guanquan Chen¹, Xianfeng Li¹, Yongjun Qu¹, Li Ren¹, Zhonglin Geng¹, Huashen Li², Peng Wang¹

¹SPIC He-An Technology (Chongqing) Co., Ltd., Chongqing

²State Nuclear Uranium Resource Development Company Ltd., Beijing

Received: September 16, 2025; accepted: October 9, 2025; published: October 15, 2025

Abstract

The resin used in the condensate polishing system of domestic nuclear power plants is almost imported, and there are very few application cases of domestic brand resin. When selecting resins for nuclear power plants, there are strict requirements not only in terms of static performance indicators, but also in terms of good application performance reflected by actual usage performance, which is a key measurement factor. Therefore, this article builds a small-scale experimental platform by

文章引用: 陈官权, 李显锋, 屈勇军, 任力, 耿忠林, 李华升, 汪鹏. 国内外核电凝结水精处理树脂应用性能评估[J]. 水污染及处理, 2025, 13(4): 119-126. DOI: 10.12677/wpt.2025.134015

simulating the nuclear power condensate polishing system to verify the practical application performance of the new domestic resin, and compares it with imported resin to provide data support for its engineering application.

Keywords

Condensate Polishing System, Ion Exchange, Resin, Nuclear Power Plant

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

核电站凝结水精处理系统是保证二回路水质安全的关键环节，其主要功能是通过离子交换树脂去除凝结水中的腐蚀产物(Fe^{3+} 等)和可溶性离子杂质(Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 等)。研究表明，这些杂质会导致蒸汽发生器传热管腐蚀速率提升，从而影响核电站的运行安全[1][2]。目前国内核电站几乎采用的是进口树脂(如美国陶氏、德国朗盛、英国漂莱特等)，年采购费用高达 2.3 亿元，存在显著的“卡脖子”风险。

尽管国内在核电树脂研发方面取得了一定进展，部分国产树脂的静态指标能够达到甚至优于进口树脂[3][4]，但国产树脂在核电凝结水精处理方面国产化应用仍存在阻力。现有的评估方法多采用静态试验来检测树脂的性能指标，但缺乏专业的性能验证平台，无法更好地模拟树脂在实际工况下的运行情况。

因此本文通过模拟核电站凝结水精处理系统搭建了小试验验证平台，通过模拟现场实际运行工况来验证新型凝结水精处理树脂的应用性能，选取电导、PH、Na、Si 的出水数据，对比了与进口树脂的性能差异。通过本平台试验，可填补国内凝结水精处理树脂动态性能验证的空白，为此类国产树脂的工程应用奠定基础。

2. 材料与方法

本文试验用的新型国产树脂为本公司生产的型号为 HATC-SC650CP 强酸性阳离子交换树脂及 HATC-SA550CP 强碱性阴离子交换树脂。选取的进口树脂为在国内核电站凝结水精处理系统具备一定应用业绩的品牌型号。为了更好的反应树脂的实际应用性能，首先按照离子交换树脂性能检测标准如 GB/T 8144-20008、DL/T 519-2014、GB/T 8331-2008、GB/T 5728-2023、GB/T 5759-2020 等对新型树脂及进口树脂进行了基础的理化性质检测，结果如下表 1 所示。

Table 1. Basic performance indicators
表 1. 基础性能指标

指标	单位	阳树脂		阴树脂	
		HATC-SC650CP	A	HATC-SA550CP	B
体积交换容量	mmol/L	2.16	1.96	1.17	1.14
均一系数	-	1.08	1.10	1.08	1.08
渗磨圆球率	%	99.21	97.66	99.80	90.09
平均压碎度	g/粒	1276	1048	867	870

续表

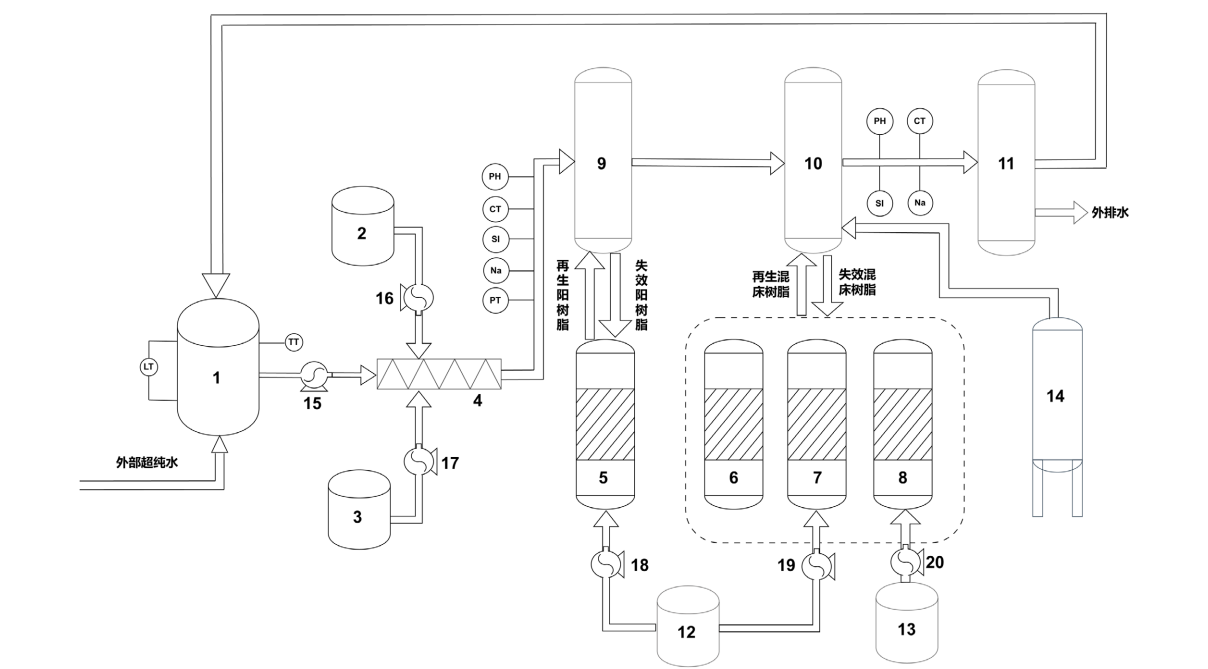
≤200 g/球的颗粒占比	%	0	0.1	0	0
湿视密度	g/ml	0.80	0.79	0.69	0.70
湿真密度	g/ml	1.226	1.22	1.068	1.08
含水量	%	46.96	50.8	58.47	55.67
有效粒径	mm	0.59	0.586	0.52	0.599

注：进口阳树脂 A，进口阴树脂 B。

3. 试验介绍

3.1. 试验平台结构

小试验证平台装置的设计参照核电厂凝结水精处理系统配置，通过模拟核电厂凝结水相同的离子种类、胺环境、pH 条件等进行试验，来验证树脂是否满足核电厂凝结水精处理系统出水水质要求，平台示意图如图 1 所示。



1: 原水罐; 2: 浓药罐 A; 3: 浓药罐 B; 4: 管道混合器; 5: 前置阳床再生床; 6: 分离床; 7: 混床阳再生床; 8: 混床阴再生床; 9: 前置阳床; 10: 高速混床; 11: 保护床; 12: 酸再生液储罐; 13: 碱再生液储罐; 14: 氮气; 15: 原水泵; 16/17: 浓药泵 A/B; 18/19: 酸再生泵; 20: 碱再生泵; PH: PH 计; CT: 电导率仪; Si: 硅表; Na: 钠表; PT: 压力表; LT: 液位计; TT: 温度计。

Figure 1. Schematic diagram of the small-scale testing platform process

图 1. 小试平台流程示意图

3.1.1. 主系统

设置前置阳床、高速混床、保护床及原水泵。床体采用 304 不锈钢，直径为 250 mm，直段高度为 1700 mm。床体上下配备进出水水帽，进水水帽间隙 0.35~0.4 mm，出水水帽间隙 0.25 mm。床体上、中、下段配备视镜，可观察床体内树脂情况。前置阳床装填 64 L 氢型阳离子交换树脂，混床装填 40 L 氢氧型

阴树脂和 20 L 阳树脂。保护床装填 60 L 抛光树脂, 主要功能是防止混床出水装置在发生碎树脂漏出或漏树脂事故时, 树脂能够被保护床所截留, 确保经处理的出水不含杂质。

3.1.2. 配水系统

该系统包含浓药箱 A (硅酸钠和浓氨水溶液)、浓药箱 B (盐酸和硫酸铁溶液)、原水罐、浓药泵 A、浓药泵 B 以及管道混合器。原水罐容积为 500 L, 材质为不锈钢, 浓药箱容积为 100 L, 材质为玻璃钢。

3.1.3. 再生系统

本装置设置了体外再生系统, 可模拟现场树脂再生过程。包含了四个床体, 分别为前置阳床再生床、混床分离床、混床阳再生床、混床阴再生床、酸再生液储罐、碱再生液储罐、再生液泵。其中前置阳床再生床、分离床直径为 300 mm, 直段高度为 1700 mm, 混床阴再生床及混床阳再生床直径为 250 mm, 直段高度为 1700。该系统床体均采用亚克力材质, 进出水水帽间隙与主系统一致。树脂再生利用 30% 的盐酸以及 30% 的氢氧化钠溶液稀释至所需浓度作为再生液[5]。

3.1.4. 控制及仪表系统

采用独立的非冗余 PLC 系统, 使用 HMI 界面实施控制操作和显示, 可利用控制系统对平台的阀门、泵进行启停, 具备全自动运行控制的要求。平台设置了包括硅表、钠表、PH 计、电导率仪等在线监测仪表, 能够就地显示, 也能在 HMI 界面进行在线显示及记录。

3.2. 工艺流程

原水罐中的超纯水通过原水泵(流量稳定在 5.45 m³/h)输送至管道混合器, 浓药泵 A 和 B 将浓药罐中的药剂同样输送至管道混合器, 超纯水和浓药在管道混合器内充分混合达到试验所需的水质后依次进入前置阳床、高速混床、保护床。原水在前置阳床内经阳树脂的吸附作用去除水中含有的绝大部分阳离子, 残留的阳离子、阴离子在高速混床内被树脂吸附去除, 确保出水水质指标满足表 2 要求。

当出水水质不满足表 2 中的要求时, 可判定为树脂失效。前置阳床失效树脂通过水力输送至阳再生床, 混床树脂先输送至分离床进行分离, 后分别输送至混床阳再生床和混床阴再生床进行再生。再生时利用再生液泵将酸、碱分别输送至对应的再生床。酸碱再生后, 用超纯水冲去再生液, 并输送回前置阳床和混床。混床利用氮气进行阴、阳树脂的混合, 再利用上部进水压实, 使其均匀分布于混床内。后可进行第后续周期的运行。

3.3. 进出水要求

本试验在指标选取和设定方面参照了某核电站凝结水精处理系统进水水质的要求。在试验中为了更好的验证离子交换树脂的性能, 并且为了更好的对进水所需水质进行配比, 提高了部分指标参数, 具体如下表所示:

Table 2. Inlet water index range
表 2. 进水指标范围

指标	单位	进水指标范围
Na ⁺	μg/L	15.18~16.70
电导率(25℃)	μS/cm	18~22
总硅(以 SiO ₂ 计)	μg/L	25.8~28.4
PH	/	9.5~9.7

将硅酸钠和浓氨水配比好后加入到浓药箱 A 中，将质量分数为 36%的盐酸和硫酸铁同样配比好后加入到浓药箱 B 中。调整原水泵以及浓药泵 A 和 B，使超纯水和药剂在管道混合器内均匀混合，确保进水的离子浓度在表 1 范围内。

本试验的出水离子浓度要求同样参照了某核电对于凝结水精处理系统的出水水质要求，具体如下表 3 所示。

Table 3. Outlet water requirements for mixed bed
表 3. 混床出水指标要求

指标	单位	出水指标要求范围
Na ⁺	μg/L	≤0.05
电导率(25℃)	μS/cm	≤0.06
总硅(以 SiO ₂ 计)	μg/L	≤2.0
PH	/	6.9~7.1

4. 试验结果及讨论

4.1. 试验出水情况

根据试验流程，开启小试验验证平台各管路的阀门，调整原水泵至流量为 5.45 m³/h，调整加药泵等对应参数。进口树脂和国产树脂分别运行四个周期，对每个周期的进水指标先进行检测可知，各周期各指标均能满足表 2 要求。

试验过程中，前置阳床失效后继续运行至混床失效，在进水 PH 为 9.5~9.7 区间内[6]，出水 PH 能够稳定在 7 左右。混床出水各数据的检测过程是连续在线监测，各出水指标数据为试验出水稳定后计算的平均值。

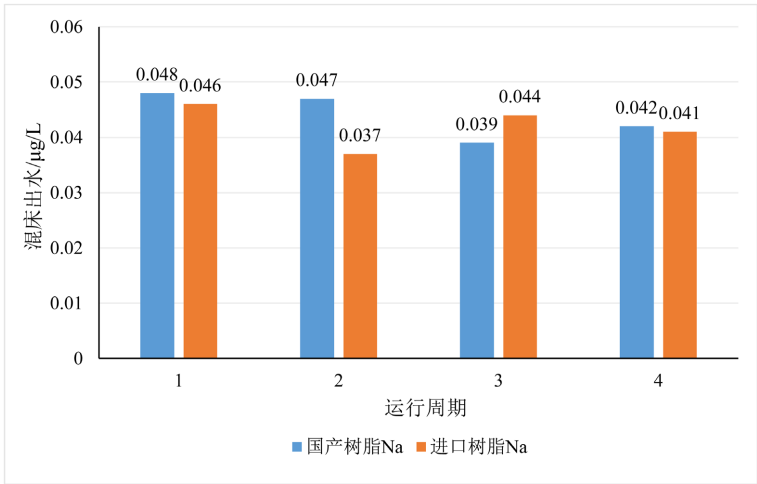


Figure 2. Comparison of Na⁺ concentration in mixed bed outlet
图 2. 混床出水 Na⁺离子浓度对比

从图 2 可以看出，不论是进口树脂还是国产树脂，各周期的混床出口的 Na⁺离子浓度均能控制在 0.05 μg/L 以下，能够满足表 3 出水水质要求。国产树脂在前两个周期对于 Na⁺的吸附效率较为稳定，没有太

大的变化,到第三个周期出水 Na^+ 离子浓度达到了 $0.039 \mu\text{g/L}$,为四个周期中 Na^+ 离子吸附效率最高的一个周期。第四周期略微有些上升。对于进口树脂而言,每个周期的处理效率存在波动。这可能是因为在试验再生的过程中,存在无法完全分离阴、阳树脂的情况,致使再生过程中阴树脂内混有少量阳树脂,阳树脂变为钠型树脂混在阴树脂中,而后钠离子释放到水中导致[7]。在国际主流树脂(如 Amberjet 1200H)在类似 PH (9.5~9.7)条件下, Na^+ 出水浓度通常 $\leq 0.1 \mu\text{g/L}$,而此国产树脂已达到了 Na^+ 出水 $\leq 0.05 \mu\text{g/L}$ 的水平[8]。

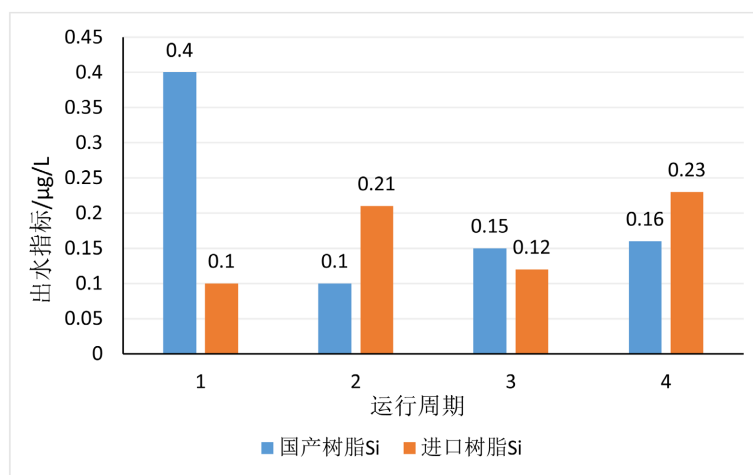


Figure 3. Comparison of SiO_2 concentration in mixed bed outlet

图 3. 混床出水 SiO_2 浓度对比

进水的 PH 在 9.5~9.7 之间,因此溶液中的硅主要是以 HSiO_3^- 型式存在[8],其次为 SiO_3^{2-} 。从图 3 可以看出,国产和进口树脂混床出口 Si 离子(以 SiO_2 计)浓度均小于 $0.5 \mu\text{g/L}$,能够满足表 3 出水小于等于 $2 \mu\text{g/L}$ 的要求。国产树脂第一周期试验时,混床出水中 Si 离子浓度达到了 $0.4 \mu\text{g/L}$,为四个试验周期中最高的,这可能是因为新树脂活化不完全导致初期交换容量没有完全发挥,第二个周期经再生后,出水达到最低的 $0.1 \mu\text{g/L}$,而后呈轻微上升趋势。进口树脂在第一和第三周期处理效率较为接近,出水在 $0.1 \mu\text{g/L}$ 左右,而第二和第四周期的处理效率相近,在 $0.2 \mu\text{g/L}$ 左右。

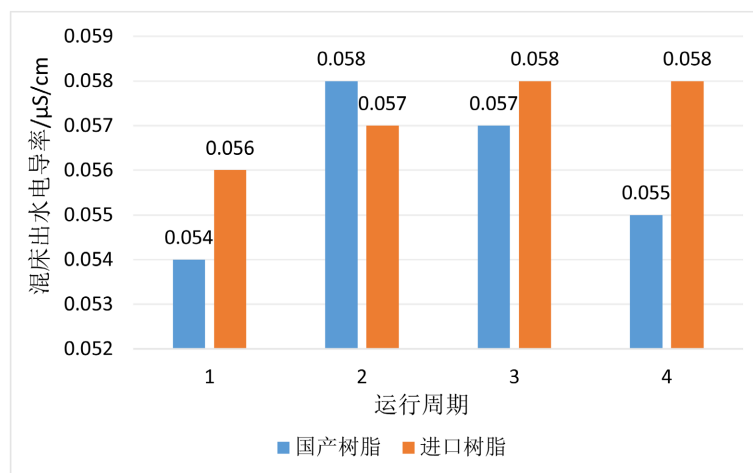


Figure 4. Comparison of conductivity of outlet water from mixed bed

图 4. 混床出水电导率对比

从图 4 可以看出，国产树脂和进口树脂混床出水的电导率均能够达到 0.06 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下，满足表 3 出水要求。图中国产树脂第一个周期出水电导率最低为 0.054 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，而后第二个周期到第四个周期持续从 0.058 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 降低到 0.055 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。而进口树脂的混床出口电导率从 0.056 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 逐步升高至 0.058 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。出水电导率是反应离子交换树脂性能和水质纯度的关键指标。对于核电凝结水精处理系统而言，混床出口电导率 0.001 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 量级的变化，也会影响混床出口特定离子的检测结果。本文仅对 Na^+ 和 Si 的出水指标进行了检测，因此电导率结果不能完全由 Na^+ 和 Si 的出水数据所映射。由于核电技术发展越来越快，对水汽的要求也越来越高，三代核电 AP1000 对于凝结水精处理出水电导率(25℃)的要求为 <0.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ [9]。

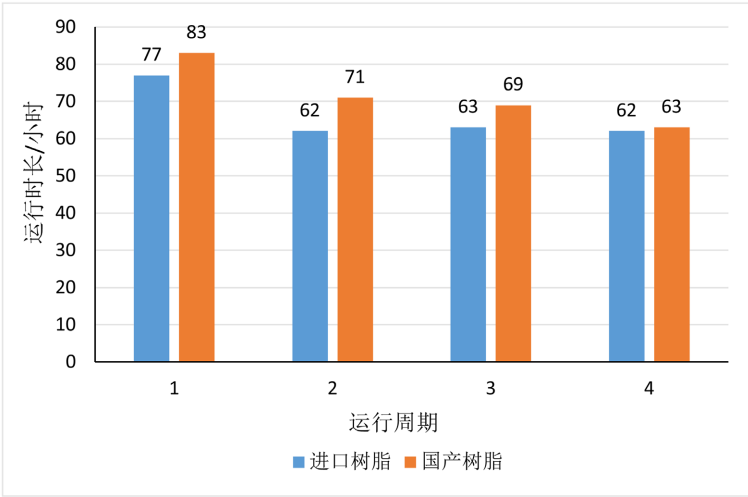


Figure 5. Comparison of running time
图 5. 运行时长对比

从图 5 中可以看出，每一个周期国产树脂的运行时长相较进口树脂都久一些，但是进口树脂的衰减速率在第二个周期以后趋于平缓，国产树脂运行时长衰减速率相对快一些，但在第四个周期时整体运行时长和进口树脂相接近。国产树脂从最初的运行周期来看，时间更久，处理水量更大。

4.2. OSA 疲劳试验

为了考察现场运行中高频率再生、输送中树脂间、树脂与管道摩擦、碰撞，而可能造成的树脂性能损失，可以利用自控程序依次实现树脂“再生”、“水洗”、“盐污染”等环节，高效、高频率地模拟现场再生过程，该过程称为 OSA 性能评价。实验分别设置 200、400 周期再生处理后，对树脂进行镜检计算破损率，从而判定树脂的性能所示。其结果如下表 4 所示：

Table 4. Resin breakage rate in OSA cycle test
表 4. OSA 周期试验树脂破损率

周期	阳树脂		阴树脂	
	HATC-SC650CP	A	HATC-SA550CP	B
200	0.55%	0.63%	0.51%	0.66%
400	0.84%	2.24%	0.51%	0.7%

注：进口阳树脂 A，进口阴树脂 B。

从上表可以看出, 国产阳树脂在 200-400 周期内破损率(0.55%→0.84%)增长平缓, 而进口阳树脂破损率从 0.63%骤升至 2.24%, 表明其机械强度可能随周期延长显著下降, 尤其在高压或频繁再生条件下更易碎裂。国产树脂(尤其阳树脂)在高周期(400 次)下破损率仍低于 1%, 显示其对长周期运行的适应性较强; 进口阳树脂破损率激增, 可能因材料耐疲劳性不足, 导致后期效率下降。阴树脂方面, 国产树脂破损率稳定(0.51%), 进口树脂虽略高但增幅较小(0.66%→0.7%), 说明阴树脂整体机械稳定性优于阳树脂, 且国产阴树脂表现更优。树脂破损率升高会导致交换容量下降和颗粒泄漏风险。进口阳树脂的高破损率需更频繁更换, 间接影响产水效率; 而国产树脂稳定性更高, 有利于维持稳定的水质, 且长周期的运行过程中更具稳定性。

5. 结论与展望

针对新型的凝结水精处理国产树脂和进口树脂的对比试验结果表明, 国产树脂处理后的水中 Na^+ 、 Si (以 SiO_2 计)、 PH 、电导率均能够达到核电站凝结水精处理系统的出水水质要求。在整体的离子去除效率上能够达到进口树脂的水平, 且具有更好的抗压强度。从多周期来看, 同样具备稳定的处理能力。除此之外, 核电站对于凝结水精处理系统出水中其他指标也同样有一定的关注, 总体出水电导率达标同时, 也需要进一步对例如 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等腐蚀性离子进行试验, 从而更为全面地反应新型国产树脂的性能。

基金项目

核电厂凝结水精处理用离子交换树脂国产化应用研究(169001JX0120240062)。

参考文献

- [1] 叶衫, 闫国栋, 林金怡. 核电站二回路热力系统腐蚀控制研究[C]//山东核科学与技术——山东省核学会 2022 年论文汇编(上). 福清: 国核(福建)核电有限公司, 2022: 141-145.
- [2] 郑彬, 柏乐, 卢盖. 压水堆核电站二回路硫酸根来源与处理研究[J]. 产业与科技论坛, 2018, 17(4): 53-55.
- [3] 陈官权, 李显锋, 邵新生. 国内外核电站凝结水精处理树脂差异分析研究[J]. 材料化学前沿, 2025, 13(1): 16-20.
- [4] 徐斌, 修慧敏. 国产凝结水精处理用均粒树脂的研究[C]//电厂化学 2009 年学会暨中国电厂化学网高峰论坛论文集, 武汉: 中国电机工程学会, 2009: 431-437.
- [5] 盛春. 核电站凝结水精处理系统存在的问题及对策探讨[J]. 产业与科技论坛, 2017, 16(22): 64-65.
- [6] 昌桐, 刘慧宇, 郑文君. 核电厂二回路系统水化学控制优化[J]. 科技视界, 2020(24): 16-17.
- [7] 石磊. 凝结水精处理系统混床再生后出水钠离子含量高的原因分析[J]. 科技视界, 2019(2): 223-226.
- [8] Sik Ali, M.B., Hamrouni, B., Bouguecha, S. and Dhahbi, M. (2004) Silica Removal Using Ion-Exchange Resins. *Desalination*, **167**, 273-279. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.136>
- [9] 马现奇, 刘加和. 核电厂凝结水精处理用离子交换树脂的研究进展[J]. 电力与能源, 2017, 38(4): 478-482.