

熊扣红, 沈恩伟, 丁振杰, 等. 组合膜工艺在核电厂放射性废水处理中的应用[J]. 净水技术, 2026, 45(2): 144-151, 224.

Xiong K H, Shen E W, Ding Z J, et al. Application of combined membrane process in radioactive wastewater treatment in nuclear power plants[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(2): 144-151, 224.

组合膜工艺在核电厂放射性废水处理中的应用

熊扣红¹, 沈恩伟¹, 丁振杰^{2,*}, 顾跃雷², 林 兴²

(1. 核电运行研究<上海>有限公司, 上海 200100; 2. 核工业第八研究所, 上海 201800)

摘要 【目的】多年来,核电厂放射性废水处理主要依赖化学沉淀法、离子交换法、蒸发浓缩法等传统工艺,这些方法普遍存在流程复杂,处理精度有限,易产生二次污染等问题,难以满足日益严格的绿色排放要求。【方法】因此,本文介绍了一种利用膜分离技术处理核电厂低放射性废水的有效方法,该方法通过超滤-纳滤-反渗透-吸附的组合膜工艺,达到综合处理的目的。本文使用某核电厂的真实放射性废水,研究了在不同 pH 条件下,该组合膜工艺对关键放射性核素的去除效果、总 γ 比活度的降低情况以及对硼酸的分离性能。【结果】经处理后的放射性废水中以非离子态存在的放射性核素去除率大于 80%,其中,经超滤装置(预处理单元)处理后未检出¹¹⁰Ag⁺;经纳滤装置(主处理单元)处理后,⁵⁸Co²⁺、⁶⁰Co²⁺、¹²⁵Sb³⁺和¹²⁴Sb³⁺被完全去除;经反渗透装置(精处理单元)处理后,⁵⁴Mn²⁺被完全去除;经铯吸附装置(后处理单元)处理后无法检出¹³⁷Cs⁺,系统总净化系数超过 1×10^6 。【结论】基于超滤-纳滤-反渗透-吸附的组合膜工艺及其集成装置对放射性废水中核素的处理效果优异,可以为核电厂相似废水的处置提供可靠的应用方案。此外,该装置不仅能够有效去除包括¹³⁷Cs⁺在内的多种放射性核素,使最终出水满足排放要求,还展现出从废水中资源化回收硼酸的潜力。

关键词 放射性废水 组合膜工艺 超滤(UF) 纳滤(NF) 反渗透(RO)

中图分类号: X771 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)02-0144-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.02.015

Application of Combined Membrane Process in Radioactive Wastewater Treatment in Nuclear Power Plants

Xiong Kouhong¹, Shen Enwei¹, Ding Zhenjie^{2,*}, Gu Yuelei², Lin Xing²

(1. Nuclear Power Operations Research Institute, Shanghai 200100, China;

2. Eighth Research Institute of Nuclear Industry, Shanghai 201800, China)

Abstract [Objective] Over the years, the treatment of radioactive wastewater from nuclear power plants has primarily relied on traditional processes such as chemical precipitation, ion exchange, and evaporation concentration. These methods generally have problems including complex processes, limited treatment accuracy, and a high tendency to cause secondary pollution, making it difficult to meet the increasingly stringent green discharge requirements. [Methods] Therefore, this paper introduced an effective method for treating low-level radioactive wastewater from nuclear power plants using membrane separation technology. This method achieved comprehensive treatment through the combination of ultrafiltration, nanofiltration, reverse osmosis, adsorption, and other components. This paper utilized actual radioactive wastewater from a nuclear power plant to investigate the removal efficiency of key radionuclides, the reduction of total γ specific activity, and the separation performance of boric acid by this combined membrane process under different pH conditions. [Results] The removal rate of radionuclides existing in non-ionic form in the treated radioactive wastewater was over 80%. Among them, ¹¹⁰Ag⁺ was not detected after treatment by the ultrafiltration unit (pretreatment unit); ⁵⁸Co²⁺, ⁶⁰Co²⁺, ¹²⁵Sb³⁺, and ¹²⁴Sb³⁺ were completely removed after treatment by the nanofiltration unit (main treatment unit); ⁵⁴Mn²⁺ was completely removed after treatment by the reverse osmosis unit (precision treatment unit); and ¹³⁷Cs⁺ was not detected after treatment by the cesium adsorption unit (post-treatment unit). The total purification factor of the system exceeded 1×10^6 .

[收稿日期] 2025-06-10

[作者简介] 熊扣红(1976—),男,高级工程师,主要从事辐射防护、放射性废物最小化技术开发等工作,E-mail:xionghk@cnpn.com。

[通信作者] 丁振杰(1992—),男,高级工程师,主要从事放射性废水处理技术开发等工作,E-mail:dinzj@cnnemail.cn。

[Conclusion] The combined membrane process based on ultrafiltration-nanofiltration-reverse osmosis-adsorption and its integrated device exhibit excellent treatment efficiency for radionuclides in radioactive wastewater, which can provide a reliable application scheme for the disposal of similar wastewater in nuclear power plants. In addition, the device can not only effectively remove various radionuclides including $^{137}\text{Cs}^+$ to make the final effluent meet the discharge requirements, but also demonstrate the potential for the resource recovery of boric acid from wastewater.

Keywords radioactive wastewater combined membrane process ultrafiltration(UF) nanofiltration(NF) reverse osmosis(RO)

近年来,随着我国核工业的高速发展,放射性废水的处理需求越来越紧迫^[1]。核电作为清洁能源,因其在运行期间产生的废料少,相比以化石燃料为能源的其他发电厂,对环境保护做出了巨大的贡献。但在其退料过程和报废过程中会产生一定的放射性废水^[2],必须对这些放射性废水进行妥善回收处置。放射性废水主要由放射性核素与普通水构成,核心有害成分为 $^{58}\text{Co}^{2+}$ 、 $^{60}\text{Co}^{2+}$ 、 $^{54}\text{Mn}^{2+}$ 、 $^{125}\text{Sb}^{3+}$ 、 $^{137}\text{Cs}^+$ 等放射性核素,同时含溶解盐、酸碱物质、有机物等非放射性成分。受来源影响,其酸碱性质及核素的种类、浓度存在显著差异。传统的低放射性废水处理工艺主要有化学沉淀法^[3]、离子交换法^[4-5]、蒸发浓缩法^[6]、吸附法^[7-8]等,其中,化学沉淀法产生的污泥量大,使其后续固化处理污泥成本高昂;离子交换法对树脂的辐射耐受性要求高,且易受水质影响而中毒失效;蒸发浓缩法则因能耗极高,而限制了其大规模应用。总体而言,这些传统方法普遍存在处理时间长、去污效果差、运行成本高等问题^[9]。而膜分离技术利用选择性分离膜,能够高效截留多种价态的放射性离子,对低浓度核素同样具有优异的去污效果。处理过程无需相变、能耗显著低于蒸发浓缩法且模块化设计使其操作灵活、适应性广。正是凭借能耗低、去污因子高、工艺紧凑的优点,膜分离技术在放射性废水处理领域具有广阔的应用前景^[10]。

膜分离技术作为一种新型分离方法可以应用在低放射性废水处理中,借助选择透过性的薄膜,以压力差、温度差、电位差等为动力,对低放射性废水混合物实现分离^[11]。膜分离技术处理根据膜的孔径及动力差不同,可以分为电渗析、微滤、超滤、纳滤及反渗透^[12],其脱除机制是物理筛分与化学效用的协同体现。其中,孔径筛分是基础,可有效截留大分子络合物与胶体。静电相互作用主导的道南效应是纳滤等技术分离带电离子的核心,其通过膜表面电荷排斥离子,尤其对高价核素具有高效脱除能力;而溶液-扩散机制则是反渗透等致密膜过程的主导机

制,利用水分子与离子在膜内溶解扩散速率的差异实现近乎完全的离子截留。对于含有不溶性颗粒、胶体及悬浮物的废水,核素往往存在于颗粒、胶体及悬浮物上,通过对废水进行常规的预处理,不仅可以去除部分放射性核素,还可以为后续的深度膜处理提供满足要求的水质^[13]。顾健等^[14]以两级反渗透装置对含硼放射性废水进行处理,结果表明:该装置具有优良的脱盐及除硼性能,总脱盐率和总除硼率分别保持在 99.50% 和 84.30% 以上;同时对废水中 $^{137}\text{Cs}^+$ 和 $^{90}\text{Sr}^{2+}$ 具有很好的截留效果。Gherasim等^[15]研究了尼龙纳米过滤膜对钴离子的截留性能,分析了不同条件下的分离机理和相应的膜特征,结果表明,该尼龙纳米过滤膜具有很高的渗透率。侯立安等^[16]报道了组合膜工艺处理放射性废水的试验研究结果,该研究以超滤-纳滤-离子交换为技术路线,以模拟核爆炸放射性物质污染水为原水,原水放射性比活度为 $1.36 \times 10^6 \text{ Bq/L}$,结果表明,经该工艺流程处理后,净化水的放射性比活度为 $8.96 \times 10^2 \text{ Bq/L}$,放射性核素的总净化率为 99.93%。由此可见,建立组合膜处理工艺能达到较好的去污效果。将膜分离技术推广至低放射性废水处理领域,推动其工业化应用。经膜技术处理后的低放射性废水,既能够满足直接达标排放的要求,又能大幅降低运行成本,具有操作简便、运行成本低、节能减排、环境友好等优势。目前核电厂废水处理系统存在的问题:对于胶体态核素去除效果差,废树脂处理量大,废水处理工艺的能耗较高、效率较低、净化系数较低、减容效果差^[17]。

针对现有核电厂废水处理系统的不足,本文介绍了一种新型放射性废水膜分离处理技术及装置。基于核电厂运行产生的低放射性废水处理需求,研发一套放射性废水组合膜处理技术一体化装置,集成超滤-纳滤-反渗透-吸附的组合膜工艺,利用低放射性废水进行试验验证,获得适用于核电厂放射性废水处理膜分离系统的全部设计方案及工艺参

数,为工业化推广应用提供数据支撑。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验原料来源于某核电厂 300 MW 机组厂房,

总计 2 m³ 放射性废水,分两批次(以下简称一批次、二批次)开展试验,每批次试验消耗 1 m³ 放射性废水。表 1 为某核电厂放射性废水的水质指标。表 2 为各批次初始试验条件汇总。

表 1 试验放射性废水组成

Tab. 1 Composition of Test Radioactive Wastewater

项目	pH 值	电导率/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	硼质量分数/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	总 γ 比活度/ ($\text{Bq} \cdot \text{L}^{-1}$)	核素比活度/($\text{Bq} \cdot \text{L}^{-1}$)						
					⁵⁸ Co ²⁺	⁶⁰ Co ²⁺	⁵⁴ Mn ²⁺	¹²⁵ Sb ³⁺	¹¹⁰ Ag ⁺	¹³⁷ Cs ⁺	¹²⁴ Sb ³⁺
波动高值	9.3	6 133.5	1 343.70	15 155	136.7	835.7	1 365.95	1 921.9	120.70	10 364.5	408.5
平均值	7.8	5 983.5	1 204.15	14 735	110.6	778.1	1 112.80	1 896.6	54.50	10 253.5	331.8

表 2 试验条件汇总

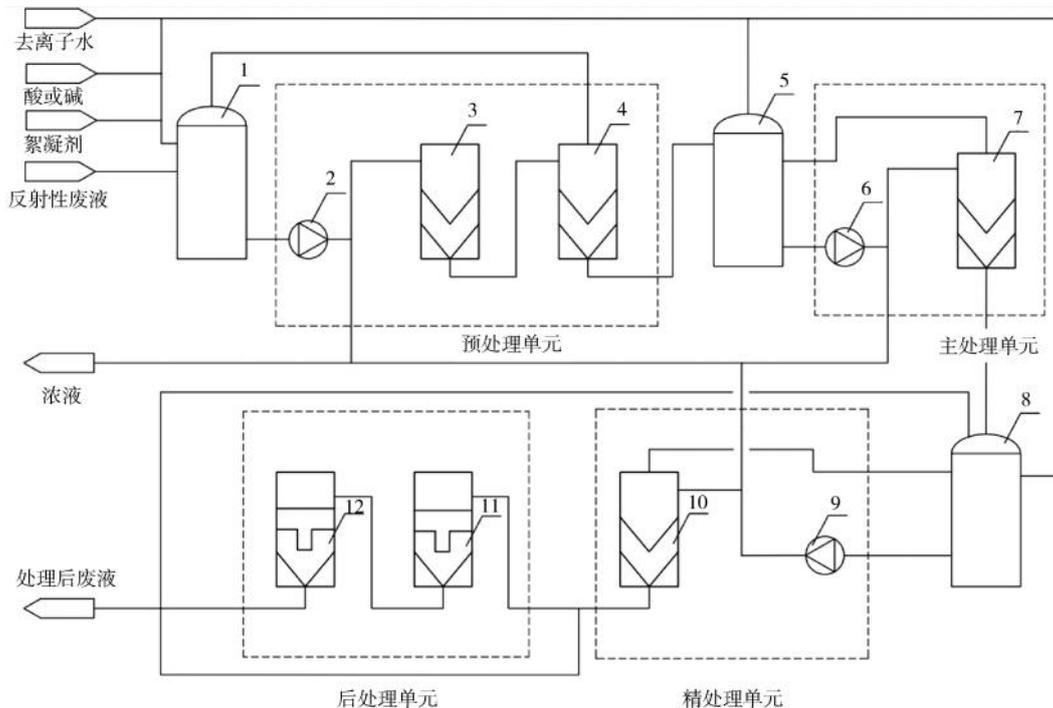
Tab. 2 Summary of Test Conditions

批次	pH 值	温度/°C	进膜压力/MPa	产水流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	浓水流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	浓水压力/MPa
一批次	9	20.9	0.057	4.8	5.0	0.058
二批次	7	23.9	0.052	5.0	4.8	0.054

1.2 组合膜处理工艺流程

如图 1 所示,放射性废水的组合膜处理工艺包括预处理、主处理、精处理和后处理 4 个单元。各单元基于其功能目标,选用了针对性的膜组件作为实现手段。其中,预处理单元采用碳纤维微滤和纤维

超滤膜组件,主处理单元采用改性纳滤膜组件,精处理单元采用特种反渗透膜组件,后处理单元采用了离子吸附和核素吸附两级吸附组件。其工艺流程如下:调节放射性废水 pH 后,将絮凝剂注入放射性废水,依次通入碳纤维过滤器和弹性纤维超滤膜组件,



注:1—原水箱;2—原水泵;3—碳纤维微滤器;4—弹性纤维超滤膜组件;5—中间水箱;6—中间水泵;7—纳滤膜组件;8—纳滤水箱;9—纳滤水泵;10—特种反渗透膜组件;11—离子纤维滤芯过滤器;12—核素吸附滤芯过滤器。

图 1 组合膜处理工艺流程

Fig. 1 Process Flow of Combined Membrane Treatment

除去废水中的悬浮物、胶体、不溶物及聚合物颗粒；随后，将预处理废水通过疏松纳滤膜，截留二价及以上核素（除 $^{54}\text{Mn}^{2+}$ 外）；而后，将经过主处理后的废水通入纤维素反渗透膜组件，去除废水中的 $^{54}\text{Mn}^{2+}$ ；最后，将经过精处理的废水依次通过离子纤维芯过滤器和核素吸附芯过滤器，通过离子交换和吸附确保废水达标排放。其中，浓水指的是在膜过滤过程中，未能透过分离膜、被截留下来的那股水流，其污染物浓度比进水更高。反洗水是系统定期反冲洗时产生的清洗废液。

1.3 组合膜处理装置

图2(a)为放射性废水的组合膜处理装置的三维结构图，图2(b)为放射性废水的组合膜处理装置实物图，考虑到装置的可移动性^[18]，所有设备置于

长×宽×高为6 058 mm×2 438 mm×2 896 mm的集装箱内。装置包含过滤单元、水箱、主控制柜、配套管道阀门等工艺设备以及仪表、取样箱、照明、空调等辅助设施。在设计过程中，为了保证净化效率和处理能力，通过理论计算确定各单元的膜数量，确保废水的流速及处理效果。装置集成可编程逻辑控制器（PLC）全自动控制单元，可以实现整机功能的全自动运行，并配备多套在线监测流量计、压力变送器、电导率仪、温度传感器、pH检测仪，覆盖各子系统的运行关键参数，在运行过程中，可以实时监控运行状态，具备智能监测、智能记录、智能报警功能；同时配备一键启停、故障状态自动停机安全机制，除取样和更换滤芯外，其余操作均可实现人机隔离远程操作，便于工业化的推广应用。

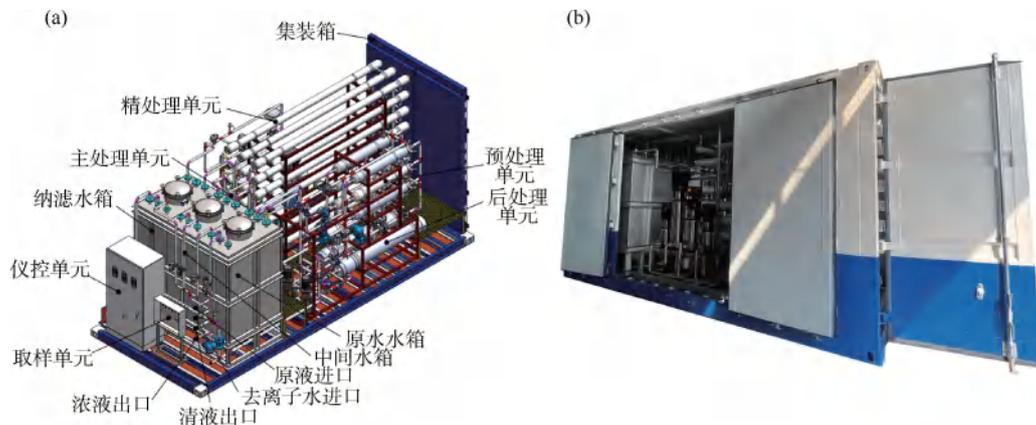


图2 (a) 组合膜处理装置布置图；(b) 组合膜处理装置实物图

Fig. 2 (a) Layout Diagram of Combined Membrane Treatment Device; (b) Physical Diagram of Combined Membrane Treatment Device

1.4 测试方法和性能评价方法

在本试验中，放射性废水的指标（pH、总 γ 比活度、核素比活度、硼浓度）由某核电厂化学分析室进行测定。其中，pH利用电极法进行测定；总 γ 比活度的检测采用ISO 10703: 2007标准^[19]；核素比活度检测运用能谱仪，可以快速检测放射性核素比活度；硼浓度的检测主要采用二次离子质谱法。

核素去除效果为经各级膜单元的净化后核素与原水核素进行比率计算，如式(1)。

$$F_c = \frac{N_i - N_e}{N_i} \times 100\% \quad (1)$$

其中： F_c ——核素去除率；
 N_i ——放射性废水核素比活度，Bq/L；

N_e ——产水核素比活度，Bq/L。

净化系数，又称去污因子，是衡量放射性去污过程中污染物去除程度的量化指标，为放射性废水核素比活度与产水中的核素比活度之比，计算如式(2)。

$$D_F = \frac{N_i}{N_e} \quad (2)$$

其中： D_F ——核素净化系数；
 N_i ——放射性废水核素比活度，Bq/L；
 N_e ——产水核素比活度，Bq/L。

硼透过率计算如式(3)。

$$k = \frac{C_e}{C_i} \times 100\% \quad (3)$$

其中: k ——硼透过率;

C_i ——放射性废水硼质量浓度,mg/L;

C_e ——产水硼质量浓度,mg/L。

2 膜处理装置处理放射性废水

2.1 预处理单元对核素的去除效果

图3为预处理单元超滤组件对核素的去除效果。一批次试验条件:进水pH值为9,水温为20.9℃,产水流量为4.8 m³/h,浓水流量为5.0 m³/h,进膜压力为0.057 MPa,浓水压力为0.058 MPa。二批次试验条件:进水pH值为7,水温为23.9℃,产水流量为5.0 m³/h,浓水流量为4.8 m³/h,进膜压力为0.052 MPa,浓水压力为0.054 MPa。当放射性废水的pH值为9时,超滤对⁵⁸Co²⁺的去除率为31.2%,对⁶⁰Co²⁺的去除率为24.0%,对⁵⁴Mn²⁺的去除率为33.5%,对¹²⁵Sb³⁺的去除率为41.9%,对¹¹⁰Ag⁺的去除率为100%,对¹³⁷Cs⁺的去除率为18.9%,对¹²⁴Sb³⁺的去除率为19.8%。当放射性废水的pH值为7时,超滤对⁵⁸Co²⁺的去除率为23.8%,对⁶⁰Co²⁺的去除率为6.8%,对⁵⁴Mn²⁺的去除率为9.8%,对¹²⁵Sb³⁺的去除率为13.3%,对¹¹⁰Ag⁺的去除率为100%,对¹³⁷Cs⁺的去除率为11.5%,对¹²⁴Sb³⁺的去除率为10.8%。其中¹¹⁰Ag⁺通过超滤被完全去除,而

其他核素的去除率为6.8%~41.9%,去除效果有限。pH降低后,各核素的去除率均出现较明显的降低,这可能是pH的降低破坏了许多核素形成的氢氧化物胶体或与大分子有机物的络合形态,导致其转化为离子态,粒径减小,从而穿透超滤膜孔径^[20-22]。在本试验中,超滤除了对¹¹⁰Ag⁺实现完全去除外,对其他核素的去除率有限,其中一批次试验中⁶⁰Co²⁺的去除率也仅有24.0%,推测可能与⁶⁰Co²⁺的存在形式有关,影响了超滤的拦截效果。深入分析可知,这种差异源于三方面共同作用:一是超滤以物理筛分为主,¹¹⁰Ag⁺在废水中多以不溶性胶体态存在,而其他核素多为水合离子或小型络合物,粒径接近甚至小于膜孔径,去除率受限;二是核素价态与水解倾向不同,¹²⁴Sb³⁺等三价核素在pH值为9时更易水解形成胶体,去除率高于一价的¹³⁷Cs⁺,⁶⁰Co²⁺、⁵⁴Mn²⁺等二价核素水解倾向较弱,多以游离阳离子或小型络合物存在,去除率介于两者之间;三是超滤膜表面通常带负电,pH值为9时负电性增强,可通过静电吸附强化对阳离子核素的截留,pH值降至7时膜表面电荷减弱,吸附作用下降,这也是所有阳离子核素去除率普遍降低的原因之一。

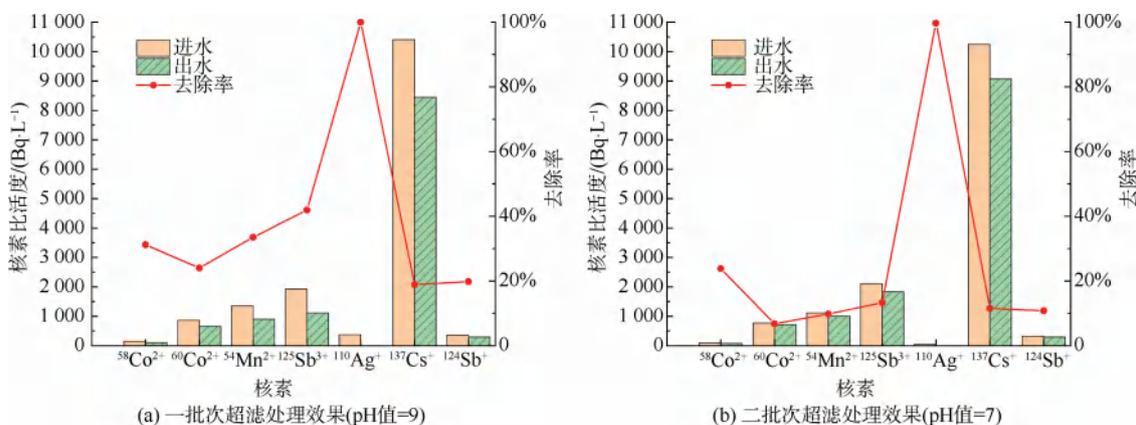


图3 超滤组件对核素的去除效果

Fig. 3 Efficiency of Ultrafiltration Module for Radionuclides Removal

2.2 主处理单元对核素的去除效果

放射性废水经预处理单元处理后,产水进入中间水箱,在纳滤单元进一步过滤。过程中对纳滤处理前后水样进行取样,分析检测水样中的pH、总γ比活度、核素比活度及硼浓度,对纳滤单元去除核素的效果进行评估,试验结果如图4所示。一批次试验条件:产水流量为3.0 m³/h,浓水流量为4.9 m³/h,进

膜压力为0.723 MPa,段间压力为0.626 MPa,浓水压力为0.534 MPa。二批次试验条件:产水流量为3.2 m³/h,浓水流量为3.8 m³/h,进膜压力为0.756 MPa,段间压力为0.661 MPa,浓水压力为0.619 MPa。当放射性废水的pH值为9时,纳滤对⁵⁸Co²⁺的去除率为100%,对⁶⁰Co²⁺的去除率为100%,对⁵⁴Mn²⁺的去除率为97.3%,对¹²⁵Sb³⁺的去

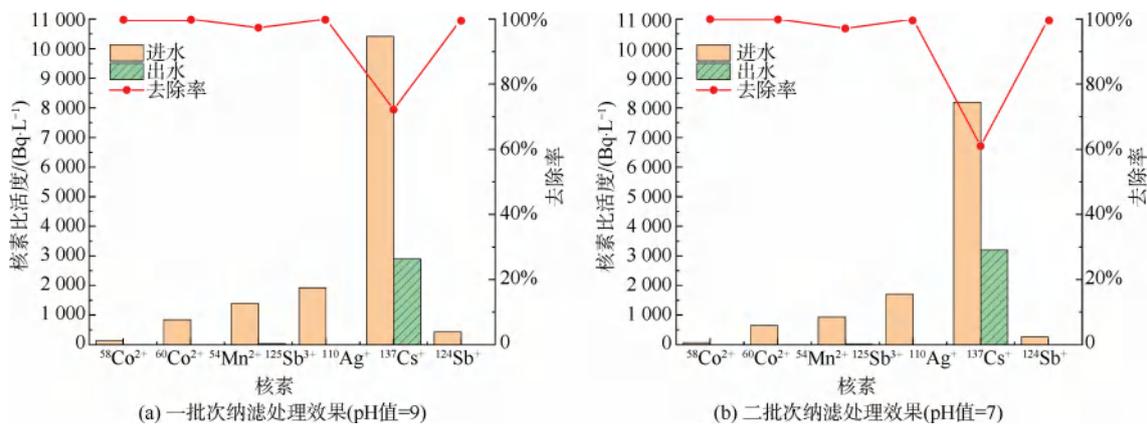


图4 纳滤组件对核素的去除效果

Fig. 4 Efficiency of Nanofiltration Module for Radionuclides Removal

率为100%，对 $^{137}\text{Cs}^+$ 的去除率为72.2%，对 $^{124}\text{Sb}^{3+}$ 的去除率为100%。而当放射性废水的pH值为7时，纳滤对 $^{58}\text{Co}^{2+}$ 的去除率为100%，对 $^{60}\text{Co}^{2+}$ 的去除率为100%，对 $^{54}\text{Mn}^{2+}$ 的去除率为97.1%，对 $^{125}\text{Sb}^{3+}$ 的去除率为100%，对 $^{137}\text{Cs}^+$ 的去除率为61.0%，对 $^{124}\text{Sb}^{3+}$ 的去除率为100%。可见，经过纳滤处理后，系统内除 $^{137}\text{Cs}^+$ 和 $^{54}\text{Mn}^{2+}$ 外，其余核素均已降至检测下限。

2.3 精处理单元对核素的去除效果

放射性废水经纳滤单元处理后，产水进入纳滤水箱以进行精处理系统反渗透单元深度过滤。过程中对反渗透处理前后水样进行取样，分析检测水样中的pH、总 γ 比活度、核素比活度及硼浓度，对反渗透单元去除核素的效果进行评估，试验结果如图5所示。一批次试验条件：水温为21.9℃，产水流量为4.0 m³/h，浓水流量为2.9 m³/h，进膜压力为1.003 MPa，段间压力为0.842 MPa，产水压力为

0.102 MPa。二批次试验条件：水温为23.6℃，产水流量为3.8 m³/h，浓水流量为3.0 m³/h，进膜压力为1.019 MPa，段间压力为0.909 MPa，浓水压力为0.116 MPa。放射性废水pH值为9时，反渗透处理后， $^{137}\text{Cs}^+$ 的比活度为629.18 Bq/L， $^{137}\text{Cs}^+$ 整体的去除率为93.9%。将放射性废水pH值调节至7附近，反渗透处理后 $^{137}\text{Cs}^+$ 的比活度为1619.68 Bq/L， $^{137}\text{Cs}^+$ 整体的去除率降至81.6%。pH降低影响了 $^{137}\text{Cs}^+$ 的去除，这可能是因为在反渗透膜结构中含有胺基(—NH)和羧基(—COOH)，在高pH时，膜表面电位比等电点低，—COOH失去质子变成阴性，膜表面表现出的负电性使反渗透对阳离子的去除率提高。侯彬等^[23]利用反渗透膜去除铯，当pH值低于8.0时，铯的去除率小于90%，而当进水pH值提高到9.0以上时，铯的去除率达到98.4%，随着pH的上升，铯的去除率也随之提高。

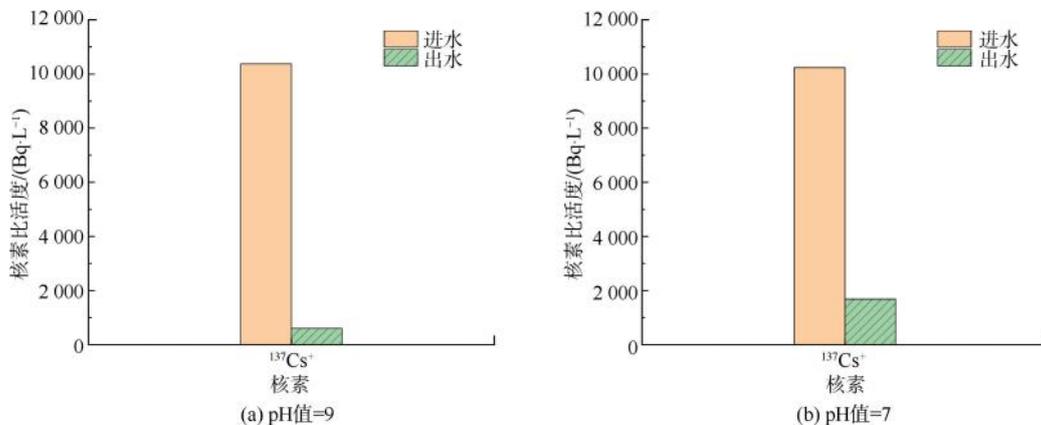


图5 反渗透膜组件对 $^{137}\text{Cs}^+$ 的去除效果

Fig. 5 Efficiency of Reverse Osmosis Membrane Module for $^{137}\text{Cs}^+$ Removal

2.4 后处理单元对核素的去除效果

经反渗透处理后 $^{137}\text{Cs}^+$ 不能完全去除,这与文献报道的相一致^[24],由于, $^{137}\text{Cs}^+$ 是放射性废水的主要辐射来源,因此仍然有必要对反渗透后废水中的 $^{137}\text{Cs}^+$ 进行进一步处理。图6为吸附滤芯后处理单元对核素的去除效果。由图6可知,经过吸附滤材后,2种工况的废水中 $^{137}\text{Cs}^+$ 均无法检出,浓度已降低到仪器探测线以下。

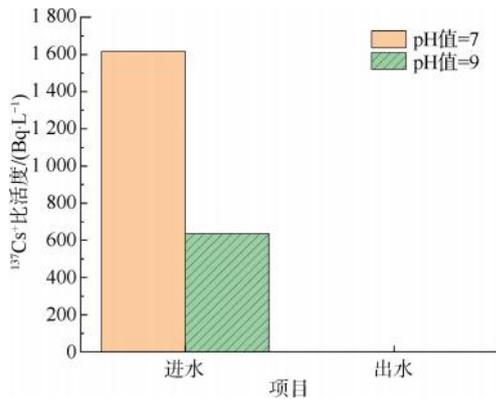


图6 铯吸附滤材对铯的去除

Fig. 6 Cesium Removal by Cesium Adsorption Filter Media

2.5 组合膜处理装置对核素的整体去除效果

放射性废水经热试样机处理后,各工艺单元核素总 γ 比活度的整体去除情况如图7所示。一批次放射性废水总 γ 比活度为15 155 Bq/L,经纳滤和反渗透处理后,总 γ 比活度分别为11 708、2 480.5 Bq/L和611.1 Bq/L,去除率分别为22.7%、78.8%和75.4%,整体核素的去除率为96.0%。二批次放射性废水总 γ 比活度为14 735 Bq/L,经超滤、纳滤和反渗透处理后,总 γ 比活度分别为11 265、

3 245.0 Bq/L和1 668.0 Bq/L,去除率分别为23.5%、71.2%和48.6%,整体核素的去除率为88.7%。装置的总净化系数大于 1×10^6 。pH降低后,核素的去除率出现了降低,其中纳滤和反渗透单元的去除率降低较为明显。

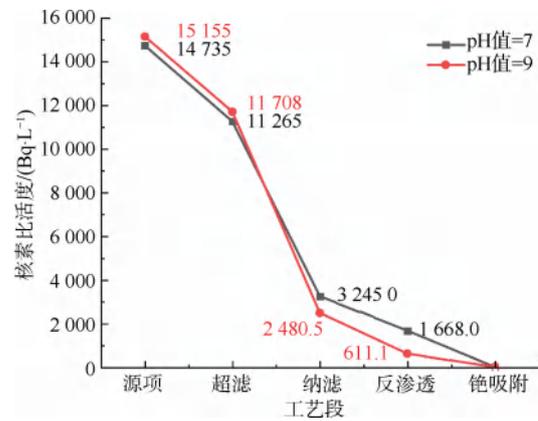


图7 总 γ 比活度去除情况

Fig. 7 Removal of Total γ Specific Activity

2.6 组合膜处理装置对硼的透过性能验证

图8组合装置对硼的分离效果。当放射性废水的pH值为9时,超滤对硼的透过率为84.6%,纳滤对硼的透过率为33.19%,反渗透对硼的透过率为56.3%,三级处理单元的总透过率为18.68%,不利于实现硼的透过。在一批次试验未对放射性废水做任何改变的前提下,二批次试验对放射性废水pH进行调节,至中酸性条件。当调节放射性废水pH值至7后,超滤对硼的透过率为98.71%,纳滤对硼的透过率为88.36%,三级处理单元的总透过率为60.10%。降低pH后,硼的透过率出现显著上升,这是由于pH对硼的分离特性具有重要影响,当pH

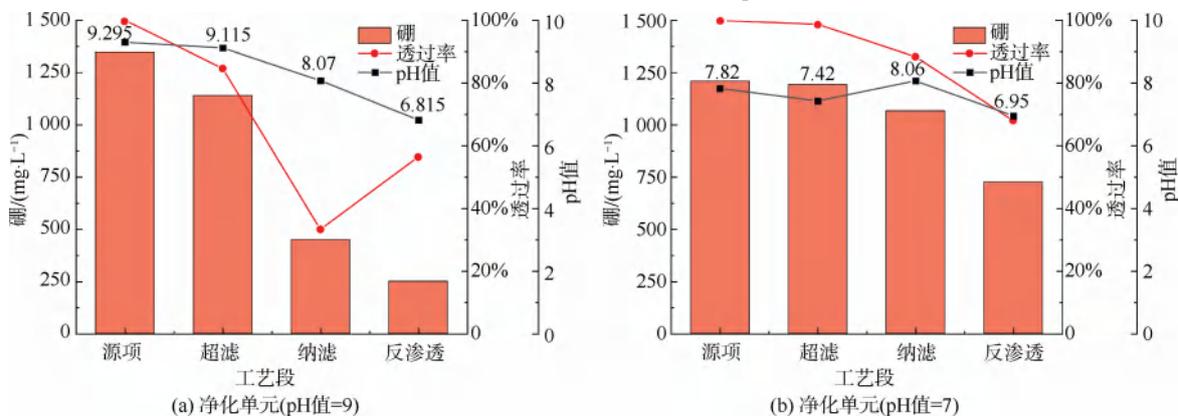


图8 硼的分离效果

Fig. 8 Separation Efficiency of Boron

值大于9时,溶液中的主要以水合硼酸根离子的形式存在^[25],水合硼酸根离子因其所带负电荷与膜表面负电荷产生的排斥力会阻止其通过反渗透膜。

3 总结

(1)组合膜系统能够有效去除放射性废水中的核素,其中弹性纤维超滤预处理对不可溶的低放射性废水分离展示出优异效果,能够将不可溶物质富集浓缩后排出,纳滤主处理单元承担拦截绝大部分可溶性的核素的任务,再经反渗透和吸附处理的低放射性废水可以达标排放。

(2)采用高压反渗透技术能够回收硼酸,通过调节废水的pH,可使硼酸主要以分子形态优先透过半透膜,而将放射性核素截留于浓水侧,从而实现硼酸与放射性物质的分离。

(3)组合膜分离技术对于所有以非离子态核素存在的放射性核素去除率大于80%,膜过滤系统总净化系数满足超过 1×10^6 ,其中 $^{110}\text{Ag}^+$ 经超滤装置(预处理单元)处理后完全去除, $^{58}\text{Co}^{2+}$ 、 $^{60}\text{Co}^{2+}$ 、 $^{125}\text{Sb}^{3+}$ 和 $^{124}\text{Sb}^{3+}$ 经纳滤装置(主处理单元)处理后完全去除, $^{54}\text{Mn}^{2+}$ 经反渗透装置(精处理单元)处理后完全去除, $^{137}\text{Cs}^+$ 经铯吸附装置(后处理单元)处理后完全去除。

参考文献

- [1] 王韶伟,岳会国,熊文彬,等. 我国内陆核电发展过程中水资源安全相关问题[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(3): 113-117.
Wang S W, Yue H G, Xiong W B, et al. Security-related issues of water resources in the development process of inland nuclear power in China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(3): 113-117.
- [2] Ma H L, Shen M H, Tong Y, et al. Radioactive wastewater treatment technologies: A review[J]. Molecules, 2023, 28(4): 1935.
- [3] Kim K W, Baek Y J, Lee K Y, et al. Treatment of radioactive waste seawater by coagulation-flocculation method using ferric hydroxide and poly acrylamide[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2016, 53(3): 439-450.
- [4] 马鸿宾,魏新渝,熊小伟,等. 离子交换技术去除核电厂放射性废液中痕量核素研究进展[J]. 水处理技术, 2016, 42(1): 7-11, 19.
Ma H B, Wei X Y, Xiong X W, et al. Research progress of application of ion exchange technology on the removal of trace radionuclides from liquid radioactive waste innuclear power plant [J]. Technology of Water Treatment, 2016, 42(1): 7-11, 19.
- [5] Ayres J A. Treatment of radioactive waste by ion exchange[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1951, 43(7): 1526-1531.
- [6] Xu P T, Gao J K, Xia M S, et al. Same volume, larger output: 3D trapezoidal multi-interface solar evaporator for concentrated seawater desalination and wastewater treatment [J]. Desalination, 2024, 581: 117581.
- [7] 代洪静,马学虎,王四芳. 低中放射性废水处理吸附技术及材料[J]. 化工进展, 2024, 43(1): 529-540.
Dai H J, Ma X H, Wang S F. Adsorption technology and materials for the treatment of low and intermediate level radioactive wastewater [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(1): 529-540.
- [8] 陈思璠,尉继英,赵璇. 离子交换树脂去除模拟放射性废水中的铯[J]. 应用化学, 2019, 36(1): 41-50.
Chen S F, Yu J Y, Zhao X. Removal of cesium by ion exchange resins in simulated radioactive wastewater [J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2019, 36(1): 41-50.
- [9] 辜润秋,左天明,祝长生,等. 活性炭与RO膜联合处理低放废水影响因素研究[J]. 膜科学与技术, 2019, 39(2): 67-72, 87.
Gu R Q, Zuo T M, Zhu C S, et al. Study on influencing factors of activated carbon and reverse osmosis membrane combined treatment of low-level radioactive wastewater [J]. Membrane Science and Technology, 2019, 39(2): 67-72, 87.
- [10] 孔劲松,郭卫群. 低放废液组合膜分离工艺研究[J]. 核动力工程, 2014, 35(3): 145-147.
Kong J S, Guo W Q. Technical study on separating compounds of low level radioactive wastewater by composite membranes [J]. Nuclear Power Engineering, 2014, 35(3): 145-147.
- [11] Zakrzewska-Trznadel G. Advances in membrane technologies for the treatment of liquid radioactive waste [J]. Desalination, 2013, 321: 119-130. DOI: 10.1016/j.desal.2013.02.022.
- [12] 高永,顾平,陈卫文. 膜技术处理低浓度放射性废水研究的进展[J]. 核科学与工程, 2003, 23(2): 173-177.
Gao Y, Gu P, Chen W W. Development of research on the treatment of low-level liquid radioactive waste by membrane process [J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2003, 23(2): 173-177.
- [13] 赵海洋,李鑫,张林,等. 放射性废水处理中聚酰胺复合膜辐射效应研究进展[J]. 化工进展, 2023, 42(12): 6544-6553.
Zhao H Y, Li X, Zhang L, et al. Radiation effect of polyamide thin film composite membrane in the radioactive wastewater treatment [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(12): 6544-6553.
- [14] 顾健,王松平,王晓伟. 核电厂含硼放射性废液的反渗透处理研究[J]. 中国核电, 2015, 8(3): 219-224.

(下转第224页)

- [7] 刘小梅,王婷,赵美玲,等. 基于在线监测的排水系统运行负荷分析与问题诊断[J]. 给水排水, 2016, 42(12): 126-130.
Liu X M, Wang T, Zhao M L, et al. Analysis and measures for the operation load of drainage system based on on-line monitoring [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(12): 126-130.
- [8] 席力蒙,刘钰,张平,等. 天津市污水水质区域对比及年度内变化[J]. 净水技术, 2019, 38(s2): 30-35.
Xi L M, Liu Y, Zhang P, et al. Regional comparison of wastewater characteristics and quality variation within a year in Tianjin[J]. Water Purification Technology, 2019, 38(s2): 30-35.
- [9] 周乙新,李激,王燕,等. 城镇污水处理厂低浓度进水原因分析及提升措施[J]. 环境工程, 2021, 39(12): 25-30.
Zhou Y X, Li J, Wang Y, et al. Reason analysis and improvement measures for low pollutants concentration of influent water of urban sewage treatment plants [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(12): 25-30.
- [10] 高广灿,孙宇,聂泽宇,等. 不同排水体制下枣阳市某片区管网入河污染负荷及排水能力模拟评估[J]. 净水技术, 2025, 44(2): 158-165.
Gao G C, Sun Y, Nie Z N, et al. Simulated and assessment of pollutant load entering rivers and drainage capacity of pipe networks in a certain area of Zaoyang City under different drainage systems[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(2): 158-165.

(上接第 151 页)

- Gu J, Wang S P, Wang X W. Study on treating boron-containing radioactive waste water in nuclear power plant by reverse osmosis [J]. China Nuclear Power, 2015, 8(3): 219-224.
- [15] Gherasim C V, Hancková K, Palarčík J, et al. Investigation of cobalt (II) retention from aqueous solutions by a polyamide nanofiltration membrane [J]. Journal of Membrane Science, 2015, 490: 46-56.
- [16] 侯立安,左莉. 纳滤膜分离技术处理放射性污染废水的试验研究[J]. 给水排水, 2004, 30(10): 47-49.
Hou L A, Zuo L. Experimental research on nano-membrane filtration for radioactive contaminated wastewater treatment [J]. Water & Wastewater Engineering, 2004, 30(10): 47-49.
- [17] Li J F, Wang J L. Technology selection for emergency radioactive wastewater treatment [J]. Advanced Materials Research, 2013, 724/725: 708-712.
- [18] 杨洋,陶建国,马若霞,等. 移动式放射性废水应急处理装置的设计与试验研究[J]. 工业水处理, 2023, 43(6): 81-85.
Yang Y, Tao J G, Ma R X, et al. Design and experimental study of mobile emergency treatment device for radioactive wastewater [J]. Industrial Water Treatment, 2023, 43(6): 81-85.
- [19] ISO 10703:2007 Water quality - Determination of the activity concentration of radionuclides - Method by high resolution gamma-ray spectrometry[S].
- [20] 姚青旭,贾铭椿,王晓伟. 基于水解机理的超滤法处理低放废水技术的研究[J]. 工业水处理, 2009, 29(9): 47-50.
Yao Q X, Jia M C, Wang X W. Research on the treatment of wastewater with low-level radioactivity by ultrafiltration, based on hydrolyzation mechanism [J]. Industrial Water Treatment, 2009, 29(9): 47-50.
- [21] 刘斐文,韩力慧,孙秀珍. 胶体超滤法去除水中低含量重金属离子[J]. 水处理技术, 1993, 19(6): 43-47.
Liu F W, Han L H, Sun X Z. Removal of heavy metal ions of lower concentration from water by colloid uf membrane method [J]. Technology of Water Treatment, 1993, 19(6): 43-47.
- [22] Huang J H, Yuan F, Zeng G M, et al. Influence of pH on heavy metal speciation and removal from wastewater using micellar-enhanced ultrafiltration [J]. Chemosphere, 2017, 173: 199-206. DOI:10.1016/j.chemosphere.2016.12.137.
- [23] 侯彬,贾铭椿,王晓伟,等. 复合反渗透膜去除模拟放射性废水中铯的实验研究[J]. 广东化工, 2015, 42(23): 153-154.
Hou B, Jia M C, Wang X W, et al. Experimental research on removing cesium from simulated radioactive wastewater by composite reverse osmosis membrane [J]. Guangdong Chemical Industry, 2015, 42(23): 153-154.
- [24] Li J F, Zhuang S T, Wang L, et al. Treatment of radioactive wastewater from high-temperature gas-cooled reactor by membrane system [J]. Nuclear Technology, 2018, 203(1): 101-107.
- [25] 王松平,陈小莉,李俊雄,等. 内陆核电厂放射性废液中硼酸的反渗透分离实验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2017, 15(2): 129-134.
Wang S P, Chen X L, Li J X, et al. Experimental study on liquid radioactive waste effluent polishing treatment of inland nuclear power plant [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017, 15(2): 129-134.