MVR 处理中性地浸采铀矿山蒸发池废水技术研究

王占龙[1],杜 娟[1],李 利[1],何立宁[1],马琳娜[1],连国玺[1],曹俊鹏[2]

(1. 中核第四研究设计工程有限公司,河北 石家庄 050021;
2. 中核通辽铀业有限责任公司,内蒙古 通辽 028000)

摘要:采用自然蒸发工艺时,单靠蒸发池面积的增加不足以处理大量的放射性废水。以某中性地浸采铀矿山的电渗析浓水和蒸发池废水为研究对象,采用 MVR 蒸发工艺,考察了不同压力和温度下的冷凝水水质情况和蒸发效果。结果表明,冷凝水可达到排放或回用标准,减容率达 95%;在 0.07 MPa、90 ℃时,MVR 的蒸发效果最好。

关键词:MVR;地浸采铀;蒸发池;冷凝水;电渗析

中图分类号:X753;TD40 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-8063(2023)02-0089-08

DOI:10.13426/j.cnki.yky.2022.11.05

目前,地浸采铀生产过程中产生的放射性废水,均排入蒸发池通过自然蒸发进行处理[1]。采用自然蒸发法处理地浸采铀废水,可充分利用当地自然条件,降低废水处理成本[2]。但该法受自然条件影响较大,蒸发量随季节变化较大,且处理能力主要依赖蒸发池面积,千吨级铀矿生产基地的蒸发池面积预计将达到 1.2×10^5 m^2。随着地浸矿山规模的增加,采用自然蒸发法处理废水面临挑战。

风能辅助强制蒸发技术通过增加废水与空气的接触面积,可将液面蒸发拓展到立体蒸发;但蒸发效果受温度和风速影响较大,尤其是在冬季该工艺的处理效果并不理想[3]。机械蒸汽再压缩(Mechanical Vapor Recompression)简称 MVR,是利用蒸发系统自身产生的二次蒸汽及其能量,将低品位蒸汽经压缩机的机械做功提升为高品位蒸汽。与传统的多效蒸发相比,MVR 技术节能效果显著,已被广泛应用于化工、制药、造纸、污水处理、海水淡化等行业[4-5]。为从源头减少蒸发池的废水量,笔者开展 MVR 技术在地浸采铀行业中的研究应用,提高废水的蒸发速度,逐步实现蒸发池减容甚至替代。

1 室内试验部分

1.1 废水来源及水质情况

某中性地浸采铀工程进入蒸发池的废水主要包括:树脂转型废水(前 3 个树脂床的转型废水直接排入蒸发池)、电渗析浓水、沉淀母液,以及清洗滤袋废水等 4 种类型[6]。各废水月均排放量与水质情况见表 1。选取废水量较大且具有代表性的电渗析浓水和蒸发池废水作为研究对象。

1.2 试验设备

室内试验设备包括反应搅拌设备、油浴加热设备、蒸馏冷凝设备、减压调节设备,以及蒸残液过滤设备。

1.3 试验方法

通过室内蒸发试验确定废水蒸发的主要工艺参数,并检验蒸发效果。对电渗析浓水和蒸发池废水分别进行蒸发试验,采用油浴加热,根据不同压力和温度下的蒸发量,确定最佳蒸发压力和温度参数;并对冷凝水进行水质检测,验证蒸发效果。

收稿日期:2022-11-15

第一作者简介:王占龙(1983—),男,河北石家庄人,学士,高级工程师,主要从事污水处理、固废处理技术研究和设计工作。

表 1 废水月均排放量与水质情况

Table 1 Monthly average discharge and water quality of wastewater

名称	月均排放量/m^3	pH	$C(^{226}Ra)$/(Bq·L^{-1})	ρ_B/(mg·L^{-1})						电导率/($\mu S \cdot cm^{-1}$)	TDS/(mg·L^{-1})
				U	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}		
转型废水	2.16×10^3	9.22	—	7.32	208	105	5.88×10^3	2.42×10^3	830	1.13×10^4	9.44×10^3
电渗析浓水	2.25×10^3	8.30	0.07	1.04	294	254	6.41×10^3	2.23×10^3	1.32×10^3	1.57×10^4	1.20×10^4
沉淀母液	80	9.55	—	49.7	21	62	9.14×10^3	3.84×10^4	5.87×10^4	$>2.00\times10^4$	1.06×10^5
清洗滤袋废水	60	7.96	—	1.25	42	90	21	308	116	—	1.58×10^3

1.4 试验参数选择

取电渗析浓水(1#废水)和蒸发池废水(2#废水)分别在绝对压力 0.10、0.07、0.03 MPa下进行室内蒸发试验,确定最佳蒸发压力和温度,考察原水 pH 及主要离子浓度对蒸发的影响。废水处理量每批次取 1 000 mL,蒸发时间均取 3 h,固定油浴加热温度为 130 ℃。其他试验参数见表 2。

表 2 室内蒸发试验参数

Table 2 Laboratory evaporation test parameters

试验编号	废水编号	绝对压力/MPa	饱和蒸汽温度/℃
1#-0.10	1#	0.10	100
1#-0.07	1#	0.07	90
1#-0.03	1#	0.03	70
2#-0.10	2#	0.10	100
2#-0.07	2#	0.07	90
2#-0.03	2#	0.03	70

2 室内试验结果及分析

每隔30 min对蒸发量进行统计,1#-0.10、1#-0.07、1#-0.03、2#-0.10、2#-0.07、2#-0.03 废水实际蒸发温度分别为 100、89、72、100、87、74 ℃。

蒸发初期,溶液为澄清状态;随着蒸发进行,溶液开始略微浑浊。随废水体积的减少,溶液中的盐逐渐析出,紧贴在烧瓶内壁上。蒸发结束后,晃动烧瓶,尽量将烧瓶内壁的白色析出盐冲刷到残液内,经抽滤后得到白色残渣。

2.1 蒸发量分析

2.1.1 蒸发时间对蒸发量的影响

各废水均取 3 h 的试验数据进行对比,蒸发时间对蒸发量的影响见图 1。可以看出,1#-0.10、2#-0.10 属于常压蒸发,蒸发量较低,约为 38～45 mL/30 min,蒸发速度较慢;1#-0.07、1#-0.03、2#-0.07、2#-0.03 属于减压蒸发,蒸发量较大,约为 124～147 mL/30 min,减压蒸发速度约是常压蒸发速度的 3 倍。常压蒸发时,蒸发速度较为稳定;减压蒸发时,最后30 min的蒸发速度出现明显下降。分析认为这是由于烧瓶中废水体积太少导致的,但大体上整个蒸发过程中的蒸发速度较为稳定。

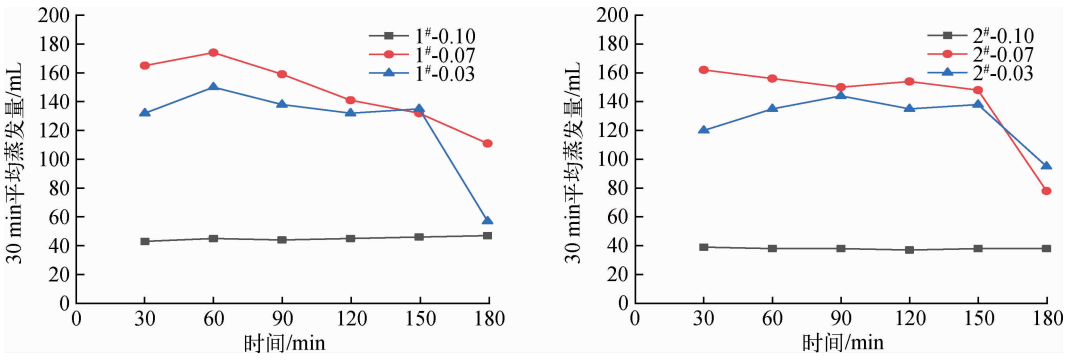


图 1 蒸发时间对蒸发量的影响

Fig. 1 Effect of evaporation time on evaporation capacity

2.1.2　蒸发压力对蒸发量的影响

各压力下均取 3 h 的试验数据，将其折算成 30 min 平均蒸发量进行对比，蒸发压力对蒸发量的影响见图 2。可以看出，压力在 0.10～0.07 MPa时，线段斜率最大，表明该段压力变化引起的平均蒸发量增加最为明显；进一步降低压力至 0.03 MPa，平均蒸发量有所下降。因此，压力为 0.07 MPa、89 ℃时，平均蒸发量最大，即蒸发速度最快。

2.1.3　pH 及离子浓度对蒸发的影响

1# 原水的 pH 及主要离子浓度低于 2# 原水，1# 原水的平均蒸发量与 2# 原水的平均蒸发量相差不大（图 2）。因此，认为原水的 pH 及主要离子浓度对蒸发量基本无影响。

2.2　冷凝水水质分析

对1# 和2# 试验得到的冷凝水进行水质检测，分析电导率、TDS，以及其中相关离子的浓度，结果见表 3。

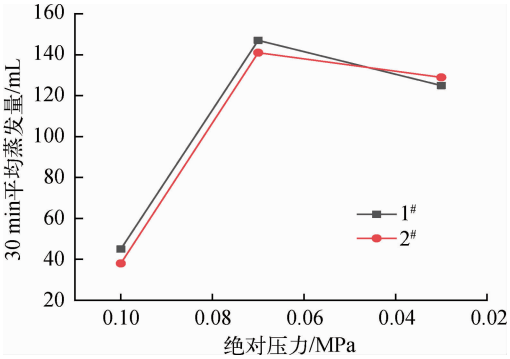


图 2　蒸发压力对蒸发量的影响

Fig. 2　Effect of evaporation pressure on evaporation capacity

表 3　1#、2# 冷凝水主要指标

Table 3　Main indexes of 1# and 2# condensate water

试验编号	pH	C(^{226}Ra)/(Bq·L^{-1})	ρ_B/(mg·L^{-1})					电导率/(μS·cm^{-1})	TDS/(mg·L^{-1})
			U	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}	COD_{Mn}		
1#-0.10	6.34	未检出	0.145	36	44	40	1.12	262	201
1#-0.07	6.74	未检出	0.145	21	67	38	0.89	177	135
1#-0.03	7.96	未检出	0.058	21	27	36	1.38	337	257
2#-0.10	6.11	未检出	0.029	159	307	60	2.62	933	689
2#-0.07	6.49	未检出	未检出	7	27	43	1.27	320	240
2#-0.03	6.24	未检出	未检出	7	27	41	0.72	77	58

对比表 3 和表 1 数据可知，冷凝水中各离子浓度较原废水均降低 1～2 个数量级。不同减压条件下，冷凝水的水质指标相近，各离子浓度及电导率等基本处于同一数量级，且均低于常压蒸发冷凝水中各离子浓度及电导率。各冷凝水中 U、^{226}Ra 均达到了《铀矿冶辐射防护和辐射环境保护规定》（GB 23727—2020）中表 3 的排放限值（ρ(U)≤0.3 mg/L、C(^{226}Ra)≤1.1 Bq/L）[7]，pH、COD_{Mn} 均达到了《地表水环境质量标准》（GB 3838—2002）中表 1 的三类水标准限值（pH=6～9、COD_{Mn}≤6 mg/L）[8]。

3　废水 MVR 蒸发处理工艺现场试验

3.1　MVR 蒸发处理工艺流程

根据废水室内试验结果，搭建的 MVR 蒸发处理工艺流程见图 3。MVR 蒸发处理工艺流程分为预处理及进料、预热、强制循环蒸发结晶、蒸汽压缩、离心出盐 5 个工段。

3.1.1　预处理及进料工段

废水自界外打入原料缓冲罐，并投入消泡剂，再经过进料泵输送到冷凝水预热器预热，然后进入强制循环换热器，当蒸发结晶器液位达到设计液位时，启动强制循环泵，进料结束。

3.1.2　预热工段

向强制循环换热器壳程通入生蒸汽给料液进行开机预热，当料液温度达到设定的蒸发温度时，开启蒸汽压缩机，系统开始进入蒸发状态；常温的废水进入冷凝水预热器（板式换热器）和 90 ℃的高温冷凝水换热，废水温度由 25 ℃预热到 55 ℃以上后进入强制循环换热器。

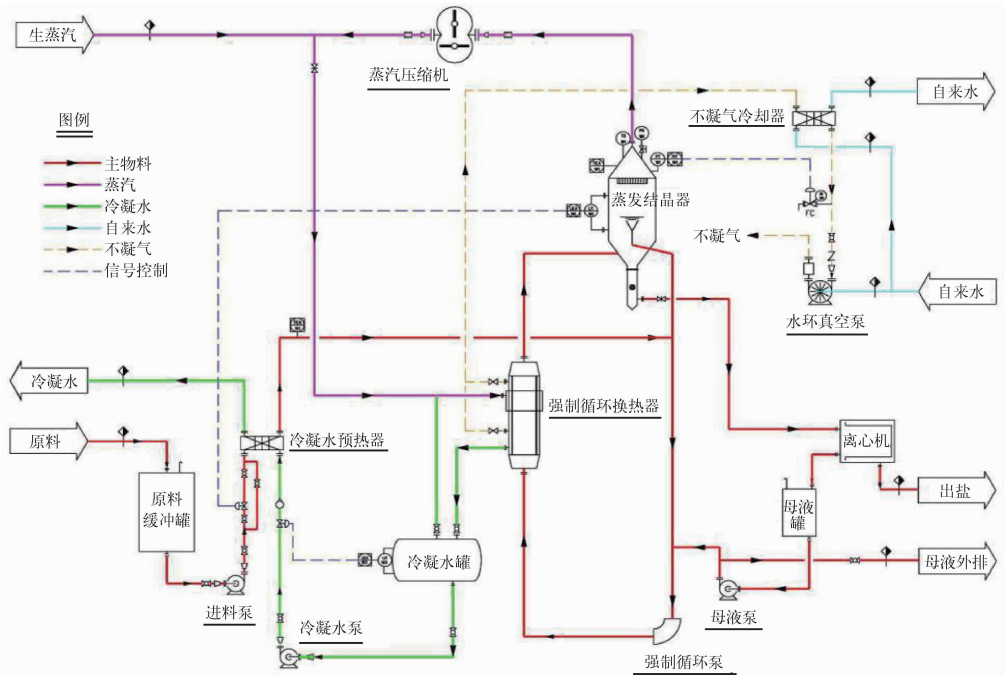


图 3 MVR 蒸发处理工艺流程图

Fig. 3 MVR evaporation process flow chart

3.1.3 强制循环蒸发结晶工段

废水与循环料液混合后进入强制循环换热器，以 1.5～2.0 m/s 的流速流过换热器的每根换热管；与此同时，与换热器壳程内 100～110 ℃的加热蒸汽（来自压缩机出口）进行换热，受热后的料液在蒸发结晶器底部沿切线进入蒸发结晶器进行蒸发（0.07 MPa、90 ℃）。当料液上升至接近液面时，料液由过饱和状态变为饱和状态，部分结晶颗粒析出；析出的晶体在强制循环系统进行循环、沉降、生长，集盐腿收集的盐浆自流排入离心机进行固液分离。

3.1.4 蒸汽压缩工段

蒸发结晶器蒸发出的二次蒸汽（0.07 MPa、90 ℃）进入蒸汽压缩机，经压缩做功后蒸汽压力和温度得以提升，其压力由 0.07 MPa 升至 0.10～0.14 MPa，温度由 90 ℃升至 100～110 ℃（饱和温度），然后再进入强制循环换热器给废水加热。整个蒸发过程由压缩机建立起完整的热能循环。

3.1.5 离心出盐工段

过饱和溶液通过重力自流进入离心机，离心出固体盐；母液自流排入母液罐，经母液泵一路返回 MVR 继续蒸发，一路开路外排或母液中有机物富集到一定程度影响正常蒸发时整罐外排。

3.2 MVR 设计参数及材质选择

MVR 蒸发处理装置设计蒸发量 80 L/h，主要设计参数见表 4。

表 4 MVR 系统主要设计参数

Table 4 Main design parameters of MVR system

参数	进料量/（L·h^{-1}）	进料浓度/%	进料温度/℃	完成液浓度/%	蒸发量/（L·h^{-1}）	出料量/（L·h^{-1}）	蒸发压力/MPa	蒸发温度/℃	压缩机出口压力/MPa	压缩机出口温度/℃
设计值	85	5	20～30	过饱和	80	4～5	0.07（可调）	90（饱和温度）	0.10～0.14（可调）	100～110（饱和温度）

3.3　MVR 蒸发处理设备选型及组装

根据 MVR 蒸发处理工艺流程进行设备选型，各设备技术参数见表 5。

表 5　MVR 蒸发处理主要设备

Table 5　Main equipment of MVR evaporation treatment

类别	名称	技术参数	主体材质	数量
罐类	原料缓冲罐	公称容积 0.1 m^3，配 0.75 kW 搅拌电机	316L	1 台
	冷凝水罐	公称容积 0.1 m^3，工作温度 110 ℃	316L	1 台
	蒸发结晶器	DN500 mm×1 500 mm，上锥角 60°、下锥角 45°，介质：废水、蒸汽	2205	1 台
	母液罐	公称容积 0.1 m^3，工作温度 80 ℃，工作压力：常压	2205	1 台
换热器	冷凝水预热器	换热面积 1.0 m^2	2205	1 台
	不凝气冷却器	换热面积 0.5 m^2	2205	1 台
	强制循环换热器	立式单管程列管式换热器，换热面积 14 m^2，换热管 ϕ25 mm×1 450 mm×1.5 mm	管程 TA2 壳程 316L	1 台
压缩机	蒸汽压缩机	螺杆式压缩机，流量 5 m^3/min，功率 11 kW	316L	1 台
泵类	进料泵	流量 0.5 m^3/h，扬程 10 m，功率 0.75 kW	316L	1 台
	冷凝水泵	流量 0.5 m^3/h，扬程 15 m，功率 0.75 kW	316L	1 台
	强制循环泵	卧式轴流泵，流量 230 m^3/h，扬程 5 m，功率 7.5 kW，工作温度 100 ℃	2205	1 台
	母液泵	流量 0.5 m^3/h，扬程 15 m，功率 0.75 kW	316L	1 台
	水环真空泵	型号 2BV2060，极限压力 3.3 kPa，功率 0.75 kW	304	1 台
离心机	平板离心机	处理量 10 kg/h，功率 2.0 kW	316L	1 台
管道	管道/阀门/管件等	包括工艺管道及所含管件阀门	2205/316L	1 批
控制阀	电动调节阀	单座/角形调节型	2205/316L	3 台
仪表	压力变送器	就地 LCD，带远传，4～20 mA 信号，24V DC	316L	2 台
	差压液位计（单、双法兰）	就地 LCD，带远传，4～20 mA 信号，24V DC	钽膜片	1 台
	在线 pH 计	4～20 mA 信号，24V DC		1 台
	电磁流量计	衬里 PTFE，24V DC，4～20 mA 信号（HART）	钛电极	3 台
	温度传感器	电极 PT100，24V DC，4～20 mA 信号	316L/TA2 套管	3 台
	现场压力表、温度计			1 批
电控	控制柜	电缆、桥架、开关柜，PLC 自控柜、WinCC 程序、现场控制箱		1 套
其他	蒸汽发生器	额定蒸发量 50 kg/h，功率 36 kW	304	1 台
	支撑平台		碳钢防腐	1 项
	保温			1 项

废水含有大量氯离子，腐蚀性较强，按照《腐蚀数据和选材手册》及工程经验进行选材。强制循环换热器的换热管采用 TA2，结晶器和强制循环管材质选择双相不锈钢 2205，可有效减缓设备的腐蚀。

现场组装完成后，MVR 设备长×宽×高＝3.60 m×2.20 m×4.80 m，质量约 3.5 t，系统装机功率约 24 kW（不含蒸汽发生器）。由于试验现场没有生蒸汽来源，本试验配备 1 台蒸汽发生器作为预热 MVR 蒸发系统的热源。MVR 蒸发系统外接动力电 380 V、自来水 0.15 MPa。

3.4　电渗析浓水试验结果及分析

对电渗析浓水进行 MVR 蒸发处理试验，取电渗析浓水 4 m^3 存放于试验原料桶中。为防止

蒸汽夹带雾沫进入压缩机而导致冷凝水不能达标排放，在原料桶中投加消泡剂（主要成分为改性有机硅，每 m^3 废水投加 0.1～0.2 L 消泡剂）[9]。

试验进行 7 d，每天连续运行 8 h，分别在不同参数条件下进行设备调试，使系统稳定运行；记录各参数下正常运行时（每天选取 4 h，每小时记录 1 次）的压力、温度、蒸发量及耗电量，验证 MVR 系统的蒸发效果和能耗情况。

3.4.1 MVR 系统运行情况分析

3.4.1.1 蒸发压力对蒸发效果的影响

调节蒸发结晶器在不同的蒸发压力条件下（0.06、0.07、0.08 MPa），对 MVR 系统的蒸发量及耗电量进行考察，试验平均结果见表 6。可以看出，蒸发压力为 0.07 MPa 时，平均蒸发量相对最大，平均耗电量相对最低，平均蒸发量约 83 L/h，平均耗电量约 11.3 kW·h/h。

3.4.1.2 压缩机出口压力对蒸发效果的影响

在蒸发结晶器压力一定的情况下（0.07 MPa、90 ℃），调节压缩机出口压力条件（0.10～0.11 MPa、0.12～0.13 MPa），对 MVR 系统的蒸发量及耗电量进行考察，试验平均结果见表 7。

表 6 蒸发压力对 MVR 蒸发效果的影响

Table 6 Effect of evaporation pressure on evaporation effect of MVR

序号	蒸发结晶器压力/MPa	蒸发结晶器温度/℃	压缩机的出口压力/MPa	压缩机的出口温度/℃	平均蒸发量/（L·h^{-1}）	平均耗电量/（kW·h·h^{-1}）
1#-1	0.07	90.1	0.10～0.11	100.4	83	11.3
1#-2	0.06	86.0	0.10～0.11	100.6	67	13.0
1#-3	0.08	93.5	0.10～0.11	102.4	59	12.1

表 7 压缩机出口压力对 MVR 蒸发效果的影响

Table 7 Effect of compressor outlet pressure on evaporation effect of MVR

序号	蒸发结晶器压力/MPa	蒸发结晶器温度/℃	压缩机的出口压力/MPa	压缩机的出口温度/℃	平均蒸发量/（L·h^{-1}）	平均耗电量/（kW·h·h^{-1}）
1#-1	0.07	90.1	0.10～0.11	100.4	83	11.3
1#-4	0.07	90.1	0.12～0.13	105.5	82	12.6

由表 7 可知，两组压力下的蒸发量基本持平，说明压缩机出口压力对蒸发量基本无影响；压缩机出口压力为 0.10～0.11 MPa 的平均耗电量相对较低。

3.4.2 冷凝水水质分析

MVR 系统蒸发产生的冷凝水比较清澈，无明显杂质。对 1#-1、1#-2、1#-3、1#-4 试验产生的冷凝水分别取样进行水质检测，结果见表 8。可以看出，电渗析浓水经 MVR 蒸发后得到的 4 组冷凝水水质指标相近。各冷凝水中 U、^{226}Ra 均达到了《铀矿冶辐射防护和辐射环境保护规定》（GB 23727—2020）表 3 的排放限值，总 α 放射性、总 β 放射性均达到了《污水综合排放标准》（GB 8978—1996）的表 1 要求，pH、COD_{Mn}、NH_3-N、TP、F^- 及重金属等均达到了《地表水环境质量标准》（GB 3838—2002）表 1 的三类水标准限值[10]，达标排放率 100%。冷凝水也可回用于生产。

3.4.3 母液水质分析

由于进入 MVR 系统的电渗析废水浓度较低，试验过程中未能结晶出盐，MVR 系统蒸发到无法循环运行后，最终得到母液约 0.165 m^3（排回到蒸发池）。根据处理的总废水 4 m^3 计算，产生冷凝水约 3.835 m^3，减容率约为 95.9%。

母液比较浑浊，且底部有部分沉淀，经分析检测得知沉淀物的主要成分为 $CaCO_3$ 和 $MgCO_3$。这是由于废水中含少量 $Ca(HCO_3)_2$ 和 $Mg(HCO_3)_2$，经加热后分解并最终形成沉淀。母液主要指标检测结果见表 9。可以看出，母液中电导率、TDS、U、Cl^-、SO_4^{2-} 的浓缩程度较高，达到了废水减容的目的。

表 8　1#-1、1#-2、1#-3、1#-4 冷凝水主要指标

Table 8　Main indexes of 1#-1, 1#-2, 1#-3 and 1#-4 condensate water

项目	电导率/($\mu S \cdot cm^{-1}$)	TDS/($mg \cdot L^{-1}$)	ρ(U)/($mg \cdot L^{-1}$)	$C(^{226}Ra)$/($Bq \cdot L^{-1}$)	总 α 放射性/($Bq \cdot L^{-1}$)	总 β 放射性/($Bq \cdot L^{-1}$)	pH	ρ_B/($mg \cdot L^{-1}$)		
								COD_{Mn}	NH_3-N	TP
1#-1 冷凝水	94.09	57.22	1.8×10^{-4}	0.016	0.09	0.04	7.56	1.36	未检出	未检出
1#-2 冷凝水	111.64	59.86	1.7×10^{-4}	0.01	0.06	0.08	7.50	1.49	未检出	未检出
1#-3 冷凝水	132.1	84.72	1.4×10^{-4}	0.005	0.08	0.06	7.46	1.98	未检出	未检出
1#-4 冷凝水	153.31	87.82	1.6×10^{-4}	0.025	0.09	0.04	7.26	1.98	未检出	未检出
参考排放限值	—	—	0.3	1.1	1	10	6～9	6	1	0.2

项目	ρ_B/($mg \cdot L^{-1}$)								
	F^-	Cr^{6+}	Cu	Zn	Pb	As	Se	Hg	Cd
1#-1 冷凝水	0.075	0.011	3.24×10^{-3}	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出
1#-2 冷凝水	0.086	0.008	2.87×10^{-3}	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出
1#-3 冷凝水	0.14	0.008	2.67×10^{-3}	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出
1#-4 冷凝水	0.094	未检出	1.64×10^{-3}	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出
参考排放限值	1	0.05	1	1	0.05	0.05	0.01	0.000 1	0.005

表 9　母液主要指标

Table 9　Main indexes of mother liquor

电导率/($\mu S \cdot cm^{-1}$)	TDS/($mg \cdot L^{-1}$)	ρ(U)/($mg \cdot L^{-1}$)	$C(^{226}Ra)$/($Bq \cdot L^{-1}$)	总 α 放射性/($Bq \cdot L^{-1}$)	总 β 放射性/($Bq \cdot L^{-1}$)	pH	ρ_B/($mg \cdot L^{-1}$)					
							COD_{Mn}	NH_3-N	TP	F^-	Cr^{6+}	Cu
3.38×10^5	2.22×10^5	18.37	1.13	259	126	9.86	355	0.59	<2	<5	样品浑浊	<0.1

ρ_B/($mg \cdot L^{-1}$)												
Zn	Pb	As	Se	Hg	Cd	Cl^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
<1	<0.5	1.19	8.00	<0.005	<0.05	1.37×10^5	2.98×10^4	3.01×10^4	4.98×10^3	1.75×10^5	61.61	1.37

3.5　蒸发池废水试验结果及分析

对蒸发池废水进行 MVR 蒸发处理试验,按照 MVR 处理电渗析浓水的最佳蒸发压力和温度,保持蒸发结晶器压力和温度分别为 0.07 MPa、90 ℃,压缩机出口压力为 0.10～0.11 MPa,并在原料中投加消泡剂。按每天 24 h 连续进行,MVR 系统的冷凝水排放量(蒸发量)基本稳定在 80～90 L/h 左右。试验期内冷凝水水质清澈,冷凝水部分指标见表 10。

表 10　2#-1、2#-2、2#-3 冷凝水部分指标检测结果

Table 10　Partial index test results of 2#-1, 2#-2 and 2#-3 condensate water

项目	pH	电导率/($\mu S \cdot cm^{-1}$)	$\rho(Cl^-)$/($mg \cdot L^{-1}$)	$\rho(SO_4^{2-})$/($mg \cdot L^{-1}$)	$\rho(HCO_3^-)$/($mg \cdot L^{-1}$)
2#-1 冷凝水	8.20	261	28	43	55
2#-2 冷凝水	6.65	94	<5	39	38
2#-3 冷凝水	6.90	157	19	36	46

对比表 10 和表 1 发现，冷凝水的 Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^- 含量均比原水降低了 2～3 个数量级，pH、电导率与表 8 中的冷凝水指标相近，冷凝水能够达标排放。

试验运行 20 d，试验期内共处理蒸发池废水约 35 m^3，累计耗电量约 3 069 kW·h(不含蒸汽发生器)，最终剩余含固母液约 600 L，减容率约 98%。对含固母液进行离心分离，得到少量结晶盐，剩余母液排回蒸发池。对结晶盐进行 X 射线荧光分析及质谱测定，结果见表 11。结晶盐主要成分为氯化钠、硫酸钠，并含有少量镁、铀及其他杂质。其中，铀质量分数为 0.11 mg/g，放射性水平较低。建议将结晶盐装入废物桶贮存，待矿山退役治理时一并处置。

表 11 结晶盐检测结果

Table 11 Test results of crystalline salt

w(U)/(mg·g^{-1})	总 α 放射性/(Bq·g^{-1})	总 β 放射性/(Bq·g^{-1})	a(^{226}Ra)/(Bq·g^{-1})	w_B/%						
				Na_2O	Cl	SO_3	MgO	SiO_2	CaO	Al_2O_3
0.11	1.84	1.65	0.022 6	49.8	26.6	19.7	2.28	0.615	0.4	0.28

w_B/%										
Fe_2O_3	Cr_2O_3	K_2O	V_2O_5	TiO_2	U	P_2O_5	NiO	CuO	SeO_2	SrO
0.168	0.045	0.038	0.031	0.027	0.015	0.01	0.01	0.005	0.004	0.003

3.6 能耗分析及经济评价

吨水用电 88 kW·h、需要消泡剂 0.1～0.2 L，以电价 0.5～0.6 元/(kW·h)、药剂单价 20 元/L 计，MVR 处理每吨废水的运行费用为 46～57 元。本试验运行费用与其他行业(如：化工、医药、印染、食品等[11])采用 MVR 技术处理含盐废水的吨水运行费用(约 40～50 元)相近。

4 结论

采用 MVR 技术处理中性地浸采铀矿山蒸发池废水，技术可行，产生的冷凝水可达标排放或回用，减容率达 95%。

原水 pH 及离子浓度对蒸发量及蒸发效果基本无影响，蒸发结晶器压力和温度分别在 0.07 MPa、90 ℃时，蒸发效果最好；压缩机出口压力在 0.10～0.11 MPa 时，耗电量最低；吨水处理费用约为 46～57 元。

MVR 蒸发产生的冷凝水，U、^{226}Ra 满足《铀矿冶辐射防护和辐射环境保护规定》(GB 23727—2020)排放限值，总 α 放射性、总 β 放射性满足《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)要求，pH、COD_{Mn}、NH_3-N、TP、F^- 及重金属等均达到了《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的三类水标准限值，冷凝水可回用于生产。

参考文献：

[1] 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，2019，39(1)：14-20.

[2] 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.

[3] 李喜龙，王海珍，蔚龙凤，等. 地浸矿山风能增效蒸发装置的研究与应用[J]. 铀矿冶，2019，38(2)：128-132.

[4] 刘立，张继军，刘燕，等. 机械蒸汽再压缩技术在蒸发领域的应用[J]. 化学工程，2014，42(11)：1-5.

[5] 江泳，吴兴东. MVR 技术在含氯废水治理中的应用[J]. 氯碱工业，2019，55(3)：26-28.

[6] XU L，LIU N，ZHANG G. Waste water treatment of CO_2+O_2 in-situ leaching uranium[M]. Berlin：The New Uranium Mining Boom，2011：31-37.

[7] 生态环境部，国家市场监督管理总局. 铀矿冶辐射防护和辐射环境保护规定：GB 23727—2020[S]. 北京：中国标准出版社，2020.

[8] 国家环境保护总局，国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准：GB 3838—2002[S]. 北京：中国标准出版社，2002.

[9] 张冉冉，刘公召. 有机硅消泡剂的研究进展及应用[J]. 化工技术与开发，2015(8)：20-24.

[10] 国家环境保护局，国家技术监督局. 污水综合排放标准：GB 8978—1996[S]. 北京：中国标准出版社，1996.

(下转第 100 页)

司档案管理办法[Z].北京:中国核工业集团有限公司,2019.
[8] 蔡盈芳.准确理解和把握科研档案工作的原则[J].中国档案,2021(3):62-63.
[9] 唐利雷.铀矿冶档案利用中存在的问题及对策[J].铀矿冶,2022,41(3):330-332.
[10] 陈艳.明确科研档案管理责任 优化科研档案验收制度[J].兰台内外,2020(33):15-16.
[11] 刘紫秀,马逸竹.创新科研档案管理模式 助推军工企业快速发展[J].办公室业务,2022(20):151-153.

Common Problems and Suggestions in Archive Acceptance of Research Project of Uranium Mining and Metallurgy

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

Abstract: The special acceptance is based on the archive, the archive acceptance of uranium mining and metallurgy research project is an important link in the project acceptance. In view of the problems existing in the archive acceptance of research project, the existing problems and their causes from the perspectives of integrity, accuracy, systematization, standardization and security were analyzed, and some reasonable suggestions to solve the related problems were put forward.

Key words: uranium mining and metallurgy; archive acceptance; problem; suggestion

(上接第 96 页)

[11] 田立辉,郭杰,郭艳丽.含盐废水 MVR 蒸发处理工艺设计及成本分析[J].山东化工,2016(18):175-177.

Study on MVR Technology for Treating Evaporation Pond Wastewater From Neutral In-situ Leaching Uranium Mine

WANG Zhanlong[1], DU Juan[1], LI Li[1], HE Lining[1], MA Linna[1], LIAN Guoxi[1], CAO Junpeng[2]
(1. The Fourth Research and Design Engineering Corporation, CNNC, Shijiazhuang 050021, China;
2. Tongliao Uranium Co., Ltd., CNNC, Tongliao 028000, China)

Abstract: It is difficult to treat radioactive wastewater by increasing the area of evaporation pool alone when using natural evaporation process. Taking the concentrated water of electrodialysis and the wastewater of evaporation pond in a neutral in-situ leaching uranium mine as the research object, MVR evaporation process was used to investigate the quality of condensate water and evaporation effect under different pressures and temperatures. The results show that the condensate water can meet discharge or reuse standards, the volume reduction rate reaches 95%, and the MVR has the best evaporation effect at 0.07 MPa and 90 ℃.

Key words: MVR; in-situ leaching uranium; evaporation pond; condensate water; electrodialysis