

# 真空膜蒸馏技术的工艺条件优化及其在深度净化低放含铀废液中的应用

胡欣扬<sup>1,2</sup> 董发勤<sup>1,2,3</sup> 聂小琴<sup>3,4</sup> 刘畅<sup>1,4</sup>

(1. 西南科技大学环境与资源学院 四川绵阳 621010; 2. 西南科技大学固体废物处理与资源化教育部重点实验室 四川绵阳 621010; 3. 西南科技大学核废物与环境安全省部共建协同创新中心 四川绵阳 621010; 4. 核废物与环境安全国防重点学科实验室 四川绵阳 621010)

**摘要:**采用聚四氟乙烯(PTFE)中空纤维膜组件开展了真空式膜蒸馏(VMD)处理模拟及真实低放含铀废液试验。对膜组件运行参数进行了优化,考察了料液温度、流速及真空度对膜通量和截留效果的影响,并探讨了VMD过程中的温差极化效果,同时研究了VMD处理核燃料元件生产工艺低放含铀废液的可行性。结果表明:实验室工况条件下,温度为75℃,流速0.30 m/s,真空度为-0.090 MPa为较佳的工艺条件,此时膜通量为 $2.2 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ;针对模拟和真实废液,铀的截留率始终大于99.99%,剩余浓度小于 $1 \mu\text{g/L}$ ,出水铀浓度可一次性满足国家排放标准(GB 23727—2009)。说明VMD对于核燃料元件生产过程中产生的复杂体系低放废液具有高效的净化效果,可供核工业低放废液的深度净化参考。

**关键词:**低放废液 真空式膜蒸馏 温度极化 深度净化

**中图分类号:**TL99 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-8755(2020)02-0001-06

## Experimental Research of Vacuum Membrane Distillation Technology for Deep Purification of Low-level Uranium-containing Wastewater

HU Xinyang<sup>1</sup>, DONG Faqin<sup>1,2</sup>, NIE Xiaoqin<sup>1</sup>, LIU Chang<sup>1,2</sup>

(1. School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China; 2. Key Laboratory of Solid Waste Treatment and Resource Recycle, Ministry of Education of China, Mianyang 621010, Sichuan, China; 3. National Collaborative Innovation Center for Nuclear Waste and Environmental Safety, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China; 4. National Defense Key Discipline Laboratory of Nuclear Waste and Environmental Security, Mianyang 621010, Sichuan, China)

**Abstract:** Polytetrafluoroethylene (PTFE) hollow fiber membrane module was used for vacuum membrane distillation (VMD) treatment simulation and real low-level uranium-containing wastewater. Firstly, the operating parameters of the membrane module were optimized, and the effects of feed temperature, velocity and vacuum degree on the flux and rejection of the uranium were investigated. The effect of temperature difference polarization in the VMD process was discussed. Then, the production of nuclear fuel elements by VMD processing was studied. Subsequently, the feasibility of VMD for the treatment of low-level uranium-containing wastewater in the production process of nuclear fuel elements was studied. The results show

收稿日期:2020-03-16

基金项目:国家自然科学基金项目(41877323);四川省科技计划项目(2019YFG0321);西南科技大学研究生创新基金项目(18ycx039)

作者简介:第一作者,胡欣扬(1993—),女,硕士研究生,E-mail:136472174@qq.com;通信作者,董发勤(1963—),男,教授,研究方向为环境矿物学、新生环境污染物安全与调控,E-mail:fqdong@swust.edu.cn;通信作者,聂小琴(1985—),女,副研究员,研究方向为放射性废水处理、核素与生物的界膜作用,E-mail:xiaoqin\_nie@163.com

that at a temperature of 75 °C, a velocity of 0.30 m/s, and a vacuum of -0.090 MPa under the laboratory conditions, the permeate flux is  $2.2 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ . For simulated and real wastewater, the uranium rejection rate is always greater than 99.99%. The remaining concentration is less than  $1 \mu\text{g/L}$ , and the uranium concentration in the effluent can meet the national emission standard at one time (GB 23727—2009). Such results suggest that VMD has a high-efficiency purification effect on the low-level wastewater in the complex system produced during the production of nuclear fuel elements, and can provide new ideas and data references for the deep purification of low-level wastewater in the nuclear industry.

**Keywords:** Low-level radioactive wastewater; Vacuum membrane distillation; Temperature polarization; Deep purification

随着清洁能源的大力发展,对核能的利用成为一种必然趋势。核能可持续发展过程中,铀矿采冶转化与浓缩、核燃料元件制造、核电站运行、乏燃料后处理和放射性同位素生产与应用等环节都会产生大量的放射性废液,其中低放废液是核燃料循环及核能利用过程中产生最多、体积最大的一种放射性废液。低放废液主要分为两类,一是核动力反应堆及研究堆运行、核燃料后处理等过程产生的痕量多核素低放废液,另一类就是核燃料循环前端,主要为含铀低放废液,相比后端多核素体系,前端低放废液铀质量浓度相对较高,放射性活度较低,产生量大。核燃料生产是最为关键的环节之一<sup>[1]</sup>,在核燃料元件厂的加工、生产以及利用过程中,将产生大量以铀为主,同时含氟、氨、有机物和悬浮物等多种杂质组分的低放废液<sup>[2]</sup>。铀具有放射性及化学毒性,威胁着人类健康以及自然生态环境<sup>[3]</sup>,目前随着国家对废液排放标准要求逐步提高,现行主要采用的老三段(絮凝沉降、蒸发浓缩、离子交换)处理工艺无法保证废液持续达标排放,且存在能耗高、吸附材料循环利用次数少、二次废物(树脂和硅胶等)大量堆积难以降解和处理等问题<sup>[4]</sup>。因此,有必要大力开发和研究新的低放废液深度净化技术。

膜分离技术具有出水水质好、去污系数大、操作简便、设备简单等优点<sup>[5]</sup>,是一种含铀放射性废液处理的新方法。作为从含铀废水中浓缩和生产蒸馏水的另一种新兴膜技术,膜蒸馏是一种以疏水微孔膜为介质,以膜两侧蒸汽压差为驱动力的非等温物理分离技术<sup>[6-7]</sup>。与其他传统处理工艺相比,膜蒸馏在放射废液处理领域具有较为明显的优势:(1)与传统工艺相比,膜蒸馏具有更为简便的装置,占地面积小<sup>[8]</sup>;(2)膜蒸馏具有较低的工作压力和温度,操作简单安全<sup>[9-10]</sup>;(3)在使用低品位余热的情况

下,膜蒸馏装置具有相对较低的能耗<sup>[11]</sup>。

根据馏出液在冷侧收集方式的不同,膜蒸馏通常分为4种类型:直接接触式膜蒸馏(DCMD)、气隙式膜蒸馏(AGMD)、气扫式膜蒸馏(SGMD)和真空式膜蒸馏(VMD)<sup>[12]</sup>。真空膜蒸馏与其他膜蒸馏方式相比,VMD装置具有更高的渗透通量和更小的设备体积,并且跨膜的传导热损失在VMD中几乎可以忽略不计<sup>[13-14]</sup>。已有部分学者开展了关于膜蒸馏处理放射废液的相关研究。段小林等<sup>[15]</sup>研究了VMD过程对模拟含铀废液的处理效果,铀截留率大于99%。金畅<sup>[16]</sup>探究了SGMD过程对含模拟铯钡放射性废水的处理效果,去除率在99.9%以上。文霞等<sup>[17]</sup>采用DCMD装置对模拟铯钡放射性废液进行处理,结果表明料液温度的变化对膜通量的影响最大。前期研究者们主要对低放废液中的一些主要核素做了模拟研究,研究对象均为配置的单一核素模拟放射性废液,未开展对真实的含铀低放废液的研究。真实废液由于体系共存多种阴阳离子和有机物,成分较为复杂,因此有必要针对真实废液体系开展膜蒸馏技术及装置的验证试验和工艺优化研究。

本工作在自主组装VMD装置的前提下,考察装置在不同运行条件下对模拟和真实低放射性废液中铀的去除效果,并探究VMD过程的极化现象,以为VMD在核燃料循环体系中的低放废液深度净化提供数据参考。

## 1 实验部分

### 1.1 主要试剂与仪器

硝酸铀酰( $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ ),分析纯,湖北楚盛威化工有限公司;去离子水,电导率小于 $10 \mu\text{S/cm}$ ,自制;聚四氟乙烯(PTFE)中空纤维膜,东阳市汉宸膜技术有限公司。微量铀分析仪,杭州大吉光电仪器

有限公司;pH计,上海雷磁仪器有限公司;电导率仪,上海三信仪表厂;台式分光光度计,美国哈希公司。

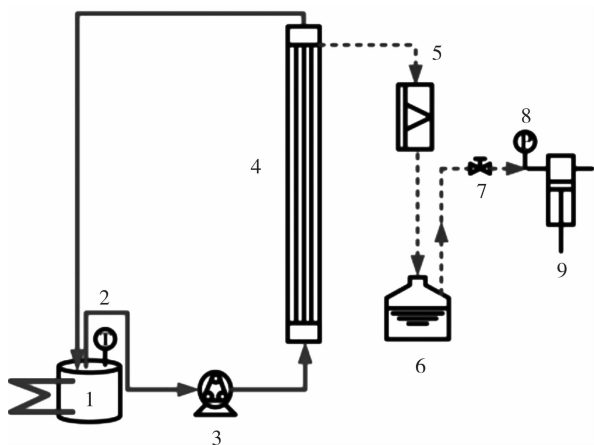
### 1.2 VMD 装置介绍

本研究使用膜为疏水 PTFE 中空纤维膜。膜丝内径与膜厚度采用光学显微镜测试法测定,平均膜孔径采用泡点压力法测得,膜孔隙率测定采用重量法,膜表面的接触角通过表面张力仪测定。膜材质和组件参数如表 1 所示。将中空纤维膜丝用环氧树脂胶封装于圆柱形膜元件内,膜元件的长度为 56 cm,每个膜元件内装入膜丝 50 根,有效膜面积为  $0.11 \text{ m}^2$ 。VMD 装置为自主搭建的实验装置,流程示意图如图 1 所示。

表 1 膜材质和组件主要指标

Table 1 Main indicators of membrane materials and components

材料或组件	参数	参数值
膜材料	外径/mm	2.18
	内径/mm	1.35
	孔隙率/%	27.4
	接触角/(°)	104.22
膜组件	膜孔径/ $\mu\text{m}$	0.22
	长度/mm	560
	膜丝数量	50
	有效面积/ $\text{m}^2$	0.11
	外壳材质	塑料



1 - 料液罐, 2 - 温度计, 3 - 蠕动泵, 4 - 膜组件, 5 - 冷凝器, 6 - 馏出液收集瓶, 7 - 阀门, 8 - 压力表, 9 - 真空泵

图 1 VMD 实验装置流程示意图

Fig. 1 Graphic diagram of VMD experimental setup

运行前,将料液加入料液罐中并加热至所需温度。待温度稳定后,通过蠕动泵以管程(膜丝内表

面)的方式将热侧料液泵入膜组件。在膜两侧蒸气压差的推动下,料液在壳程(膜丝外表面)形成的水蒸气通过冷凝并带出膜组件。产生的冷凝液(即产水)到达冷凝装置并流至馏出液罐中。

为验证装置有效性,实验采用自来水为料液,以电导率反映膜蒸馏装置有效性。自来水原水电导率为  $480 \mu\text{S}/\text{cm}$ ,每隔 2 h 测量一次原水电导率以及产水电导率,如图 2 所示,随着时间增加,馏出液电导率由  $10 \mu\text{S}/\text{cm}$  降低至  $3 \mu\text{S}/\text{cm}$ ,电导率所反映的去除率达到 99.3% 以上。膜蒸馏装置对于自来水中的离子具有较好的净化效果。

料液中铀的质量浓度均为  $20 \text{ mg}/\text{L}$ ,采用去离子水配制。料液和产水中铀的浓度均采用铀微量分析仪测量。

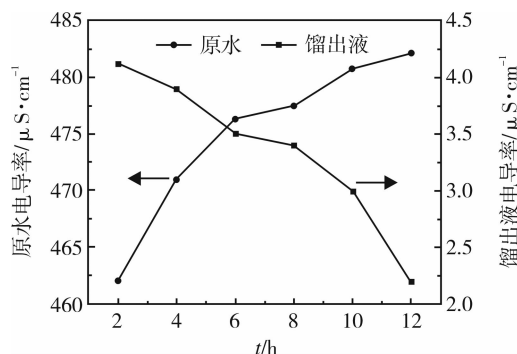


图 2 自来水 VMD 实验电导率变化

Fig. 2 Electrical conductivity change of tap water VMD experiment

### 1.3 主要考察指标

装置的产水速率采用膜通量( $J$ )来衡量, $J$ 表示单位时间单位膜面积的水蒸气通量( $\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ),如式(1)所示:

$$J = \frac{\Delta V}{A \Delta t} \quad (1)$$

式中: $\Delta V$ 为  $\Delta t$  时间内收集的产水体积(L); $\Delta t$ 为时间间隔(h); $A$ 为膜组件内的有效膜面积( $\text{m}^2$ )。

装置对目标元素的截留效果采用截留率( $R$ )来衡量。 $R$ 表示膜截留的溶质量占溶液中该溶质总量的百分率,具体表示为:

$$R = \left(1 - \frac{C_p}{C_0}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中  $C_p$  和  $C_0$  分别表示产水和料液中目标元素的质量浓度( $\text{mg}/\text{L}$ )。

温度极化是影响膜通量的一个关键因素,VMD

过程的温度极化可以采用 TPC 进行衡量, TPC 可通过式(3)计算得到:

$$\text{TPC} = \frac{T_{\text{fm}}}{T_f} \quad (3)$$

式中,  $T_{\text{fm}}$  为膜表面温度 (K);  $T_f$  为料液温度 (K)。TPC 越大, 说明膜表面与进料温度温差越小, 温差极化效果弱。

#### 1.4 工艺条件对净化效果的影响

每次改变工艺条件时, 使系统稳定一段时间后开始计时, 每隔 10 min 分别取料液和馏出液, 检测馏出液铀含量, 所有数据至少平行测量 3 次。再按式(1)、式(2)计算膜通量 ( $J$ ) 和截留率 ( $R$ )。

#### 1.5 膜蒸馏处理核燃料工厂废液

取某核燃料工厂废液作为料液, 原水主要指标如表 2 所示。pH 值通过 pH 计进行测量, 电导率由电导率仪测定, 铀成分浓度利用微量铀分析仪进行测量, COD 与氨氮通过台式分光光度计测量。放射性废水含有较多悬浊物, 因此用 0.45  $\mu\text{m}$  滤头预处理后进行膜蒸馏(过滤前原水铀浓度为 16.65 mg/L)。用电导率仪和微量铀分析仪测量不同时间点馏出液的电导率与铀浓度。

表 2 废水水质过滤后主要参数指标  
Table 2 Main parameters of wastewater quality after filtration

参数	参数值
pH 值	9.7
电导率/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	36 100
$\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	82 00
$\text{U}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	13.63
$\text{COD}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1 038

## 2 结果与讨论

### 2.1 运行条件对膜通量的影响

#### 2.1.1 热侧温度对膜通量的影响

在料液流速 0.30 m/s、质量浓度为 20 mg/L、真空度 -0.090 MPa 时, 研究不同料液温度 (55 ~ 75  $^{\circ}\text{C}$ ) 对膜通量及截留率的影响, 结果如图 3 所示。在料液流速及真空度一定时, 当温度升高时, 膜通量增加, 截留率保持稳定 (99.98%)。在料液温度 75  $^{\circ}\text{C}$  时, 膜通量为 2.62  $\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。根据 Antoine 公式, 温度升高, 导致进料侧水蒸气在膜上的分压和渗透跨膜的驱动力升高, 膜通量增加。然而由膜引起的

热传导量也增加了, 导致温度不能无限制增加。综合考虑能量利用与疏水膜材料使用寿命, 料液温度选择 75  $^{\circ}\text{C}$  比较合适。

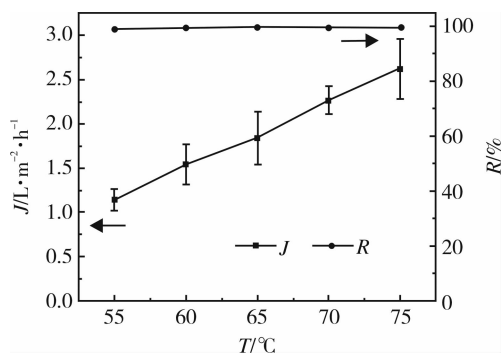


图 3 温度对 VMD 过程膜通量与截留率的影响  
Fig. 3 Effect of temperature on permeate flux and rejection during VMD

#### 2.1.2 料液流速对膜通量的影响

在热侧料液温度 75  $^{\circ}\text{C}$ , 质量浓度 20 mg/L, 真空度 -0.090 MPa 时, 测量料液流速 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 m/s 时膜通量与截留率的变化, 结果如图 4 所示。由图 4 可知, 当流速开始增加时, 膜通量也显著增加, 膜通量最大为 2.65  $\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。此时进料流速的增加比较明显。这是因为在热侧膜的表面上存在边界层, 边界层对膜蒸馏的传质具有一定的抵抗力。边界层越薄, 传质阻力越小, 膜通量增加越迅速。进料流量的增加加速了膜组件中进料的流动, 削弱了膜表面上的边界层, 这可以在一定程度上增加热侧膜表面上水蒸气的饱和蒸气压, 从而增加跨膜传质的驱动力, 提高膜通量。

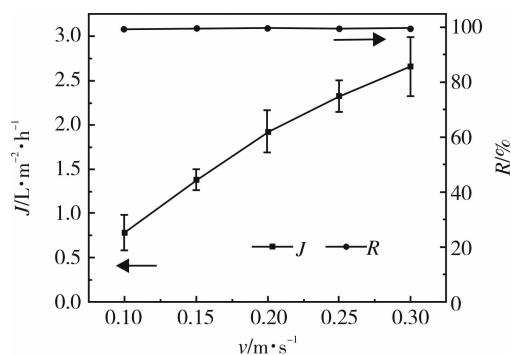


图 4 料液流速对 VMD 过程膜通量与截留率的影响  
Fig. 4 Effect of velocity on permeate flux and rejection during VMD

#### 2.1.3 真空度对膜通量的影响

在进料流速为 0.30 m/s, 进料温度为 75  $^{\circ}\text{C}$ , 料液中铀的质量浓度为 20 mg/L 条件下, 研究了真空度对

膜通量和铀截留率的影响,结果示于图5。可以看出,随着真空侧压力的增加,膜通量升高,当真空压力为 $-0.090$  MPa时,最佳膜通量为 $2.61 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。真空侧压力的增大提高了跨膜压差,导致膜通量上升。也就是说,由于真空侧压力的增大,水易蒸发汽化成水蒸气,膜通量也随之升高。该实验条件下取真空侧压力为 $-0.090$  MPa,铀截留率超过99.98%。

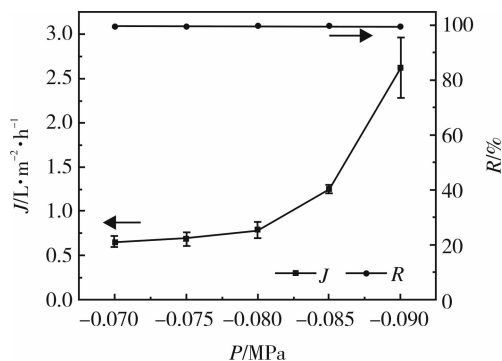


图5 真空度对VMD过程膜通量与截留率的影响

Fig. 5 Effect of vacuum degree on permeate flux and rejection during VMD

## 2.2 VMD过程的温度极化现象

### 2.2.1 料液温度对VMD温度极化的影响

在进料流速为 $0.30 \text{ m/s}$ ,真空度为 $-0.090$  MPa时,计算了不同料液温度下的TPC值和传热系数 $h_f$ ,TPC和传热系数 $h_f$ 随温度的变化如图6所示。

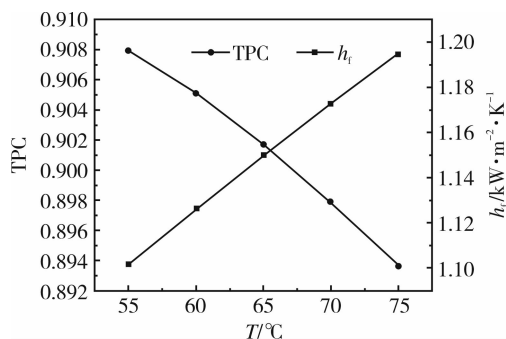


图6 TPC与传热系数 $h_f$ 随料液温度的变化趋势

Fig. 6 Variation trend of TPC and  $h_f$  with feed temperature

从图6可知,随着温度的升高,TPC值由0.91降低至0.90以下,同时对流传热系数 $h_f$ 有所上升,根据 Antoine 方程可得,随着温度的升高,膜表面的饱和蒸汽压也随之升高,提高了膜通量,汽化组分带走的热量增大,但同时边界层热量补充的速率并没有随着温度增加而大幅增加,导致 TPC 会随着温度的升高而小幅下降。

### 2.2.2 料液流速对VMD温度极化的影响

在进料温度为 $75 \text{ }^\circ\text{C}$ ,真空度为 $-0.090$  MPa时,计算了在不同料液流速下的 TPC 值和传热系数 $h_f$ ,TPC 和传热系数 $h_f$ 随料液流速的变化如图7所示。

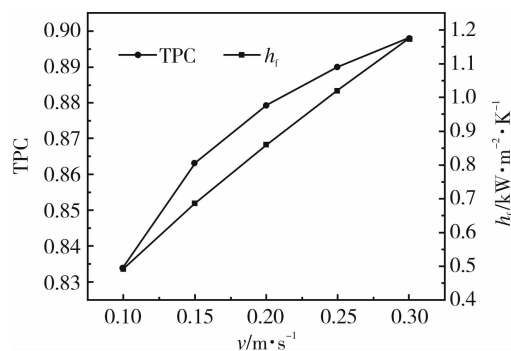


图7 TPC与传热系数 $h_f$ 随料液流速的变化趋势

Fig. 7 Variation trend of TPC and  $h_f$  with feed velocity

从图7可看出,随料液流量的增大,TPC由0.83增加至0.90左右,对流传热系数 $h_f$ 也随之增大,削弱了温差极化。由于料液的流速增大,膜表面与流体之间的边界层变薄,同时边界层内的对流传热速率也加快,由冷凝汽化带走的热量得到及时补充,因此膜侧表面与料液温度之间的温差减小,有利于膜蒸馏传质的进行。

### 2.2.3 真空度对VMD温度极化的影响

在进料温度为 $75 \text{ }^\circ\text{C}$ ,进料流速为 $0.30 \text{ m/s}$ 时,计算了不同真空度下的 TPC 值和传热系数 $h_f$ ,TPC 和传热系数 $h_f$ 随真空度的变化如图8所示。

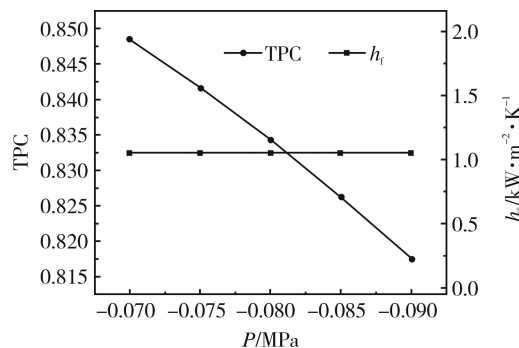


图8 TPC与传热系数 $h_f$ 随真空度的变化趋势

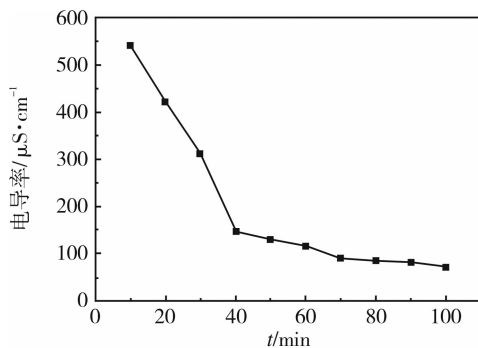
Fig. 8 Variation trend of TPC and  $h_f$  with vacuum degree

从图8可以看出,随着冷侧真空度增加,TPC逐渐减小,从0.85下降到0.81左右,加重了温度极化现象,而对对流传热系数 $h_f$ 几乎没有影响。随着真空度的增大,跨膜传质压力也随之增大,提高了膜通

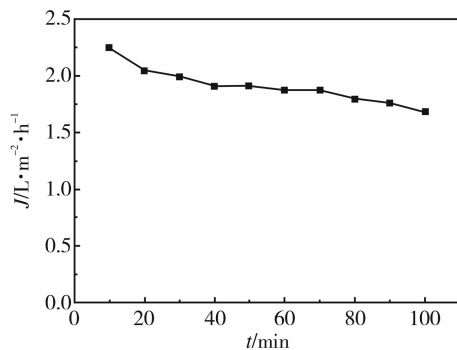
量,然而被冷侧汽化带走的热量也相应增加,同时热侧膜的对流传热系数并不会随着真空度的增大而增加,意味着边界层的热量不能得到及时补充,导致膜侧温度与料液温度的温差逐渐变大。因此随着真空度的增加,温度极化现象变得更为显著。

### 2.3 真实废液处理效果

VMD过程中,在热侧料液温度 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,料液流速 $0.30\text{ m/s}$ ,真空度 $-0.090\text{ MPa}$ 情况下,利用真空膜蒸馏装置对真实含铀废水进行处理,膜通量及电导率随时间变化的结果如图9所示。



(a) 电导率随时间变化情况



(b) 膜通量随时间变化情况

Fig. 9 电导率与膜通量随时间的变化趋势

Fig. 9 Variation trend of produced water conductivity and permeate flux with time

从图9可以看出,在实验开始时,膜通量为 $2.2\text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ,初始 $10\text{ min}$ 处理后馏出液电导率为 $541\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ 。随着时间的延长,到第 $40\text{ min}$ 时,膜通量有轻微下降,而电导率快速下降至 $100\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下。处理 $60\text{ min}$ 后,膜通量保持在 $1.91\text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 左右。当VMD设备运行至 $100\text{ min}$ 时,膜通量保持在 $1.4\text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ,且电导率降至 $70\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下。与之前的工艺优化实验相比,VMD在实际废水处理实验中显示出稍低的膜通量,这是由于废水的复杂性所致。与工艺优化的实验相比,废水水质更为

复杂,水的饱和蒸汽压降低,并且穿过膜的驱动力降低,导致膜通量降低。

真实废水中所含的放射性核素是铀。通过对在实验中定时取样的馏出液样品进行检测,铀浓度均低于 $1\text{ }\mu\text{g}/\text{L}$ ,如表3所示,出水远低于国家排放标准(GB 23727—2009),去除率大于 $99.99\%$ 。这与此前工艺条件优化测试中的铀去除率相似。与原始废水相比,出水的水质得到了改善。馏出物的电导率为 $60.1\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ ,去除率为 $99.8\%$ 。馏出液 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 与COD最终浓度均小于 $20\text{ mg}/\text{L}$ 。

表3 废水中铀浓度随时间变化趋势

Table 3 Variation trend of Uranium concentration in wastewater with time

$t/\text{min}$	20	40	60	80	100
铀浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}$	1.97	1.48	1.46	1.12	0.09

## 3 结论

(1) VMD过程中膜通量受料液温度、料液流速以及真空度的影响,实验室工况条件下,较佳的工艺条件为进料温度 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,进料速度 $0.30\text{ m/s}$ ,真空压力为 $-0.090\text{ MPa}$ 。在最佳条件下,VMD对铀最佳膜通量为 $2.65\text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ,截留率均超过 $99.98\%$ 。

(2) VMD传热过程中,温度与真空度增大会促进膜蒸馏的极化现象,而流速则与之相反,流速的增大可以缓解温度极化现象。因此在实际废水中,需要综合考虑工艺条件。

(3) VMD过程对真实核燃料工艺废水中的铀展现出良好的截留效果,去除率达到 $99.99\%$ 以上,剩余铀浓度可一次性排放达标(GB 23727—2009)且不受废水水质中多种组分的影响。本研究为复杂低放废液的深度净化提供了一种新的思路。

### 参考文献

- [1] 何敬柯. 中国核电工业燃料循环及其优化研究[D]. 沈阳:东北大学, 2015.
- [2] 卫燕琪. 阳离子基配体功能化纳米材料合成及铀酰离子高效吸附研究[D]. 江苏苏州:苏州大学, 2015.
- [3] 杨杰. 辐照条件下典型微生物对水溶性核素铀的吸附研究[D]. 四川绵阳:西南科技大学, 2015.

(下转第39页)

- [10] 傅嘉鹏. Eu<sup>3+</sup>掺杂CaTiO<sub>3</sub>荧光粉的制备及其性能的研究[D]. 上海:东华大学,2009.
- [11] 杨武,陈森,高锦章. 镧系配合物的荧光光谱[J]. 光谱学与光谱分析,1999,19(2): 227-229.
- [12] 索罗曼. 红外光谱分析100例[M]. 北京:科学出版社,1991: 101.
- [13] 杨程,刘力,张立群. Eu(Sal)<sub>3</sub>Phen的荧光性能及其合成工艺的研究[J]. 北京化工大学学报,2006,33(1): 68-72.
- [14] 张思远,毕宪章. 稀土光谱理论[M]. 长春:吉林科学技术出版社,1991.
- [15] 张婷. 稀土铈和铽配合物的合成及发光性能的研究[D]. 太原:太原理工大学,2010.
- [16] LI H, JIA Y, QIAO X. Study on synthesis and fluorescent properties of high-temperature resistant terbium complexes using 4-halogenated (F, Cl) benzoic acids as ligands[J]. Chin J Lumin, 2013, 34(1): 54-60.
- [17] 沈新峰. 稀土配合物及其掺杂、包覆材料的制备和发光性能研究[D]. 上海:上海师范大学,2008.

(上接第6页)

- [4] 郭栋清,李静,张利波,等. 核工业含铀废水处理技术进展[J]. 工业水处理, 2019(1): 22-28.
- [5] ZHANG X, GU P, LIU Y. Decontamination of radioactive wastewater: State of the art and challenges forward[J]. Chemosphere, 2019, 215: 543-553.
- [6] ZHANG X, GUO Z, ZHANG C, et al. Exploration and optimization of two-stage vacuum membrane distillation process for the treatment of saline wastewater produced by natural gas exploitation[J]. Desalination, 2016, 385: 117-125.
- [7] LAWSON K W, LLOYD D R. Membrane distillation[J]. Journal of membrane Science, 1997, 124(1): 1-25.
- [8] SWAMINATHAN J, CHUNG H W, WARSINGER D M. Energy efficiency of membrane distillation up to high salinity: Evaluating critical system size and optimal membrane thickness[J]. Applied Energy, 2018, 211: 715-734.
- [9] KHAYET M. Membranes and theoretical modeling of membrane distillation: a review[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2011, 164(1/2): 56-88.
- [10] ASHOOR B B, MANSOUR S, GIWA A, et al. Principles and applications of direct contact membrane distillation (DCMD): A comprehensive review[J]. Desalination, 2016, 398: 222-246.
- [11] ELKINA I B, GILMAN A B, UGROZOV V V, et al. Separation of mineral acid solutions by membrane distillation and thermopervaporation through porous and non-porous membranes[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(26): 8856-8863.
- [12] URAGAMI, TADASHI. Science and Technology of Separation Membranes[M]. John Wiley & Sons, 2017.
- [13] SUN A C, KOSAR W, ZHANG Y, et al. Vacuum membrane distillation for desalination of water using hollow fiber membranes[J]. Journal of Membrane Science, 2014, 455: 131-142.
- [14] 李兆曼,丁忠伟,刘丽英,等. 真空膜蒸馏用于脱除水中氨的传质性能研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2006(2): 23-27.
- [15] 段小林,陈冰冰,李启成. 真空膜蒸馏法处理含铀废水[J]. 核化学与放射化学, 2006(4): 220-224.
- [16] 金畅. 膜蒸馏技术处理放射性废水研究[D]. 湖南衡阳:南华大学, 2015.
- [17] 文霞,伊成龙,赵璇. 直接接触式膜蒸馏技术处理模拟放射性废液[J]. 核化学与放射化学, 2020, 42(1): 44-50.