

基于MVR工艺的酸法地浸废水处理方案研究

胡龙飞¹, 王攀^{2,3}, 初旭阳³, 刘啸晨³, 干雨航³

(1. 中国铀业有限责任公司, 北京 100013)

(2. 中核安徽计量检测有限公司, 安徽 界首 236500)

(3. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149)

摘要: 铀矿冶地浸废水水量大, 呈酸性, 具有低放射性; 部分铀矿冶企业的蒸发池满足不了扩大生产的需求。对比分析了减压蒸发、三效蒸发、MVR(Mechanical Vapor Recompression)蒸发等强制蒸发技术处理地浸废水的优缺点, 发现在长期使用前提下, MVR技术效能更高、废气排放量少、能量消耗少, 相对更适用于地浸废水。基于MVR技术设计并搭建了可以集成控制的强制蒸发系统, 依据废液组分确定了设备各阶段的加热温度和相应设备材质。搭建的现场试验装置实现了系统的温度、压力、液位自动控制及连续循环蒸发, 实际测试表明装置的蒸发量和效能系数与蒸发温度正相关。

关键词: 铀矿冶; 地浸废水; MVR蒸发; 三效蒸发; 减压蒸发

中图分类号: TL941 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2025)01-0131-07

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2024.04.18

在铀矿水冶、纯化转化和核燃料后处理等过程中均会产生放射性废水^[1]。处理该类放射性废水的方法主要有沉淀法、吸附法、反渗透法、蒸发浓缩法、电解法、离子交换法等^[2-6], 通过特定的物理、化学或电化学反应, 实现放射性核素的去除或分离。国内地浸行业处理该类废水的常用方法为蒸发浓缩法, 该法可分为自然蒸发^[7]与强制蒸发^[8-9]。自然蒸发技术具有处理成本低、工艺简单、碳排放量低等优点, 应用范围较广; 但该工艺受气候条件影响较大, 且受蒸发池面积限制往往无法满足企业扩大生产的需求。强制蒸发可分为减压蒸发、三效蒸发和MVR蒸发, 具有不受自然气候条件影响、占地面积小等优点, 但需要消耗较多能源。

在不影响现有地浸采铀环保安全性的情况下, 对各类强制蒸发技术的能量消耗、蒸发效率进行比较, 研究酸法地浸废液的MVR(Mechanical Vapor Recompression)蒸发技术方案^[10], 并进行控制端集成与现场安装、调试, 以探究该蒸发方案的处理效果。

1 废水处理强制蒸发技术

1.1 减压蒸发

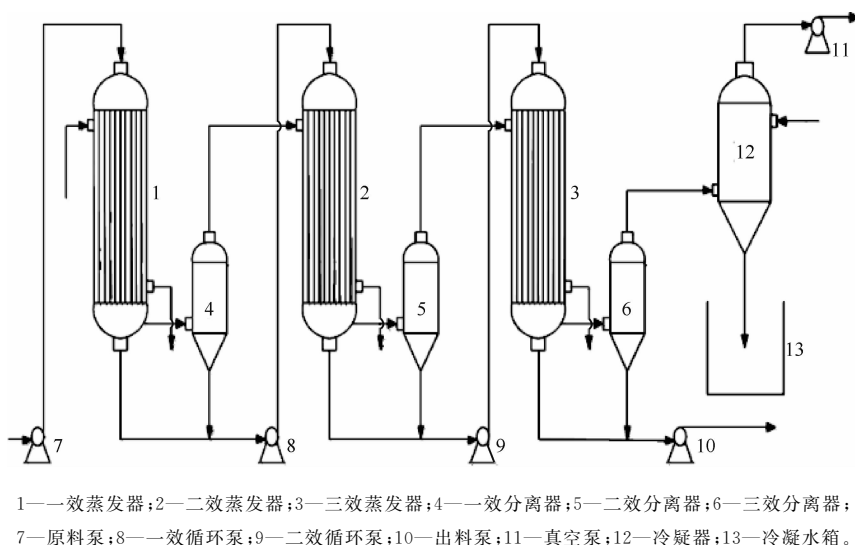
减压蒸发通过降低压力来降低液体的沸点和蒸发热, 实现液体浓缩和分离。相比常压蒸发, 减压蒸发能耗较低, 适用于挥发性溶剂或热敏性化合物的处理。减压蒸发通过调节温度和压力提高蒸发速率, 控制产品品质和浓度; 但需要特殊设备和控制装置, 系统较复杂、成本较高, 同时还需采取安全措施维持真空度并防止泄漏。

1.2 三效蒸发

三效蒸发是通过多级蒸发器, 将废液在不同压力下进行多次蒸发, 从而实现废液的逐步浓缩(图1)。与单级蒸发相比, 三效蒸发可充分利用废液中的热能, 具有更高的能源利用率^[11]; 三效蒸发使废液中的水分被逐步蒸发浓缩, 从而减少废液的体积, 降低废液对环境的影响; 同时三效蒸发可实现对产物质量的精确控制^[12]。三效蒸发适用于处理高浓度的溶解固体废液、高黏度的废液等, 但三效蒸发系统的投资和运营成本较高。

收稿日期: 2024-04-28

第一作者简介: 胡龙飞(1990—), 男, 安徽阜阳人, 学士, 高级工程师, 主要从事辐射防护与工业安全相关工作。



1—一效蒸发器;2—二效蒸发器;3—三效蒸发器;4—一效分离器;5—二效分离器;6—三效分离器;
7—原料泵;8—一效循环泵;9—二效循环泵;10—出料泵;11—真空泵;12—冷凝器;13—冷凝水箱。

图 1 三效蒸发工艺流程示意图

Fig. 1 Process flow of triple-effect evaporator

1.3 MVR 蒸发

MVR 通过回收和再利用蒸汽能量来提高蒸发效率,其基本原理是利用机械能压缩蒸汽将其重新加热并注入到蒸发器中。注入的高压蒸汽可以增加蒸发器内的蒸汽压力,从而提高蒸发速率^[13-14]。

MVR 系统相对复杂,对参数的控制要求较高^[15],主要组件有蒸发器、压缩机、冷凝器、蒸汽分离器^[16]。由于 MVR 技术可以在较低的温度下进行蒸发,因此可以保持物料的营养成分和产品质量^[17]。MVR 蒸发技术具有节能、排放量低、灵活性高和产品质量保持度高等优点,在工业领域中应用广泛,已成为改善生产过程和保护环境的重要技术之一^[18]。

1.4 强制蒸发技术的比选

对比 3 种蒸发方式,减压蒸发装置投资低但运行费用高;三效蒸发主要用于高浓度废液蒸发,投资和运行成本高;MVR 蒸发装置投资高但运行费用低。由于地浸铀矿山的低放射性废水处理量大,在系统运行时间长且蒸发量较大的情况下,采用 MVR 蒸发技术更为经济^[19-20]。

2 MVR 蒸发技术现场应用

2.1 MVR 蒸发系统整体工艺

为了处理酸法地浸铀矿产生的蒸发池废水,研制了 MVR 蒸发装置。蒸发系统除 MVR 部分外,还涉及预处理等部分,整体工艺流程见图 2。

其中,预热之前的中和反应、过滤工序为预处理部分,在搪瓷反应釜中进行;预热及之后的流程在 MVR 装置中进行,MVR 工艺流程见图 3。

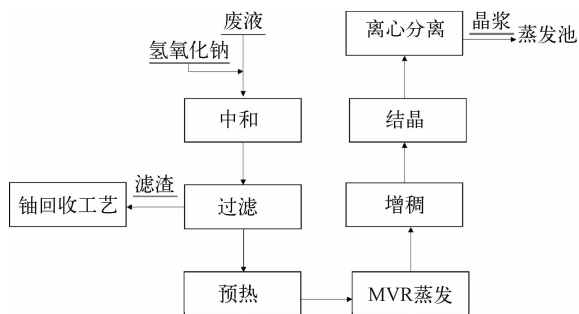


图 2 MVR 蒸发系统整体工艺

Fig. 2 Process flow of the MVR evaporation system

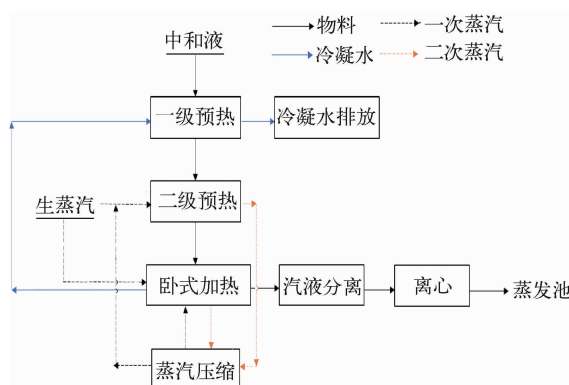


图 3 MVR 蒸发装置工艺流程

Fig. 3 MVR evaporator process diagram

MVR 蒸发装置中的物料走向可分为生蒸汽走向、物料走向、二次蒸汽走向以及冷凝液走向。

1) 生蒸汽走向。刚开机时,蒸汽发生器产生的生蒸汽进入卧式加热器对物料进行预热;预热至 90℃ 左右后,关闭生蒸汽的进口,MVR 蒸发装置进入自动控制模式。自动控制时,生蒸汽用于蒸汽压缩机密封。

2) 物料走向。物料从前置预处理容器陶瓷反应釜排出后,进入 2 级板式预热器预热,然后进入卧式加热器,蒸发完成后排出。

3) 二次蒸汽走向。由强制循环产生的二次蒸汽经过 MVR 压缩机后,压力和温度都得到提升,此二次蒸汽进入卧式加热器作为热源。

4) 冷凝液走向。增压后的二次蒸汽经过卧式加热器后,被冷凝成高温水;此高温水作为热源预热一级板式换热器,换热后的水排放或回用。

5) 晶浆。晶浆经离心分离后,产生液相和固相。液相主要为硫酸钠溶液,进入厂区蒸发池,与蒸发池废液合并处理;固相主要成分为硫酸钠,以及钙、镁等离子到达溶解度极限后析出的相应固体,作为固废处理。

2.2 蒸发物料组分

该地浸工艺中的浸出剂用硫酸配制,所以原废液呈明显酸性。经检测原废液 pH 为 1.29,废液中硫酸根离子的质量浓度为 56.3 g/L,其他金属、非金属离子含量不高。

为了降低废液对蒸发设备的腐蚀,加入氢氧化钠对原废液进行中和预处理,中和反应在搪瓷反应釜中进行,并在搪瓷反应釜实现初步预热;中和后经过滤器过滤,滤渣进入厂区开展铀回收,滤液进入 MVR 蒸发工艺,滤液中主要无机盐为硫酸钠。硫酸钠的溶解度和沸点见图 4。

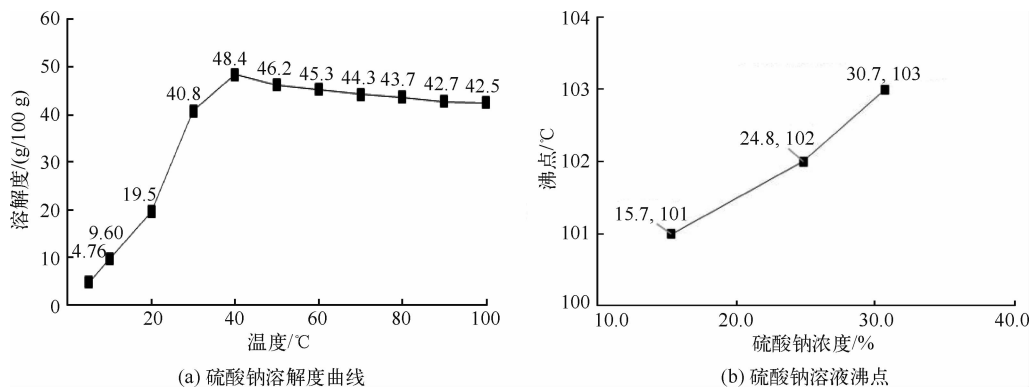


图 4 硫酸钠溶解度曲线及溶液沸点

Fig. 4 Temperature-solubility curve & concentration-boiling point diagram of sodium sulfate

硫酸钠溶解度在 30~50℃ 之间出现峰值,低于 40℃ 析出十水硫酸钠,高于 40℃ 析出硫酸钠晶体。十水硫酸钠含水量高、粒径大,为避免堵塞管道并降低出料时晶体的含水量,宜在 50℃ 以上进行蒸发。此情况下,将物料浓缩到出料,经稠厚器析出晶体,之后使用 DTB 结晶器进行结晶。该结晶器总容积约 15 m³,晶粒停留时间在 3 h 以上,得到的晶体粒径较大,便于晶粒与过饱和溶液分离。蒸发残液进入厂区蒸发池,与蒸发池产物合并处理。

考虑到抗腐蚀需求,蒸汽压缩机采用 2205 材质,加热器、分离器、除水器、换热器、中转罐、母液罐、管件法兰等均采用 316L 材质,结构平台采用

碳钢材质、冷却水系统采用玻璃钢材质。

2.3 MVR 蒸发设备配置

根据矿山实际,设备蒸发的质量流量(F_0)约 3 000 kg/h。蒸发器的蒸发量(W)与质量流量(F_0)、物料初始质量分数(w_0)、物料蒸发时的质量分数(w_1)相关。蒸汽消耗量(D)与蒸发量基本相同,但设计时应设置一定的富余系数,富余系数设置为 1.1。蒸发量计算公式为

$$W = F_0 \left(1 - \frac{w_0}{w_1}\right)$$

$$D = 1.1W$$

物料的初始质量分数为 5.63%,按照 100℃ 蒸发设计,蒸发时饱和的质量分数为 42.5%,由

此蒸汽消耗量约为 2 862.8 kg/h。

2.3.1 压缩机的功率

按照水的汽化潜热(r)为 2 320 kJ/kg 进行估算,则 MVR 的卧式加热器的换热功率 $P_w = W \cdot r = 6.04 \times 10^6$ kJ/h。

MVR 蒸发设备投入使用时一般为蒸发池蒸发效率较低的冬季,设计整体装置进液温度为 0℃,经过搪瓷蒸发釜将温度预热至 25℃再进入 MVR 蒸发。考虑 100℃下的硫酸钠溶解度和溶液沸点,按照水的比热容 4.2 kJ/(kg·K)进行计算,则液体升温部分所需的一级换热器和二级换热器的总换热功率为 $P_1 + P_2 = F_0 c_p \Delta T = 1.02 \times 10^6$ kJ/h。

而 MVR 装置的散热损失一般在 2%~5%,效能系数(COP)一般为 10~30。按散热损失 3.5%、效能系数为 20 进行考虑,则

$$\beta = \frac{P_{\text{loss}}}{P_{\text{out}}},$$

$$\text{COP} = \frac{P_{\text{in2}}}{P_{\text{in1}}},$$

$$P_{\text{out}} = P_w + P_1 + P_2 + P_{\text{loss}} = P_{\text{in1}} + P_{\text{in2}},$$

其中, β —散热损失; P_{loss} —每小时的散热损失,kJ/h; P_{out} —总输出功率,kJ/h; P_{in2} —被回收的二次蒸汽能量功率,kJ/h; P_{in1} —MVR 压缩机输入功率,kJ/h。

由上可解得 $P_{\text{out}} = 7.31 \times 10^6$ kJ/h, $P_{\text{in1}} = 3.48 \times 10^5$ kJ/h, $P_{\text{in2}} = 6.97 \times 10^6$ kJ/h, $P_{\text{loss}} = 2.56 \times 10^5$ kJ/h。由 P_{in1} 可知所需 MVR 压缩机的功率为 96.78 kW。根据该功率需求选定某国产 MVR 罗茨压缩机,其轴功率可达 110 kW,可使气体升温约 18℃,压比为 1.5。

2.3.2 蒸发面积

卧式换热器(管壳式换热器)在相变换热情况下换热系数可以达到 2~10 kW/(m²·K)。换热器面积估算公式为

$$S_w = \frac{D \cdot r}{U[T_1 - (t_3 + \Delta)]},$$

其中, r —汽化潜热,2 320 kJ/h; U —换热系数,蒸发器为蒸发相变换热,换热系数一般较高,取 10 000 W/(m²·K); T_1 —蒸汽温度,391 K; t_3 —出口设定温度,373 K; Δ —沸点升高,K,其经验公式^[21]为 $\Delta = 69.8 \omega^3 - 8.15 \omega^2 + 5.19 \omega$ 。

代入相关数据,可得卧式换热器面积约 55.78 m²。故配置 60 m² 换热器保证相变换热。

2.3.3 预热面积

MVR 蒸发系统考虑设置 2 级板式换热器用于预热。换热器面积可按下式计算:

$$S_1 = \frac{2F_0 c_1 (T_{c2} - T_{c1})}{U_1 [(T_{h1} - T_{c2}) - (T_{h2} - T_{c1})]},$$

$$S_2 = \frac{F_0 c_1 (T_{c2}' - T_{c1}') \ln \frac{T_{h1}' - T_{c2}'}{T_{h2}' - T_{c1}'}}{U_2 [(T_{h1}' - T_{c2}') - (T_{h2}' - T_{c1}')]},$$

其中, T_{c1} 、 T_{c2} —加热器进出口处物料的温度,K; T_{h1} 、 T_{h2} —加热器进出口蒸汽/冷凝水的温度,K; U —加热器的换热系数,其中一级换热器为液-液换热,按 7 000 W/(m²·K)估算,二级换热器为气-液换热,按 4 000 W/(m²·K)估算; S_1 、 S_2 —一级、二级换热器的换热面积,m²。

根据前文中 MVR 压缩机的压比,1.5 个大气压下时蒸汽冷凝温度约为 114℃。一二级换热器温度按照 $T_{c1} = 25$ ℃、 $T_{c2} = 50$ ℃、 $T_{h1} = 75$ ℃、 $T_{h2} = 50$ ℃、 $T_{c1}' = 50$ ℃、 $T_{c2}' = 106$ ℃考虑,由此可计算得到一级换热器的换热面积为 1.90 m²,二级换热器面积为 5.67 m²。故配置一级换热器换热面积为 2 m²,二级换热器面积为 6 m²。

2.3.4 设备配置

综上得到 MVR 蒸发器核心设备参数,配套相关设备后得到系统设备配置表(表 1)。

3 MVR 蒸发装置现场应用

MVR 蒸发装置在铀矿山现场进行了安装和试验。该装置利用高效蒸汽压缩机提高二次蒸汽的压力和温度,然后将二次蒸汽打入加热器对废水进行加热;受热的废水继续蒸发产生二次蒸汽,从而实现持续的循环蒸发状态。通过 PLC 控制 MVR 系统的温度、压力、液位,保持系统蒸发平衡,实现了自动控制循环蒸发、物料流量监测、加热控温、进排料启停、物料液位监测、釜内压力监测等功能,并通过 PLC 模块将所有控制端集成于触摸屏,实现了集成控制。对 MVR 蒸发装置开展现场测试应用,从 98~106℃选择了 5 个蒸发温度进行了蒸发,测量了蒸发量并计算了 COP,结果见表 2。可以看出,MVR 蒸发装置的效能系数及蒸发量随着蒸发温度的提高而提高。

表 1 MVR 蒸发器设备配置
Table 1 MVR evaporator equipment configuration

| 名称 | 型号规格 | 材质 | 数量 |
|--------------|--|------|----|
| 蒸汽压缩机(MVR) | 采用罗茨式蒸汽压缩机,具备 3 000 kg/h 进气量,进气饱和蒸汽温度 90℃,温升 18℃,总功率 132 kW,轴功率 110 kW | 2205 | |
| 卧式加热器 | 卧式加热器换热面积为 60 m ² ,管材为 316L,壳材为 304 | 316L | 1 |
| 板式换热器 | 2 道板式换热器的换热面积分别为 2 m ² 和 6 m ² | 316L | 2 |
| 进料泵 | 流量 3 m ³ /h,扬程 32 m,功率 2.2 kW,使用半开式叶轮 | 316L | 1 |
| 强制循环泵 | 强制循环泵流量 200 m ³ /h,扬程 2~4 m,功率 11 kW,开式叶轮 | 316L | 1 |
| 出料循环泵 | 流量 6.3 m ³ /h,扬程 32 m,功率 3 kW,半开式叶轮 | 316L | 1 |
| 冷凝水负压泵 | 流量 3 m ³ /h,扬程 50 m,功率 0.75kW,闭式叶轮带副叶轮 | 316L | 1 |
| 分离器 | φ700 mm×3 500 mm×5 mm φ300 mm×1 000 mm×3 mm 含鲍尔环除沫器 | 316L | 1 |
| 除水器 | φ219 mm×1 500 mm×5 mm | 304 | 1 |
| 冷凝水罐、中转罐和母液罐 | φ600 mm×1 000 mm×4 mm | 316L | 1 |
| 冷却水系统 | 冷却水塔、冷却水泵、冷却水管路及配件 | 玻璃钢 | 1 |
| 平板刮刀离心机 | 三足离心机 0.55 kW | 316L | 1 |

表 2 MVR 蒸发装置试验测试结果

Table 2 Test results of the MVR evaporation device

| 蒸发温度/℃ | 效能系数 | 蒸发量/(t/h) |
|--------|------|-----------|
| 98 | 18.6 | 2.95 |
| 100 | 18.7 | 2.98 |
| 102 | 19.2 | 3.02 |
| 104 | 19.5 | 3.05 |
| 106 | 19.8 | 3.10 |

4 结论

通过氢氧化钠中和解决了酸法地浸废液腐蚀性过高问题,同时利用反应设备预热,将低温废液加热到了 MVR 可以运行的温度。设计的 MVR 蒸发系统运行稳定连续,当蒸发温度略高于 100℃ 时,系统平均蒸发量大于 2 600 kg/h,满足设计要求。MVR 蒸发装置的效能系数及蒸发量与蒸发温度正相关。

参考文献:

[1] 裴晶晶,胡南,张辉,等. 铀尾矿中不同形态铀释放的影响因素及其相关性[J]. 中国环境科学,2019,39

(7):3073-3080.

PEI Jingjing, HU Nan, ZHANG Hui, et al. An analysis of influencing factors on the release of different species of uranium from uranium tailings and their correlation[J]. China Environmental Science, 2019, 39(7):3073-3080(in Chinese).

[2] MUJUMDAR, ARUNS. Handbook of industrial drying[M]. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.

[3] 刘晓芳,周涛,毛赏,等. 核电站放射性废水处理技术研究进展[J]. 当代化工研究,2023(19):8-10. LIU Xiaofang, ZHOU Tao, MAO Shang, et al. Research progress in radioactive wastewater treatment technology for nuclear powerplants [J]. Modern Chemical Research, 2023(19):8-10(in Chinese).

[4] 张雯琇,张光辉. 超低压反渗透工艺处理模拟放射性含钴废水[J]. 核动力工程,2023,44(1):187-191. ZHANG Wenxiu, ZHANG Guanghui. Treatment of simulated radioactive cobalt containing wastewater by ultra-low pressure reverse osmosis process [J]. Nuclear Power Engineering, 2023, 44(1):187-191(in Chinese).

[5] 张永康,沙沙,陈莉,等. 放射性废水远红外蒸发处理装置研制[J]. 辐射防护,2016,36(1):53-59. ZHANG Yongkang, SHA Sha, CHEN Li, et al. The design of far infrared evaporation device for treatment of liquid radioactive waste [J]. Radiation Pro-

- tection, 2016, 36(1):53-59(in Chinese).
- [6] 袁海峰, 邵利锋, 黄立. 电解法原位合成锰氧化物处理模拟含铯放射性废水[J]. 工业水处理, 2019, 39(1):82-86.
YUAN Haifeng, SHAO Lifeng, HUANG Li, et al. Treatment of simulated radioactive Sr^{2+} -containing wastewater by electrolysis of in-situ synthesis of manganese oxide [J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(1):82-86(in Chinese).
- [7] 张华. 天然蒸发池技术处理低水平放射性废液的发展概况[J]. 同位素, 2016, 29(1):58-64.
ZHANG Hua. Research and development of solar evaporation on low level radioactive liquid waste[J]. Journal of Isotopes, 2016, 29(1):58-64(in Chinese).
- [8] 孙寿华, 冉浴东, 林力, 等. 放射性废液处理技术的现状与展望[J]. 核动力工程, 2019, 40(6):1-6.
SUN Shouhua, RAN Mingdong, LIN Li, et al. Present situation and prospect of radioactive waste liquid treatment technology [J]. Nuclear Power Engineering, 2019, 40(6):1-6(in Chinese).
- [9] ASKALANY, AHMED A. Innovative mechanical vapor compression adsorption desalination (MVC-AD) system [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 106:286-292.
- [10] ALY N H, EI-FIGI A K. Mechanical vapor compression desalination systems: A case study [J]. Desalination, 2003, 158(1):143-150.
- [11] JAICHANDER S, KISHOR G N, JOHN H L V. Mechanical vapor compression: Membrane distillation hybrids for reduced specific energy consumption [J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57(55):26507-26517.
- [12] 陈晓东. 双效浓缩器与单效浓缩蒸发器能耗的比较分析[J]. 机电信息, 2006(8):42-44.
CHEN Xiaodong. Comparative analysis of energy consumption of double-effect concentrator and single-effect concentrator [J]. Jidian Xinxin, 2006(8):42-44(in Chinese).
- [13] 姚岷民, 吴成刚, 郭公新, 等. 国产机械蒸汽再压缩 (MVR) 板式蒸发装置 [J]. 轻工科技, 2014, 30(10):28-30.
YAO Minmin, WU Chenggang, GUO Gongxin, et al. Domestic mechanical steam recompression (MVR) plate evaporation device [J]. Light Industry Science and Technology, 2014, 30(10):28-30(in Chinese).
- [14] AL-SAHALI M, ETTOUNEY H. Developments in thermal desalination processes: Design, energy, and costing aspects [J]. Desalination, 2007, 214(1):227-240.
- [15] 刘忠臣, 向秋林, 刘会武, 等. 碱性含铀废水处理试验研究 [J]. 铀矿冶, 2019, 38(2):137-139+145.
LIU Zhongchen, XIANG Qiulin, LIU Huiwu, et al. Experimental study on treatment of alkaline uranium wastewater [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2019, 38(2):137-139+145(in Chinese).
- [16] KHATRI M K. Evaporation, evapotranspiration and irrigation water requirements [M]. Reston: ASCE, 2016.
- [17] 王宇, 朱沈超, 陈芳斌, 等. 中国核电与可再生能源发电协调发展初探 [J]. 可再生能源, 2021, 39(8):1069-1077.
WANG Yu, ZHU Shenchao, CHEN Fangbin, et al. A preliminary study on the coordinated development of nuclear and renewable energy power generation in China [J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(8):1069-1077(in Chinese).
- [18] 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).
- [19] 朱聘冠. 换热器原理及计算 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.
- [20] 姚岷民, 吴成刚, 郭公新. 国产机械蒸汽再压缩 (MVR) 板式蒸发装置 [J]. 轻工科技, 2014, 10:28-30.
YAO Minmin, WU Chenggang, GUO Gongxin, et al. Domestic mechanical steam recompression (MVR) plate evaporation device [J]. Light Industry Science and Technology, 2014, 10:28-30(in Chinese).
- [21] 石成君. 机械蒸汽再压缩蒸发技术在高盐度废水处理中的性能研究 [D]. 上海: 东华大学, 2014.

Treatment Scheme of Acid In-situ Leaching Wastewater Based on MVR Process

HU Longfei¹, WANG Pan^{2,3}, CHU Xuyang³, LIU Xiaochen³, GAN Yuhang³

(1. China Nuclear Uranium Co., Ltd., Beijing 100013, China)

(2. China Nuclear Anhui Measurement and Testing, Jieshou 236500 China)

(3. Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, Beijing, 101149)

Abstract: The in-situ leaching wastewater of uranium mining and metallurgy is characterized by large volume, acidity, and low radioactivity, etc. The evaporation ponds of some uranium mining and metallurgical enterprises cannot meet the demand of expanding production. The advantages and disadvantages of forced evaporation technology such as vacuum evaporation, three-effect evaporation and MVR (Mechanical Vapor Recompression) evaporation were compared and analyzed. It was found that, under long-term use, MVR technology has higher efficiency, lower exhaust emission, and lower energy consumption, making it relatively more suitable for in-situ leaching wastewater. Based on MVR technology, a fully integrated control forced evaporation system was designed and constructed. The heating temperature and material of the equipment were determined according to the waste liquid composition. The on-site device achieved automatic control of temperature, pressure, and liquid level, as well as continuous cyclic evaporation. The actual test shows that the evaporation capacity and efficiency coefficient of the device are positively correlated with the evaporation temperature.

Key words: uranium mining and metallurgy; in-situ leaching wastewater; mechanical vapor recompression; triple-effect evaporation; vacuum evaporation