

文章编号: 0258-0926(2019)06-0001-06; doi:10.13832/j.jnpe.2019.06.0001

放射性废液处理技术的现状与展望

孙寿华, 冉涪东, 林力, 刘文磊, 李振臣, 李文钰

中国核动力研究设计院, 成都, 610213

摘要: 放射性废液得到有效处理是世界各国核工业迅猛发展的前提, 其关键技术的现状和发展方向也是我国核工业界关注的焦点。本文介绍了几种放射性废液处理的传统方法及涌现出的新技术, 概述了各种方法的原理及优、缺点, 同时讨论了放射性废液处理技术今后的研究方向及发展趋势。

关键词: 放射性废液; 处理技术; 研究进展

中图分类号: O657.63 **文献标志码:** A

Present Situation and Prospect of Radioactive Waste Liquid Treatment Technology

Sun Shouhua, Ran Mingdong, Lin Li, Liu Wenlei, Li Zhenchen, Li Wenyu

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: The effective disposal of radioactive waste liquid is the precondition for the rapid development of nuclear industry all over the world, and the current situation and development direction of its key technologies are the focus of attention of the nuclear industry in China. This paper introduces several traditional methods of radioactive waste liquid treatment and the emerging new technology options, summarizes the principles, advantages and disadvantages of various methods, and discusses the research direction and development trend of radioactive waste liquid treatment technology in the future.

Key words: Radioactive waste liquid, Treatment technology, Research progress

0 引言

按照废液的放射性活度值, 将放射性废液分为低放射性废液、中放射性废液、高放射性废液^[1]。在目前的生产研究活动中, 产生数量较大的还是中、低放射性废液。本文主要讨论中、低放射性废液处理技术的研究进展情况。

放射性废液处理一般遵循 2 个原则: 通过稀释和扩散作用, 将放射性废水排入大量流动水体中降低放射性浓度, 直至达到无害水平, 主要适用于极低水平的放射性废水处理; 通过一系列技术手段将放射性废水浓缩, 将浓缩产物经过处理后与人类的生活环境长期隔离, 通过本身的自

然衰减特性来达到降低放射性浓度的目的。在核能高速发展的今天, 探讨国内外普遍采用的传统处理方法以及正在研究或正处于工程试验阶段的新兴处理方法的基本原理、优缺点及发展趋势是非常必要的。

1 放射性废液传统处理方法

放射性废液传统处理方法主要是借助外力的作用, 利用以蒸发浓缩法、离子交换法以及化学沉淀法为代表的分离法把有害物质从废水中分离出来。3 种代表性方法的去污系数数量级分别为 $10^4 \sim 10^6$ 、 $10 \sim 10^3$ 、 10^1 , 选择处理方法时要综合考

收稿日期: 2019-05-17; 修回日期: 2019-08-15

作者简介: 孙寿华 (1964—), 男, 研究员, 现从事反应堆物理、运行安全分析等工作

虑去污能力和运行费用制定优化方案。

1.1 蒸发浓缩法

由于废水中大多数放射性核素都是不可挥发的，因此可以借助外部加热（蒸汽或电加热），使废水中的水分逐渐汽化为水蒸汽，通过冷凝得到净化水。废水中的放射性核素，特别是不可挥发性的放射性核素都留在了残液中，因此将放射性废水通过蒸发浓缩法处理，能将大部分的放射性核素（除氡、碘等极少数元素外）浓缩在蒸发残液中。蒸发浓缩主工艺见图 1。

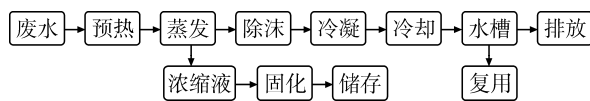


图 1 蒸发系统主工艺图

Fig. 1 Main Process Chart of Vaporization System

蒸发浓缩法有很高的去污系数和浓缩系数，灵活性大，既可处理高、中放射性废水，也可处理低放射性废水；可以单独使用，也可以与其他方法联合使用（比如与离子交换法联合使用），理论和技术相对比较成熟，是一种行之有效又可靠的方法。但蒸发浓缩法也存在一些缺陷，该方法不适合处理含有挥发性核素和易起泡的废水，热能消耗大，运行成本高，蒸汽发生器容易腐蚀、结垢，不易气液分离，还存在爆炸等安全问题^[2]。

为了提高蒸汽利用率、降低运行成本，很多学者都在蒸汽发生器的改进和技术上做出了贡献。尉凤珍^[3]等人针对军队对放射性废水处理的特殊要求，开发出了适合军队的真空蒸发浓缩装置工艺技术及装置，该装置利用真空状态下水的沸点低于常压时的特点，可有效削减放射性废水的排放量。试验结果表明，出水符合我国放射性废水排放标准。胡厚仁^[4]等人针对常规的蒸发技术有起泡和结垢的危险，系统研究了中放射性废液的远红外蒸发技术。远红外蒸发技术采用顶面辐射式加热，直接作用于液面而不与废液接触，将表面约 1 mm 深的水所吸收的辐射能转化为热能，表层下的废液未接受辐射能，不会起泡，以雾沫形式进入气相的放射性颗粒极少，去污系数高达 $10^4 \sim 10^6$ ，是一种经济而高效的方法。万嘉瑜^[5]等人针对核电厂含盐量较高的蒸残液采用了以热风为热源的桶内干燥技术，该技术具有废物减容比高、稳定化处理以及适用范围广等特点，通

过选取合适的蒸发干燥速率和干燥终点，能降低干燥过程中的雾沫夹带并提升浓缩效果。德国 Linn High Therm 公司的桶内微波干燥（MID）工艺采用微波辐射对溶液进行直接加热，装有放射性废物的废物桶也可用于最终处置，根据废物溶液成分的不同，最终获得的废物将成为盐块或者干燥粉末，浓缩液高效减容效果十分明显。

蒸发浓缩法对于含盐量较多、成分较复杂的废水具有特别的效果，蒸发法目前的研究方向及发展趋势主要为：蒸发过程的优化，主要包括使用多效蒸发器（升膜式蒸发器、降膜式蒸发器等），研究蒸汽机械再压缩技术（MVR），提高蒸发效率，增大去污系数；蒸发除雾过程的优化，主要是除雾沫装置的研究和开发，体现在装置耐辐照、易清洗、易更换等方面；浓缩液高效减容，主要体现在热风桶内干燥（德国汉莎公司、德国 GNS 公司）、电加热桶内干燥（法国 AREVA 公司）及微波桶内干燥（德国 Linn High Therm 公司）等技术。

1.2 离子交换法

离子交换法是用离子交换剂（主要是离子交换树脂）分离除去水中呈离子状态放射性核素的一种方法，放射性离子与离子交换剂上的可交换离子发生交换使放射性离子转移到离子交换剂上，达到分离净化的作用。由于用离子交换树脂处理放射性废水具有操作简便、容易实现自动化、去污净化效果好的优点，因此离子交换法已经被广泛运用于放射性废水处理工艺中。具体工艺流程见图 2。

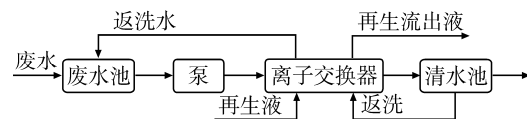


图 2 离子交换工艺流程

Fig. 2 Main Process of Ion Exchange System

离子交换树脂适用于含盐量较低的废液，当含盐量较高时，离子交换树脂的费用较高。因此现在许多处理放射性废液的离子交换工艺主要是几种方法的组合，如絮凝-离子交换、絮凝-电渗析-离子交换、蒸馏-离子交换、反渗透-选择吸附、超滤-反渗透-电渗析等，组合工艺能获得高去污系数，且比较经济、合理。

针对有机离子交换剂在放射性废液处理过程中不耐腐蚀和高温的特点,无机离子交换材料具有耐酸、耐辐照、耐高温性能好且与玻璃和水泥有良好的相容性等优点,很多学者在离子交换剂的选择上进行了研究。研究的无机离子交换材料主要包括天然/人造沸石、复合离子交换材料(Tip-AMP等)、多价金属磷酸盐(SnP、Tip等)等,无机离子交换材料的特性如表1所示。

表1 无机离子交换剂材料
Table 1 Inorganic Ion Exchange Materials

材料	特性	缺点
沸石	耐辐射、耐高温,专一性强	交换容量受溶液酸度和含盐量影响较大
复合离子交换材料	一般在碱性环境具有相对较高的吸附容量	复合离子交换材料大多成型困难或制备颗粒不规范,机械强度差,容易破裂,不便于柱式或床式操作
多价金属磷酸盐	选择性高,耐辐射	易受Na的干扰,受酸度、含盐量影响较大
金属亚铁氰化物	选择性高,耐酸、耐辐射,廉价且制备方法简单	制备的亚铁氰化物形状不规范,机械强度差
铁硅酸盐晶体	新型材料,具有通道结构且辐照稳定性强。对Cs具有极高的选择性,吸附容量大	高盐量和强酸性情况下吸附容量低

无机离子交换剂的吸附交换动力较弱,车建业^[6]针对无机离子交换剂处理高盐浓度、大体积废液表现出的处理时间长、效率低下等缺点,提出将无机离子交换剂加工为粒径在0.15 mm以下的粉末状,能大幅度提升流速,从而提高废液处理效率。

电去离子(EDI)深度净化技术是离子交换技术、反渗透、电渗析之后日益获得广泛关注和应用的最新处理技术^[7]。该技术结合了离子交换和电渗析技术,在1对阴阳离子交换膜之间充填混合离子交换树脂形成了1个EDI单元,具有占地面积小、易控制和操作的优点。连续电去离子技术(CEDI)的原理与EDI相似,与EDI不同的是CEDI浓水室里也放了树脂,不需要浓水循环和极水排放,是EDI改进版。连续电去离子技术被用于低放射性废水处理,以尽量减少放射性废物和能源消耗。Liu^[8]等人用Cs、Sr和Co作为压水堆的典型裂变产物及腐蚀产物进行实验,结果表明与传统的离子交换工艺相比,CEDI具有更好的连续性和有效的操作性能,Sr的去除率大于95%,但随着

进水与出水的比例增加,核素去除效率有所降低。

离子交换法工程应用成熟,操作简便,去污效果好。在蒸发法的后续处理或二次蒸汽凝结水的深度净化中很有潜力。主要发展趋势为提高无机离子交换材料的选择性及交换容量以及对现有材料的改良研究,开发EDI深度净化技术实现低放射性废液的深度净化处理,达到近零排放的目标。

1.3 化学沉淀法

化学沉淀法主要是添加化学沉淀剂与放射性废水中的核素发生共沉淀作用,放射性核素转移并浓缩到小体积的污泥中,废水得到净化。影响化学沉淀效果的主要因素有:水力条件,即絮凝剂与废水间的混合程度; pH值,主要影响物质的水解程度; 絮凝剂的用量,必须与水中含有的胶状及悬浮状物粒量相适应,才能得到良好的凝聚效果。化学沉淀法简便、费用低廉、去除元素种类较广、技术和设备较成熟,经常用于净化去污要求不高的大体积废液以及作为膜处理的预处理技术。该方法的缺点是污泥产量较大、固液分离困难,需要对污泥进行进一步的浓缩。不少学者在增加浓缩倍数、增加凝结方面进行了研究。

英国哈威尔原子能研究所^[9]用冻结-融化-离心过滤的方法浓缩污泥,获得了比真空过滤脱水方法更大的体积浓缩倍数,脱水后的污泥直接进行固化处理,最后将水泥固化体安全地埋在地下,取得了不错的效果。在化学沉淀时,铁盐、铝盐、磷酸盐、苏打-石灰等广泛应用于化学沉淀,也有研究者通过添加粘土、活性二氧化硅等助凝剂来加强凝结过程^[10]。由于投入的絮凝剂水解产生的酸度(氢离子)不利于形成胶体,蔡英茂^[11]利用氢氧化钠中和酸性放射性废水,处理后总 α 、总 β 去除率分别为99.35%和96.17%。

2 膜技术在放射性废水处理中的运用

同种元素的同位素化学性质基本相同,这是可以采用膜分离技术处理放射性废水的科学依据^[12]。将膜技术运用在放射性废液处理中是一种新兴分离技术,借助选择透过性的薄膜,以压力差、温度差、电位差等为动力,对放射性废水混合物实现分离^[13]。膜处理技术无相变、耗能低、设备简单、操作方便、适应性强,还可以通过串、并联提高膜处理能力及净化系数。膜技术处理方法根据膜的孔径及动力差不同分为电渗析(ED)、

微滤 (MF)、超滤 (UF)、纳滤 (NF) 及反渗透 (RO)。分离特征见表 2^[12]。

表 2 膜分离特征
Table 2 Membrane Separation Characteristics

方法	膜特性	驱动力	用途
微滤	孔径 0.1~10 μm 对称结构多孔膜	压差 <0.1 MPa	滤除 $10^2\sim 10^4$ nm 的颗粒
超滤	孔径 5~100 nm 非对称结构多孔膜	压差: 0.1~1 MPa	筛分 10~1000 nm 的颗粒或分子质量 $10^3\sim 3\times 10^5$ 的大分子
纳滤	孔径 1~10 nm 非对称结构多孔膜	压差: 0.5~4 MPa	截留分子质量 200~1000 的溶质
反渗透	非对称结构多孔膜、复合膜	压差: 1~10 MPa	小分子质量盐水分
电渗析	高密度荷电膜	电位差	电解质离子分离

膜处理对水质要求较高,一般与常用废水处理技术相结合,如过滤、吸附等。若需要对废水进行高度浓缩,则还需要蒸发过程。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,不仅可以除去部分的放射性核素,还可以为后续的膜处理方法提供满足要求的水质。Gao^[14]用微滤技术处理低浓度含 Am 的放射性废水,原水比活度为 $10^3\sim 10^4$ Bq·L⁻¹,用高锰酸钾预氧化,以 Fe³⁺进行絮凝预处理,用超滤过滤,Am 的净化率达到 99.9%,出水比活度为 0.45 Bq·L⁻¹。杜志辉^[15]用复合反渗透膜去除模拟放射性废水中的盐分及核素,通过机械过滤器和活性炭过滤器分别去除有机物、胶体、大小颗粒和余氯,得到了不错的效果。顾健^[16]以两级反渗透装置对含硼放射性废水进行处理,考察该装置的脱盐、除硼、核素去除性能,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,对废水中 ¹³⁷Cs 和 ⁹⁰Sr 具有很好的截留效果。无论采用哪一种膜处理技术,都必须建立组合工艺,才能达到深度净化和高度浓缩的目的。陆晓峰等^[17]采用超滤-反渗透技术进行了处理放射性废水的试验,原废水经过自制的超滤膜处理,再进入中空纤维反渗透膜组件,总 β 净化率为 95%,净化因子为 20,总 γ 净化率为 93.7%,净化因子为 15.8,取得了很好的效果。侯立安等^[18]报导了纳滤组合流程处理放射性废水的试验研究结果,以超滤-纳滤-离子交换工艺为技

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 1.36×10^6 Bq·L⁻¹,结果表明,经该工艺流程处理后,净化水的放射性比活度为 8.96×10^2 Bq·L⁻¹,放射性核素的总净化率为 99.93%,极大提高了净化率。过渡金属铁氰化物是一种具有三维网状结构的无机配位化合物,具有较强的吸附能力和较高的选择性,严静^[19]将过渡金属铁氰化物制备成膜电极并运用在模拟核电厂含 Cs⁺放射性废液处理中,结果表明铁氰化物膜电极对 Cs⁺分离性能较好。

影响膜技术的制约因素主要与工艺路线组合特点、预处理流程选择、膜材料的新型研究以及传统方法集成技术息息相关,根据料液的特点选择合适的膜处理技术至关重要。国内膜分离技术历经了半个世纪发展,数十年来对多种膜组件,微滤、超滤、反渗透膜组件和电渗析器都进行过处理放射性废水的试验和研究,应进一步加大膜技术的应用研究,解决膜污染问题,保证膜装置长期稳定运行,实现大规模的应用。

3 新技术与新工艺

3.1 有机废液的处理

有机放射性废液是一种特殊的放射性废液,通常具有易燃、易爆、易挥发及热分解、生物降解和辐照分解等物化特性。这些特性使得放射性有机废液较放射性无机废液更难使用、贮存,加之有机废液中通常含有钴、铀、钚、镅、铯等放射性核素,容易与常用的去污剂乙二胺四乙酸 (EDTA) 形成有机络合物,造成该类废液处理、处置极为困难。针对有机废液难处理的特性,许多学者在无机材料吸附、氧化法等方面进行了研究。俄罗斯学者 Avramenko^[20]研发了一系列高效无机吸附剂,制备小颗粒过渡金属的亚铁氰化物涂层碳纤维,在复杂组分的蒸残液中表现出很好的去除核素的能力,并针对残液中 Co 与 EDTA 形成的 Co-EDTA 稳定络合物,合成了二硫代氨基甲酸过渡金属盐来吸附。根据诺沃罗涅茨卡亚核电站的中试试验结果,吸附效果良好,但存在固液分离的难题。

在氧化方面,Avramenko 等^[20]开发了一种处理蒸发浓缩物的连续流动水热处理技术,在氧化介质中对浓缩物进行水热处理 (温度为 250~300 $^{\circ}\text{C}$,压力为 8~12 MPa),以此破坏稳定

的共放射性核素有机配合物，并通过氧化过程中与之形成的氧化物材料去除这些放射性核素。与传统的氧化方法（臭氧氧化法、光催化法、电化学法和等离子体氧化法）相比，蒸发浓缩物的水热氧化具有许多优点。搭建核电站蒸发浓缩液流动式水热氧化开发装置进行试验，结果表明该方法具有良好的应用前景，根据所获得的结果，Avramenko 开发建造了 1 个 15 L/h 的生产力试点装置，并于 2006 年在诺沃罗涅茨卡亚核电站的第一个反应堆进行了 6 个月的中试，确定了最佳工艺制度，并对该工艺的经济合理性进行了评价。结果表明，将水热氧化法技术应用于核电站的处理系统可以大大减少固体放射性废物的最终处理量^[21]。

3.2 生物处理法

当含有有机物质的放射性废水难以用蒸发和离子交换等方法处理时，可以先经过生物处理使废水中的有机污染物矿化为无机物，为后续的处理创造条件。生物处理法主要包括植物修复法和微生物法。作为一种新兴的技术方法，生物处理法和其他方法相比具有价格低廉、操作简便、不产生二次污染物等突出优势^[22-26]。

植物修复法主要是利用植物和根际土著微生物共同作用对环境中的污染体进行处理。魏广芝^[27]等人的实验表明，几乎水体中所有的铀都能富集于植物的根部，植物根部先吸收放射性核素，再进行内部的转化。

微生物治理低放射性废水是新工艺，国内外用微生物方法治理含铀废水多处于研究阶段^[28]。美国学者发现^[29]，一种名为 *Geobacter sulfurreducens* 的细菌能够去除水中溶解的铀，通过向金属离子提供电子，使金属离子还原，从而降低金属在水中的溶解度并让之以固体的形式沉淀下来，达到浓缩分离的效果。Ferreira^[30]研究发现，椰子纤维这种低成本的生物吸附剂可以有效去除放射性核素，将椰子纤维添加到含有天然铀、²⁴¹Am 和 ¹³⁷Cs 的有机溶液中进行吸附试验，利用电感耦合等离子体发射光谱法和 γ 光谱法测定溶液中放射性核素的残留浓度，再利用最大实验吸附量、等温线和动力学三元模型对实验结果进行评估，结果表明活性椰纤维可有效吸附有机废液中的铀、²⁴¹Am 和 ¹³⁷Cs 等核素。随着生物技术的发展和微生物与金属之间作用机制的深入研究，

生物处理放射性废水技术是一种极具前景的研究技术。特别是利用微生物菌体作为生物处理剂，吸附、富集废水中的放射性核素，效率高、成本低、耗能少，可以实现对放射性废液的减容降级作用^[31-33]。但是必须考虑到植物修复法的时间周期长、对核素的选择性较高、微生物法产生的生物淤泥处理难度较大等缺点。

3.3 MVR 热泵蒸发浓缩系统

传统的蒸发设备大多采用单效或多效蒸发器，二次蒸汽无法回收，余热利用效率低，导致蒸发过程能耗较高，并存在结垢、腐蚀等缺点。MVR 热泵蒸发浓缩技术将从原料液蒸发出来的二次蒸汽通过压缩机压缩，提升热焓后再通过蒸汽发生器壳侧加热原料液，回收余热、降低能耗，由于是温和蒸发，换热管壁面不易结垢。将 MVR 热泵技术应用在放射性废液处理方面是一个全新的途径。侯超^[34]等人搭建试验系统，以含放射性同位素的硝酸铯和硝酸钴溶液为原料进行模拟试验，发现 MVR 热泵蒸发浓缩系统运行稳定，去污能力强，去污因子高达 1500。同时具有较好的浓缩性能，处理前后浓缩比达 10^2 数量级。

3.4 泡沫分离技术

在核电运行及核燃料循环的各个环节中会产生大量含有金属离子的放射性废液，传统的处理方法普遍存在投资大、处理效果差等缺点。近年来将泡沫分离技术运用在去除放射性废液中微量金属离子是一个热点。放射性废液中的金属离子与加入的化学试剂形成沉淀物或与加入的表面活性剂形成配合物被泡沫带出，该过程的主要影响因素包括活性剂的种类及浓度、溶液的 pH 值和气体流量的大小。国内外学者进行了相关研究，矫彩山^[35]利用泡沫分离技术进行模拟实验，研究了影响泡沫分离去除金属离子的影响因素，针对不同的废液确定最佳的泡沫分离设备、活性剂浓度及气体流量，水中的 Sr 和 Cs 去除率均在 99% 以上。

4 结束语

在放射性废液处理方面，传统的蒸发法、离子交换法等放射性废液处理技术仍然具有不可比拟的优势，发展较为成熟，工艺路线基本确定，应用最为广泛。在面对不同的废液类型及越来越高的处理需求时，许多学者从设备、工艺流程、

优化参数、研发材料等方面着手研究,在传统技术的基础上衍生出一些如桶内干燥、CEDI、MVR热泵蒸发浓缩等新技术。而膜处理技术作为辅助处理方法发展迅猛,在工艺路线组合、新型膜材料的研发及与传统方法集成技术研究等方面有了很大的突破。有机废液处理的问题仍待解决,有关处理方法的机理及如何保证装置长期稳定运行、实现更大规模应用有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 孙东辉,陈式,褚凤官.放射性废物管理规定:GB 14500-2002[S].北京:国家质量监督检验检疫总局,2003:5-7.
- [2] 姜圣阶,任凤仪,等.核燃料后处理工学[M].北京:原子能出版社,1995:294-297.
- [3] 尉凤珍,方向红.真空蒸发浓缩装置在核放射性废水处理中的应用试验[J].工业水处理,2009,29(09):62-65.
- [4] 胡厚仁,胡建达,徐志成.中放废液的远红外蒸发处理技术研究[J].核技术,1984(01):43-45,75.
- [5] 万嘉瑜,张明辉.桶内干燥技术在放射性废液处理中的应用[J].山东化工,2017,46(24):130-131,134.
- [6] 车建业.无机离子交换在放射性废液处理中的应用[J].化工管理,2016(12):96.
- [7] 刘建伟,杜美启.EDI装置的原理和应用[J].新技术新工艺,2001,11:22-24.
- [8] LIU L, LI F, ZHAO X, et al. Low-level radioactive waste water treatment by continuous electrodeionization[J]. Qinghua Daxue Xuebao, 2008, 48: 1012-1014.
- [9] 坂田贞弘(日).放射性废物处理处置的研究开发[M].北京:中国环境科学出版社,1988:294-297.
- [10] 赵素芬,史梦洁,安小刚,等.零价铁处理含铀废水的试验研究[J].工业水处理,2011,31(7):71-73+77.
- [11] 蔡英茂,刘桂芳.利用中和沉淀法就地处理包头市放射性废物库废水[J].辐射保护,2003,23(5):315-317.
- [12] 张维润,樊熊.膜分离技术处理放射性废水[J].水处理技术,2009,35(10):1-5.
- [13] 杨庆,侯立安,王佑君.中低水平放射性废水处理技术研究进展[J].环境科学与管理,2012,31(3):7-11.
- [14] GAO Y, ZHAO J, G ZHANG G, et al. Treatment of the wastewater containing low-level ^{241}Am using flocculation-microfiltration process[J]. Separation and Purification Technology, 2004, 40(2): 183-189.
- [15] 杜志辉,贾铭椿,王晓伟.复合反渗透膜对模拟放射性废水的脱盐性能研究[J].水处理技术,2011,36(12):23-29.
- [16] 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(03):219-224.
- [17] 陆晓峰,楼福乐.用反渗透处理放射性废水实验[J].水处理技术,1988,14(3):181-185.
- [18] 侯立安,左菊.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.
- [19] 严静.过渡金属铁氰化物膜电极处理模拟核电厂含 Cs^{+} 放射性废液研究[D].上海:华东理工大学,2018.
- [20] AVRAMENKO V, DOBRZHANSKY V, MARININ D, et al. Novel technology for hydrothermal treatment of npp evaporator concentrates[C]. Bruges, Belgium: the ICEM2007-11th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management(PART B), 2007.
- [21] RAHMAN R O A, IBRAHIUM H A, HUNG Y T. Liquid radioactive wastes treatment: A Review[J]. Water, 2011, 3(4): 551-565.
- [22] Zhu Y G, Shaw G. Soil contamination with radionuclides and potential remediation[J]. Chemosphere, 2000, 41(1): 121-128.
- [23] 田军华,曾敏,杨勇,等.放射性核素污染土壤的植物修复[J].四川环境,2007,26(5):93-96.
- [24] DUSHENKOV S. Trends in phytoremediation of radionuclides[J]. Plant and Soil, 2003, 24(9): 167-175.
- [25] VANEK T, SCHWIT J P. Phytoremediation inventory[J]. Czech Republic, 2003(80): 219-241.
- [26] NRIAGO J O, PACYNA J M. Quantitative assessment of world wide contamination of air, water and soil by trace metals[J]. Nature, 1988, 333(2): 134-139.
- [27] 魏广芝,徐乐昌.低浓度含铀废水的处理技术及其研究进展[J].铀矿冶,2007,26(2):90-95.
- [28] 李小燕,张叶.放射性废水处理技术研究进展[J].铀矿冶,2010,29(3):153-156.
- [29] 佚名.美国发现可对放射性废物进行生物处理的细菌[J].国外核新闻,2004(5):32-33.
- [30] FERREIRA R V P, SILVA E A, CANEVESI R L S, et al. Application of the coconut fiber in radioactive liquid waste treatment[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2018, 15(8): 1629-1640.
- [31] 王建龙.微生物与铯的相互作用及其在放射性核素污染环境修复中的应用潜力[J].核技术,2003,26(12):949-955.
- [32] 王建龙,陈灿.微生物还原放射性核素研究进展[J].核技术,2006,29(4):286-290.
- [33] 陈灿,王建龙.酿酒酵母对放射性核素铯的生物吸附[J].原子能科学技术,2008,42(4):308-312.
- [34] 侯超,张化福,张钰,等.核电站放射性废液处理过程采用机械蒸汽再压缩技术特性研究[J].现代化工,2018,38(02):158-161.
- [35] 矫彩山.泡沫分离技术处理放射性废液的研究进展[C].赤峰:中国核学会核化学与放射化学分会,2010.

(责任编辑:孙凯)