

# 蒸发浓缩装置在镀铀工艺废水处理中的应用

刘啸尘, 初旭阳, 刘啸晨, 干雨航, 张 谦

(核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149)

**摘要:** 为解决电极镀铀工艺废水的处理问题, 开发了适合该工艺特殊要求的蒸发浓缩装置。该装置通过微负压蒸馏原理将废水中的水分汽化, 冷凝水经检测合格后外排; 蒸发器产生的残渣和固体作为放射性固体废物处理。在装置间设置了防渗基坑, 用来处理设备失效或应急淋浴问题; 蒸发浓缩装置采用中和罐调节废水酸碱度, 并加装检测口, 确保冷凝水符合标准后排放。

**关键词:** 废水处理; 镀铀工艺; 蒸发

**中图分类号:** TL941 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2025)01-0138-06

**DOI:** 10.13426/j.cnki.yky.2024.04.17

电极镀铀是利用电沉积法(电镀法)将<sup>235</sup>U制作成镀层的工艺, 该工艺以有机溶剂为电解液载体, 通过外加电压形成相对稳定的电场<sup>[1]</sup>; 电解液中的铀系离子在电场作用下, 向阴极迁移, 并沉积在阴极表面形成薄膜。电极镀铀具有沉积效率高、镀层均匀牢固、设备简单、条件易于控制、可在各种结构复杂的基体上均匀沉积等优点, 在铀系元素制靶方面应用广泛<sup>[2-4]</sup>。

对于中低放水平的废水, 一般的处理方法是将大部分的放射性核素转移到小体积的浓缩液中<sup>[5]</sup>, 即“净化浓缩, 减容固化”<sup>[6]</sup>。目前的蒸发浓缩处理技术有单效蒸发、多效蒸发、MVR热泵蒸发等, 蒸发流程不同, 适应的场景也不同。单效蒸发或多效蒸发目前应用较多, 能耗较高, 对二次蒸汽无法回收, 余热利用率低<sup>[7-8]</sup>。MVR则采用机械蒸汽再压缩技术, 可回收余热, 降低能耗<sup>[9]</sup>。废水的酸碱性以及要求的放射性核素处理效果都会影响整体工艺流程的选择。

电极镀铀工艺产生的放射性废水, 不可直接外排, 一般采用实验室设备蒸发浓缩, 将废水减容成渣, 放射性核素浓缩在渣中, 得到较为清洁的蒸汽。这种方法对不同核素的去污系数一般在 $10^3 \sim 10^6$ <sup>[10-11]</sup>, 具体去污系数取决于废水的性质、组成和蒸发流程中各种装置的效能<sup>[12]</sup>, 其中单效蒸发器的去污系数可达 $10^4$ , 而多效蒸发器的去

污系数可达 $10^8$ <sup>[13]</sup>。在镀铀工艺废水本身铀质量浓度较低的情况下, 使用最简单的蒸发浓缩装置也可满足去污需求。

目前, 在镀铀工艺废水的蒸发浓缩实际应用中, 蒸发产生的蒸汽中依然含有放射性物质, 如果采用直排处理方式<sup>[14]</sup>, 则存在“无组织排放”问题; 而且实验室规格的设备不能满足安全设计要求, 缺少针对蒸发器破损的处置方案, 当人员受到废水沾污时也无法进行及时处理。

为此, 在充分考虑电极镀铀工艺产生的废水容积小、放射性低、有腐蚀性、可能存在应急淋浴、蒸汽处理等问题基础上, 设计了电极镀铀工艺废水蒸发浓缩装置。

## 1 工艺设计

放射性废水可分为中低放废水和高放废水, 对不同废水的处理方式也不同。本研究主要针对低放废水处理, 采用蒸发浓缩法将低放废水浓缩后, 使其浓缩产物与人的生活环境长期隔离, 再自然衰变<sup>[15]</sup>。

### 1.1 放射性废水

某探测器企业实验室, 在电极镀铀过程中产生的放射性废水主要为电镀废水和冲洗废水, 每次产生的废水量不超过70 L。镀铀工艺每年操作不超过5次, 每年镀铀产生的总废水量约为

收稿日期: 2024-04-28

第一作者简介: 刘啸尘(1990—), 男, 北京人, 学士, 工程师, 主要从事辐射防护与工业安全相关工作。

通信作者简介: 初旭阳(1995—), 男, 江苏南京人, 硕士, 工程师, 主要从事辐射防护与工业安全相关工作。

350 L。该废水主要含 U、草酸氨、氨水、硝酸等,废水中的铀质量浓度为  $1.34 \times 10^{-7}$  g/mL,废水 pH 为 2.0~7.0,废水具有一定腐蚀性。草酸铵年使用量为 1 kg,氨水、硝酸年使用量均为 1 L。

## 1.2 蒸发浓缩工艺

蒸发设备的能耗与待蒸发液体的体积正相关,由于电极镀铀产生的废水量少,故无须采用多效、MVR 等技术降低能耗,采用传统蒸发方式即可。考虑废水的放射性,设置了检测环节,工艺流程设计见图 1。

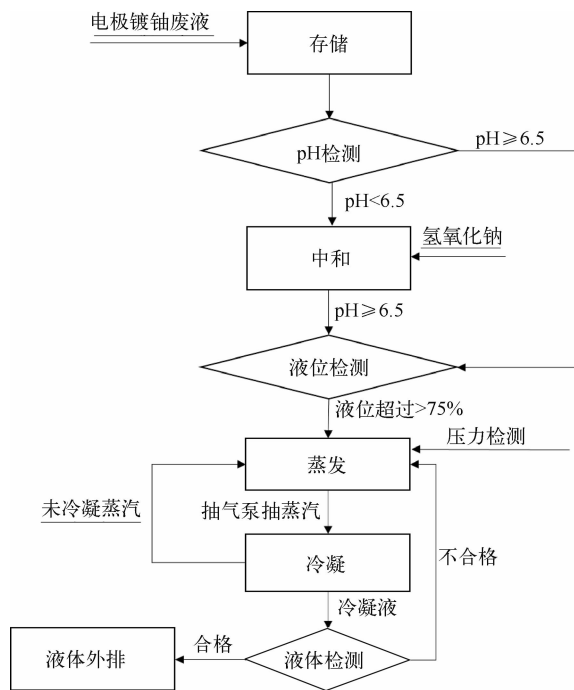


图 1 镀铀废水处理工艺流程图

Fig. 1 Flow chart of uranium plating wastewater treatment process

在蒸发罐前设置缓冲罐,用于收集、贮存镀铀产生的废水。缓冲罐中设置在线 pH 计监测液体的 pH,当缓冲罐内的  $\text{pH} < 6.5$  时,打开中和罐投料口阀门,从中和罐中释放中和剂(氢氧化钠)调节缓冲罐中液体的 pH,使其接近中性。当缓冲罐中的废水量达到罐容积的 75% 时,开启自动蒸发流程。蒸发罐采用电加热方式,通过电控系统开启加热器和抽气泵。抽气泵持续从蒸发罐体抽气体,使蒸发罐内的压力始终小于大气压。同时,抽气泵抽出的气体进入冷凝器中进行冷凝,冷

凝后的液体进入冷凝罐,待检测外排。经过冷凝器后未冷凝的蒸汽,通过管道再返回蒸发罐。

当冷凝罐的冷凝水达到冷凝罐容积的 75% 时,从检测口取样检测液体中相关物质浓度,达到排放标准后可将冷凝罐中的液体排放;如待检测液体的相关物质浓度未达到排放标准,则将冷凝罐液体泵回至缓冲罐,再进行蒸发处理。

在事故应急状态下,工作人员可能沾染镀铀液体需要应急淋浴。通常应急淋浴产生的液体量较大,因此设置应急淋浴废水收集池,用于贮存这部分液体;然后通过抽水泵将贮存的液体打入缓冲罐处理。

## 2 工艺设备设施设计

### 2.1 设备设计

该镀铀工艺过程每年产生废水量约为 350 L。缓冲罐的容积以容纳 1 年的废水量、加 20% 的冗余量为标准进行设计,容积为 437.5 L,缓冲罐设计为  $\phi 0.8$  m 的圆柱体。设计冷凝罐体积与缓冲罐体积相同,在正常情况下冷凝罐中的液体每年检测 1 次,达标后排放;设置备用冷凝罐,用于水质检测不合格或其中一个冷凝罐损坏时使用。

蒸发罐的直段部分为  $\phi 0.8$  m 的圆柱体。蒸发罐罐体采用金属钛材料加工制作,直段部分采用板材卷成筒状,直段的上下部分分别为同等直径的椭圆形封头;直段与封头采用氩弧焊、电焊结合的方式焊接,焊缝通过专业工艺处理,并用氦质谱检漏仪进行检漏和正压测试。蒸发器上设有 DN 150 的清洗法兰口,法兰口用聚四氟乙烯垫片进行密封处理。蒸发罐下部设置 1 套电加热装置,用来加热放射性废水。

主要设备设施见表 1。装置包括智能控制箱、水泵、冷水机、电磁阀、检测仪表等其他配件(图 2)。

表 1 蒸发装置主要设备规格

Table 1 Main equipment dimensions of evaporation device

设备	直径/m	高度/m	容积/L	预留维修距离/m
缓冲罐	0.8	0.7	437.5	0.8
蒸发罐	0.8	0.8	270.0	0.8
冷凝罐 1	0.8	0.7	437.5	0.8
冷凝罐 2(备用)	0.8	0.7	437.5	0.8

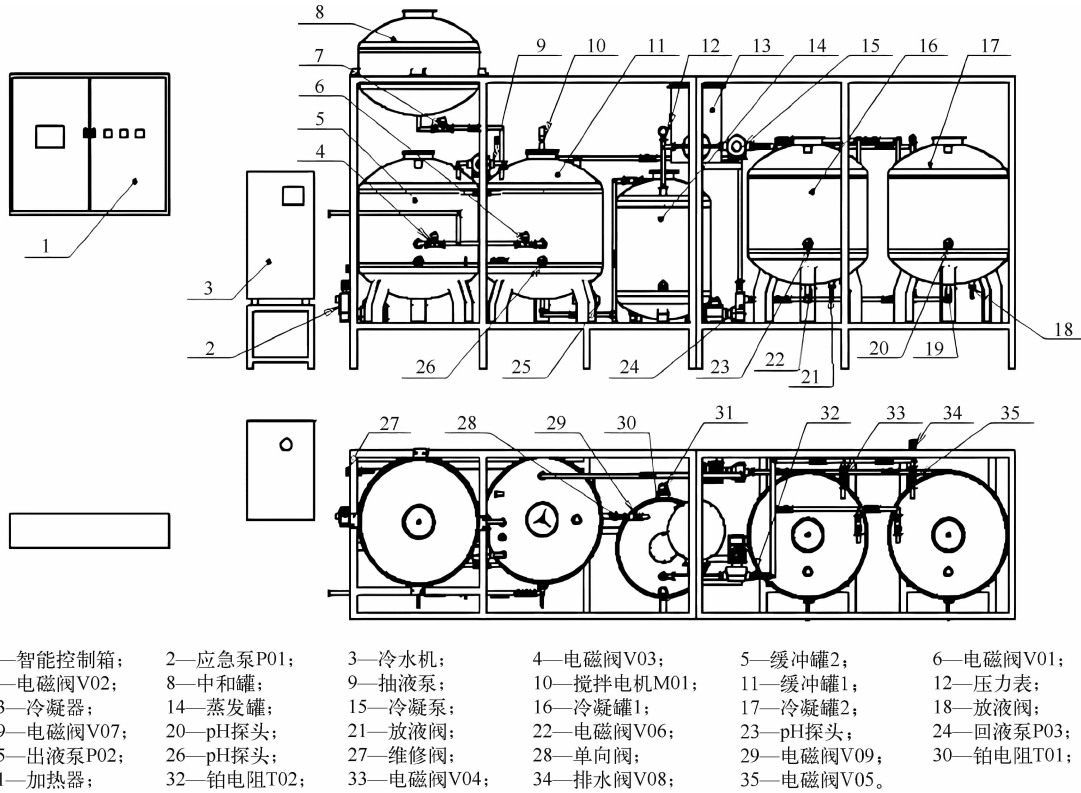


图 2 镀铀废水处理装置整体示意图

Fig. 2 Schematic diagram of uranium plating wastewater treatment device

蒸发浓缩设备共设置 9 个电磁阀,5 台水泵 (其中 2 台隔膜泵)。电磁阀、水泵、冷却系统、加热系统和监测系统均可在系统控制面板的触摸屏上操

作。通过上位机软件输入各控制参数和指令,PLC 接收上位机发送的指令,输出脉冲信号给各元器件,实现所需要的操作流程。系统控制界面见图 3。

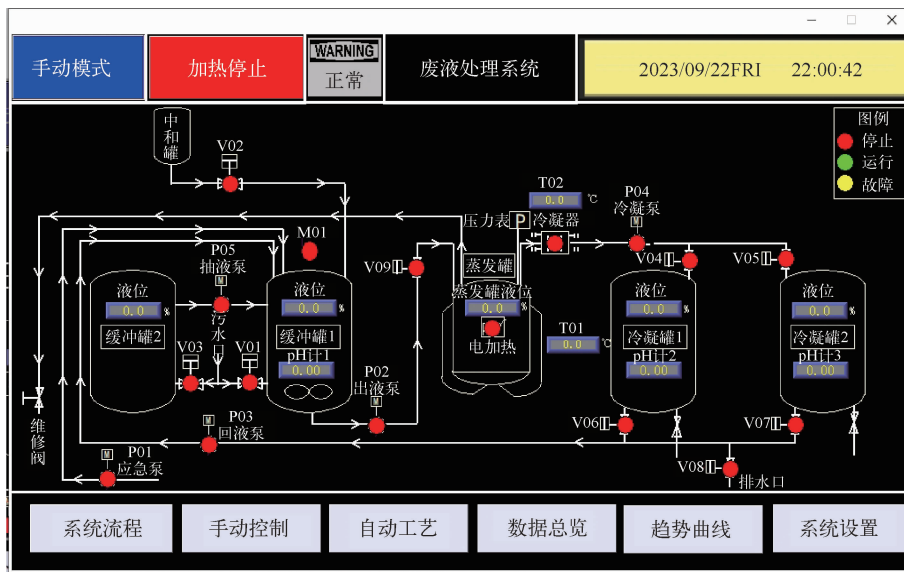


图 3 蒸发装置控制界面

Fig. 3 Control interface of evaporation device

## 2.2 基坑设计

国家各部门、相关行业及企业发布了突发水体污染环境事件相关应急防控技术规范与管理要求,特别明确了事故应急池的建设要求<sup>[16]</sup>。目前,已开展了应急池的相关研究<sup>[17-18]</sup>,并呼吁增强应急池的监督管理。

事故应急设施(应急池)是防控水环境风险的重要公共基础设施<sup>[19]</sup>,主要是为了在发生事故时能有效接纳污染水体<sup>[20]</sup>。镀铀工艺的废水处理设备间宽约2.8 m,长约9.7 m。镀铀工艺废水有一定的放射性和酸性,在设备间设计基坑应急池,用于收集设备失效时的放射性废水和应急喷淋废水,基坑需要防渗。

电镀车间中一般为2人作业,在应急处理情况下可能需要喷淋。根据《眼面部防护应急喷淋和洗眼设备标准》(GB/T 38144.1—2019),单人应急喷淋标准是76 L/min,喷淋15 min。考虑2人同时应急喷淋情况,则应急喷淋水量总计为2 280 L。应急喷淋产生的废水自流至基坑,再通过泵提升至蒸发系统的缓冲罐。在出现应急情况后,冷凝罐和缓冲罐需分批次处理废水,并暂停车间生产;待蒸发系统处理完应急废水并检测合格排放后,再恢复生产。

综合考虑设备尺寸和人员检维修通道,设计基坑尺寸为6.4 m×2.8 m×0.7 m,总容积约为12.54 m<sup>3</sup>,可满足各种应急需要。

## 3 镀铀废水蒸发浓缩装置应用

### 3.1 镀铀废水蒸发浓缩工艺应用效果

将蒸发浓缩装置装配,进行清水试验。整体设备装机功率为30 kW,其中电蒸发器装机功率15 kW。蒸发温度为80℃,真空表显示装置微负压(<0.02 MPa)。试验发现,该装置处理完一罐液体(液体约0.35 m<sup>3</sup>)大约需要1周时间,处理一罐液体的能耗约2 050 kW·h。该装置对液体的处理速度较慢,但由于镀铀工艺产生的废水较少,该处理时间可接受。

该装置用于处理实际镀铀工艺废水,废水的铀质量浓度为0.134 mg/L,蒸发后冷凝液中的铀质量浓度<0.02 mg/L(检测限),净化系数>6.7。由于实际废水铀质量浓度较低,使得净化系数相对较小。该装置对废水的处理效果满足使用需要。

### 3.2 镀铀废水蒸发工艺优点

设计的镀铀废水蒸发工艺对蒸发干燥成渣过程进行了细化,与原直接蒸发处理方式相比,酸碱中和过程采用了PLC自控方式,减少了人工接触;并利用多种仪表对蒸发和排放过程进行监测,其优点如下。

1)蒸发后的水蒸气不再直排。现工艺对水蒸汽进行冷凝,待检测达标后再外排,将核素尽可能地控制在蒸发系统内部,更好地控制了放射性对环境的影响。

2)设置防渗基坑,应对可能的应急喷淋水和蒸发设备泄漏情况,保证了环境安全。

3)工艺装置具备手动操作和自动操作功能,配备压力、温度、液位等监测仪表,能够有效控制设备和监测设备状态,在装置出现问题工况时可及时停机报警;同时对蒸发过程可进行动态模拟显示,对温度、真空度等信息形成图表记录。

4)工艺从根本上减少了人员与废水的接触机率,降低了出现应急情况的风险,废水蒸发过程更可控。

5)原处理过程一般采用少量多次方式进行,从而产生了较多的固体废物容器;新工艺将蒸发残渣随报废后的装置一起送有资质单位处理,仅需在装置报废时处理1次,减少了废物处理的工作量。

## 4 结论

针对镀铀废水呈酸性问题,对蒸发浓缩装置进行了耐腐蚀设计;针对蒸汽无组织排放问题,设计了蒸汽冷凝处理工序,降低了工艺废水排放对环境的不利影响;针对装置可能存在的容器破损泄漏、镀铀工艺人员应急喷淋情况,设计了基坑应急处理池解决应急情况下可能造成的环境问题。蒸发浓缩装置运行稳定,蒸发后的冷凝液中的铀质量浓度小于检测限,处理效果满足使用需要。

### 参考文献:

- [1] 吴晓雷.超重核研究中铀系靶的分子镀制备[D].兰州:兰州大学,2018.
- [2] 何佳恒,陈琪萍,党宇峰,等.电沉积法制备<sup>238</sup>U靶件的研究[J].表面技术,2010,39(6):80-83.  
HE Jiaheng, CHEN Qiping, DANG Yufeng, et al. Preparation of <sup>238</sup>U targets by electro-deposition

- method[J]. *Surface Technology*, 2010, 39(6): 80-83 (in Chinese).
- [3] 何佳恒, 陈琪萍, 钟文彬, 等. 电沉积铀靶制备技术研究[J]. *原子能科学与技术*, 2010, 44(10): 1161-1167.  
HE Jiaheng, CHEN Qiping, ZHONG Wenbin, et al. Preparation of uranium targets by electro-deposition method [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2010, 44(10): 1161-1167 (in Chinese).
- [4] 何佳恒, 陈琪萍, 党宇峰, 等. 管状电沉积铀靶的制备和检测[J]. *化学研究与应用*, 2010, 22(2): 248-252.  
HE Jiaheng, CHEN Qiping, DANG Yufeng, et al. Preparation and testing techniques for Uranium target prepared by electro-deposition[J]. *Chemical Research and Application*, 2010, 22(2): 248-252 (in Chinese).
- [5] 王建龙, 刘海洋. 放射性废水的膜处理技术研究进展[J]. *环境科学学报*, 2013(10): 2639-2656.  
WANG Jian, LIU Haiyang. Research advances in radioactive wastewater treatment using membrane processes [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013(10): 2639-2656 (in Chinese).
- [6] 王金明, 荣锋, 王鑫, 等. 放射性废物的安全管理及最小化[J]. *核动力工程*, 2010(31): 131-135.  
WANG Jinming, RONG Feng, WANG Xin, et al. Safety control and minimization of radioactive wastes [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2010(31): 131-135 (in Chinese).
- [7] 高丽丽, 张琳, 杜明照. MVR 蒸发与多效蒸发技术的能效对比分析研究[J]. *现代化工*, 2012, 32(10): 84-86.  
GAO Lili, ZHANG Lin, DU Mingzhao. Energy efficiency comparative analysis on MVR and multi-effect evaporation technology [J]. *Modern Chemical Industry*, 2012, 32(10): 84-86 (in Chinese).
- [8] 刘军, 张冲, 杨鲁伟, 等. 夹套式 MVR 热泵蒸发浓缩系统性能分析[J]. *化工学报*, 2015(5): 1904-1911.  
LIU Jun, ZHANG Chong, YANG Luwei, et al. Performance analysis of jacketed MVR heat pump evaporation concentration system [J]. *CIESC Journal*, 2015(5): 1904-1911 (in Chinese).
- [9] 庞卫科, 林文野, 戴群特, 等. 机械蒸汽再压缩热泵技术研究进展[J]. *节能技术*, 2012(4): 312-315.  
PANG Weike, LIN Wenye, DAI Qunte, et al. Advancement of mechanical vapor recompression heat pump [J]. *Energy Conservation Technology*, 2012(4): 312-315 (in Chinese).
- [10] 李明, 马兴均, 陈莉, 等. 放射性废物处理中心蒸发系统优化设计研究[J]. *核动力工程*, 2018, 39(2): 37-41.  
LI Ming, MA Xingjun, CHEN Li, et al. Study on optimization design of evaporator system for radioactive waste disposal center [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2018, 39(2): 37-41 (in Chinese).
- [11] 尉凤珍, 方向红. 真空蒸发浓缩装置在核放射废水处理中的应用试验[J]. *工业水处理*, 2009, 29(9): 62-65.  
WEI Fengzhen, FANG Xianghong. Experimental research on the vacuum evaporating device and its application to the treatment of radioactive wastewater [J]. *Industrial Water Treatment*, 2009, 29(9): 62-65 (in Chinese).
- [12] 姜圣阶, 任凤仪. 核燃料后处理工学[M]. 北京: 原子能出版社, 1995.
- [13] 黄明犬, 周从直. 中低放射性废水处理现状与发展[J]. *水处理信息报导*, 2023, 25(6): 29-32.  
HUANG Mingquan, ZHOU Congzhi. Current situation and development of treatment of low-medium level radioactive wastewater [J]. *Water Treatment Information Coverage*, 2023, 25(6): 29-32 (in Chinese).
- [14] 何静波, 王守正, 王今维, 等. 放射性同位素实验室污水处理工艺设计原理[J]. *环境科学导刊*, 1988(3): 50-55.  
HE Jingbo, WANG Shouzheng, WANG Jinwei, et al. Design principle of radioactive isotope laboratory wastewater treatment process [J]. *Environmental Science Survey*, 1988(3): 50-55 (in Chinese).
- [15] 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(2): 158-161.  
HOU Chao, ZHANG Huafu, ZHANG Yu, et al. Characteristics of mechanical vapor recompression technology for treatment of liquid radioactive wastes in nuclear power stations [J]. *Modern Chemical Industry*, 2018, 38(2): 158-161 (in Chinese).
- [16] 肖青. 钢铁企业应急事故水池设置要求分析[J]. *化学工程与装备*, 2023(1): 276-279.  
XIAO Qing. Analysis of emergency water tank setting requirements in iron and steel enterprises [J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2023(1): 276-279 (in Chinese).

- [17] 边归国,潘文斌,黄辉.我国行业和企业环境应急水池容积的研究[J].能源与环境,2020(2):12-16.  
BIAN Guiguo, PAN Wenbin, HUANG Hui. Study on the volume of emergency water pool for industry and enterprise environment[J]. Energy and Environment, 2020(2):12-16(in Chinese).
- [18] 边归国,肖毓铨,王翔.我国环境应急水池定义与功能的研究[J].能源与环境,2020(5):6-7.  
BIAN Guiguo, XIAO Yuquan, WANG Xiang. Study on definition and function of environmental emergency pool in China [J]. Energy and Environment, 2020(5):6-7(in Chinese).
- [19] 汪卫平,窦华泰,张洋杰,等.化工园区事故应急设施(池)建设的思考[J].劳动保护,2023(8):51-53.  
WANG Weiping, DOU Huatai, ZHANG Yangjie, et al. Experts introduced the problems of the construction of accident emergency (pool) in chemical industry park, and put forward suggestions for improvement[J]. Labour Protection, 2023 (8): 51-53 (in Chinese).
- [20] 王玉松,沈洋,吴芳.全厂性大型事故应急池的合理化设计分析[J].石材,2023(8):36-39.  
WANG Yusong, SHEN Yang, WU Fang. Rational design analysis of large-scale emergency pool for whole plant[J]. Stone, 2023(8):36-39(in Chinese).

### Application of Evaporation Concentration Device in Uranium Plating Wastewater Treatment

LIU Xiaochen, CHU Xuyang, LIU Xiaochen, GAN Yuhang, ZHANG Qian

(Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China)

**Abstract:** To address the wastewater treatment issue in electrode uranium plating process, an evaporation concentration device suitable for the special requirements of this process has been developed, which can effectively reduce the discharge of radioactive process wastewater. The principle of this device is to vaporize the water in the waste liquid through micro-vacuum distillation, condense it back into liquid water, and then discharge it externally. The remaining concentrated water and solid in the evaporator are treated as radioactive solid waste. Considering the actual application scenarios, leak-proof foundation pits are set up to address equipment failure or emergency shower problems. The device uses neutralizing tanks to handle the acidity and alkalinity of the waste liquid, and is equipped with a detection port to ensure that the waste liquid after condensation meets the emission standards.

**Key words:** wastewater treatment; uranium plating process; evaporation