

一种高效提升蒸发池蒸发能力的立体蒸发系统

郭大平¹, 纪俊双², 李玉雷¹, 胡良才¹, 张 宁¹

(1. 中核第四研究设计工程有限公司, 河北 石家庄 050021;

2. 河北省水利规划设计研究院有限公司, 河北 石家庄 050011)

摘要: 地浸铀矿山吸附过程中产生的放射性尾液一般通过自然蒸发方式进行消纳。主动蒸发的加速技术能耗损失大, 运行费用高, 规模化应用受限; 被动加速装置一般对蒸发能力的提升程度有限。提出了一种具有多个水平蒸发面的框架结构新型蒸发塔, 将蒸发塔通过矩阵形式均匀布置在蒸发池内, 各蒸发塔间通过塔顶废水管道进行串联, 形成协同立体的蒸发面结构, 极大提升了蒸发空间的利用层次, 使原蒸发池的蒸发能力提高。通过开展小型模拟试验, 拟合得到的蒸发塔矩阵系统的蒸发能力经验公式, 可实现对该立体蒸发系统的精细化和定量化设计。该方法具备环保、高效、无能耗的优点, 适用于干燥、少风地区, 可有效节约土地资源和工程投资。

关键词: 地浸铀矿山; 新型蒸发塔; 蒸发池; 立体蒸发系统; 无能耗; 高效

中图分类号: TL941 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2025)04-0143-07

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.03.04

原地浸出采铀技术具有开采成本低、年产量大、开采速度快、水土流失和环境污染相对较轻、废渣量较少等优点^[1-4], 但生产过程中不可避免地产生放射性废液。为保护周边地下水资源, 一般将吸附过程产生的放射性尾液处理后排至蒸发池, 通过自然蒸发方式消纳^[5-7]。自然蒸发池工艺简单、操作容易、碳排放量低、不产生新污染物, 但效率低^[8-11]。自然蒸发池一般采用夯土式结构, 深度不超过 1.5 m, 池壁坡度一般不陡于 1:2^[12], 池底、池壁铺设土工膜等防渗结构层, 防渗结构层外覆盖保护层。蒸发池面积通过废水年排放量与当地净蒸发量的比值来确定, 地浸铀矿山所采用的蒸发池建设面积普遍较大。

目前, 利用风能增效的被动蒸发装置在海水提盐和废水处理上应用较多^[13-14]。采用雾化装置、加热装置、吹风装置和复合装置等主动加速技术, 均需在连续供电的情况下才能实现加速蒸发的效能, 能耗损失大, 运行费用高, 且难以大面积投入使用; 通过使用快速蒸发材料或利于蒸发的结构等被动加速技术, 在不消耗外部能源的情况下可实现蒸发效率的提升, 但提升程度有限。曾

志伟等人采用碳纤维纺织布制作蒸发帘, 强化蒸发池的蒸发能力, 但存在蒸发帘结垢问题^[15-18]。笔者提出一种环保、高效、无能耗, 适用于干燥、少雨、少风地区的立体蒸发加速系统, 该系统通过辅助蒸发设备(新型蒸发塔)的矩阵化串联, 实现废液蒸发面积的立体布置, 在有限占地面积内可使有效蒸发面积成倍增加, 提升蒸发池的蒸发能力, 节约土地资源和工程投资, 同时方便现场管理。

1 蒸发池高效立体蒸发系统模型设计

1.1 总体设计思想

将具备多个蒸发面的新型蒸发塔在传统蒸发池内进行串联排列, 布置成蒸发塔矩阵, 与原有蒸发池共同构建起高效立体蒸发系统, 增加蒸发池的有效蒸发面积, 提升蒸发池整体蒸发效率。

1.2 新型蒸发塔模型方案

新型蒸发塔采用易拆卸组装、可重复回收利用的不锈钢管框架结构, 由底座框架、立柱、顶部横梁, 以及各层蒸发面支架、支架撑杆、配套蒸发

收稿日期: 2024-04-10

第一作者简介: 郭大平(1985—), 男, 黑龙江大兴安岭人, 硕士, 正高级工程师, 主要从事铀尾矿库设计、科研及安全评价工作。

通信作者简介: 纪俊双(1985—), 女, 河北廊坊人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水利工程规划设计与研究工作。

薄膜、废水管道支座等组成(图1~图3)。底座框架采用圆形不锈钢管材料(钢管经过特别防腐处理),框架宽1.2~2.0 m、长1.6~2.4 m,框架平面投影形状为“日”字形,各段钢管间通过螺母接头、套管接头、插栓接头等可拆卸连接方式进行刚性连接。为保证整体结构稳定,在底座宽度方向横杆与垂直立柱之间设置斜杆支撑,必要时可将底座框架锚固在蒸发池内,并在框架杆体上压设无纺土工布沙袋作为平衡风力影响的配重。为便于设置铰接头,2根立柱采用方形不锈钢管材料,立柱高为1.6~2.4 m,柱外侧面设置蒸发面支架铰接头和蒸发面支架撑杆孔,立柱通过套管接头、插栓接头等可拆卸连接方式与底座框架横梁两端进行刚性连接。顶部横梁采用方形不锈钢管材料,通过可拆卸连接方式与2根立柱顶端进行刚性连接。

蒸发面支架采用圆形不锈钢管材料,平面投影形状为开口矩形,支架长度与底座框架长度相同,支架宽为50~90 cm,其中宽度方向的支架杆体下部设有蒸发面支架撑杆插孔;在高度方向上按20~50 cm间距通过销钉等铰接方式将支架对称布置在立柱两侧,各支架宽度由下至上逐个增加3~10 cm,蒸发面支架数量一般控制在8个以内。宽度方向的支架杆体上设有蒸发薄膜拦挡柱头,长度方向的支架杆体中部设有溢流口。蒸发面支架撑杆采用经防锈处理的铸铁棍或合金棍材料,撑杆支撑在立柱和蒸发面支架的撑杆插孔内,将蒸发面支架撑起,撑杆与立柱夹角取40~60°,且保持蒸发面支架外侧略高于内侧,使支架与水平面夹角为1~6°。

在蒸发面支架上铺设薄膜,废水在支架上形成类似坡屋顶形状的蓄水面。薄膜采用高强度透明PVC膜,厚0.05~1.0 mm。薄膜长度比两侧蒸发面支架跨度长10 cm以上,薄膜宽度比蒸发面支架长度长16 cm以上;薄膜四边通过“Ω”字形卡箍按10~20 cm间距固定在蒸发面支架上,卡箍选用PVC或橡胶材质。必要时可在蒸发面支架上先铺设一层大孔轻质钢丝网作为薄膜的支承面。PVC膜的表面光滑、化学惰性好,不粘附水垢,薄膜上的沉淀物可采用水枪冲洗。废水管道支座通过螺纹接头、套管接头等可拆卸的刚性连接方式固定在顶部横梁上,管道支座间距为10~25 cm。

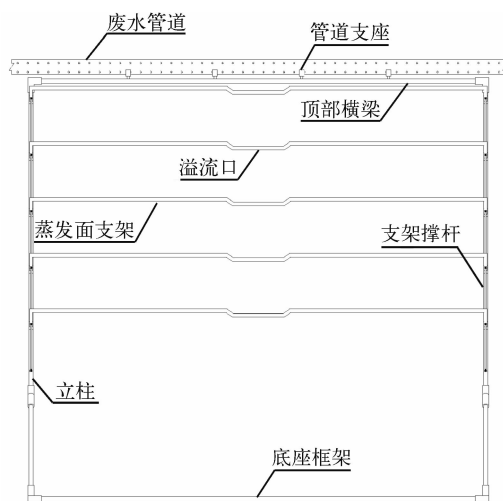


图1 蒸发塔正视示意图

Fig. 1 Front view diagram of the evaporation tower

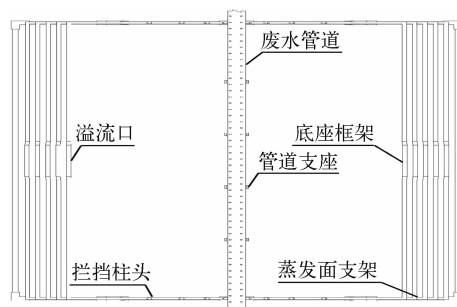


图2 蒸发塔俯视示意图

Fig. 2 Vertical view diagram of the evaporation tower

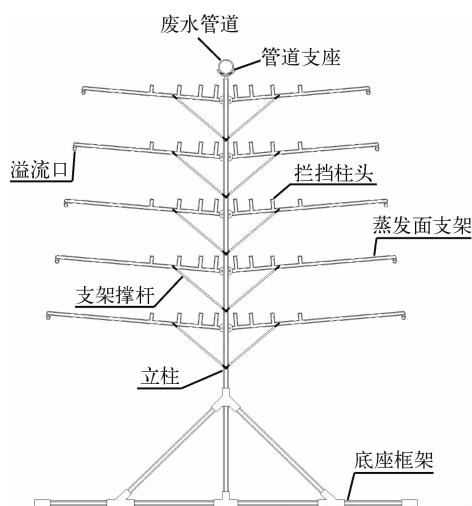


图3 蒸发塔侧视示意图

Fig. 3 Side view diagram of the evaporation tower

1.3 高效立体蒸发系统

蒸发塔通过矩阵形式均匀布置在蒸发池内,各蒸发塔间通过塔顶废水管道进行串联,与蒸发池构成高效立体蒸发系统。水冶厂废水通过管道

花孔在自重作用下布洒在各蒸发塔蒸发面上,形成多面、立体的蒸发面结构,极大提升蒸发空间的利用层次,使原蒸发池的蒸发能力产生倍数放大效应,且不产生额外能源消耗。蒸发塔矩阵走向与风向平行,可最大化利用风力资源^[19-20]。该高效立体蒸发系统适用于气候干燥、少雨、少风地区。由蒸发塔矩阵和蒸发池构成的高效立体蒸发加速系统平面布置见图4。

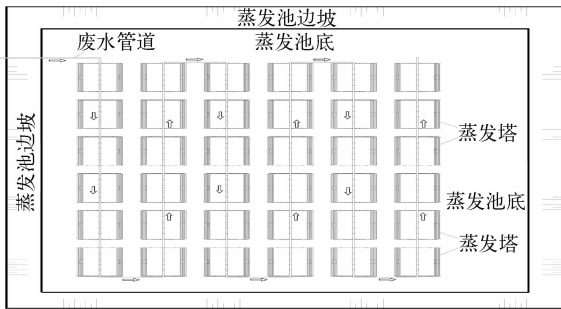


图4 高效立体蒸发加速系统平面布置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the layout of efficient three-dimensional evaporation acceleration system

2 高效立体蒸发系统蒸发能力计算

2.1 计算经验公式

高效立体蒸发系统内蒸发面的实际蒸发能力受蒸发面与水平面夹角、蒸发面与蒸发池水面距离、蒸发面与上层蒸发面间距、蒸发面与蒸发塔间距等因素影响。采用工业风机模拟自然风,配制硫酸钠溶液代替蒸发池废水^[21],开展小型模拟试验;通过拟合试验数据,确定主要影响因素的折减系数,利用折减系数对各蒸发面的蒸发能力进行修正,最终得到立体蒸发加速系统总蒸发能力的经验计算公式。

$$EM = EM_T + EM_S + EM_M + EM_E,$$

式中: EM —蒸发塔矩阵和蒸发池共同构成的立体蒸发加速系统的年蒸发能力, m^3 ; EM_T —立体蒸发加速系统内布置的蒸发塔矩阵的年蒸发能力, m^3 ; EM_S —蒸发塔矩阵下方蒸发池液面的年蒸发能力, m^3 ; EM_M —相邻蒸发塔之间区域的蒸发池液面的年蒸发能力, m^3 ; EM_E —蒸发塔矩阵以外的蒸发池液面年蒸发能力, m^3 。

2.1.1 EM_T 计算

$$EM_T = \sum_{i=1}^m kn\alpha\beta_i\gamma_i S_i (E - R),$$

式中: k —蒸发量折减系数; n —蒸发塔矩阵内所包含的蒸发塔数量,座; α — ϕ 值对蒸发塔内蒸发面的蒸发能力影响系数; β_i —地面蒸发池大水面对蒸发塔内第*i*层蒸发面的蒸发能力影响系数; γ_i —蒸发塔内上层蒸发面对第*i*层蒸发面的蒸发能力影响系数,对于最顶层蒸发面, $\gamma_i=1.0$; S_i —单座蒸发塔内由下至上第*i*层蒸发面的面积, m^2 ; E —当地年平均蒸发量, mm ; R —当地年平均降雨量, mm 。

$$S_i = 2b_i l,$$

式中: b_i —蒸发塔内由下至上第*i*层蒸发面的宽度, m ; l —蒸发塔内各蒸发面的长度, m 。

$$\alpha = e^{-(\tan\phi)^{1.64}},$$

式中: ϕ —蒸发塔内蒸发面支架与水平面的夹角, $^\circ$ 。

$$\beta_i = qe^{-0.02h_i^{-2.6}},$$

式中: q —当地蒸发量对蒸发折减作用的影响系数,当年蒸发量 ≥ 3000 mm 时, $q=0.98$; 当 2000 $mm \leq$ 年蒸发量 < 3000 mm 时, $q=0.95$; 当年蒸发量 < 2000 mm 时, $q=0.92$; h_i —蒸发面距离蒸发池底水面的距离, m 。

$$\gamma_i = e^{-0.04b_i^{1.08} h_i^{0.17} h^{-0.96}},$$

式中: h —蒸发塔内蒸发面的垂向间距, m 。

2.1.2 EM_S 计算

$$EM_S = kn\delta S_S (E - R),$$

式中: S_S —单座蒸发塔遮挡的蒸发池液面面积, m^2 ; δ —蒸发塔矩阵对其下方蒸发池液面的蒸发能力影响系数。

$$S_S = 2b_1 l,$$

式中: b_1 —蒸发塔内由下至上第1层蒸发面的宽度, m 。

$$\delta = e^{-0.06m^{0.36} h_1^{-0.97}},$$

式中: m —单座蒸发塔内蒸发面的层数,层。

2.1.3 EM_M 计算

$$EM_M = kn\epsilon S_M (E - R),$$

式中: ϵ —蒸发塔矩阵对蒸发塔之间空地区域蒸发池液面的蒸发能力影响系数; S_M —单座蒸发塔所控制的周围空地区域的蒸发池液面面积, m^2 。

$$S_M = ld_w + 2b_1 d_s + d_w d_s,$$

式中: d_w —各蒸发塔的横向间距, m ; d_s —各蒸发塔的纵向间距, m 。

$$\epsilon = e^{-0.02m^{0.61} h_1^{-0.52}}.$$

2.1.4 EM_E 计算

$$EM_E = k[S - n(S_S + S_M)](E - R),$$

式中： S —蒸发池面积， m^2 。

2.2 系统设计及计算方法

高效立体蒸发系统的设计构建及计算方法可按如下步骤进行：1)收集项目区的年均蒸发量和降雨量、铀水冶厂废水排放制度(排放时长、排放流量)、拟建蒸发池面积等基础数据。2)初步拟定单座蒸发塔占地尺寸，包括蒸发塔最大蒸发面的占地面积和塔与塔的间隔面积。3)扣除蒸发池内的保留面积后，计算求得立体高效蒸发系统内布置蒸发塔的数量。4)按最大尺寸的蒸发塔方案对立体高效蒸发系统的蒸发能力进行检验，以确定项目是否具备应用本方法的应用条件。5)如具备应用条件，继续对蒸发塔方案进行优化设计，确定最终的立体高效蒸发系统设计方案。

3 蒸发池高效立体蒸发系统应用示例

3.1 项目概况

西北某地浸铀矿山，水冶厂年排放工艺废水量 $16\,400\,\text{m}^3$ ，全部排入蒸发池进行自然蒸发处理，实现零污水排放。项目地最大降雨量为 $860\,\text{mm}$ ，平均蒸发量为 $2\,970\,\text{mm}$ ，蒸发能力折减系数按 0.8 考虑，则采用传统蒸发池所需池体投影面积 $=16\,400 \div (2\,970 - 860) \times 1\,000 \div 0.8 \approx 9\,720\,\text{m}^2$ 。目前可利用建设场地面积仅为 $3\,900\,\text{m}^2$ ，其每年蒸发能力 $=(2\,970 - 860) \div 1\,000 \times 0.8 \times 3\,900 = 6\,583.2\,\text{m}^3$ ，与目标蒸发量差距较大。为实现目标蒸发量，设计采用高效立体蒸发系统以满足蒸发池建造面积的限制。

3.2 立体蒸发系统方案设计

3.2.1 初拟蒸发塔占地尺寸

为方便蒸发塔操作管理，蒸发塔尺寸不宜过大，初步拟定蒸发塔平面尺寸为 $1.8\,\text{m} \times 1.2\,\text{m}$ ，考虑间隔距离后，其占地尺寸为 $2.3\,\text{m} \times 1.7\,\text{m}$ 。

3.2.2 计算高效立体蒸发系统内蒸发塔数量

蒸发池内保留约 20% 面积供后续增设蒸发塔使用，则池内实际可用面积 $=3\,900 \times (1 - 0.2) = 3\,120\,\text{m}^2$ 。则立体高效蒸发系统内可放置蒸发塔数量 $=3\,120 \div (2.3 \times 1.7) \approx 798$ 座，取整为 800 座。

3.2.3 检验高效立体蒸发系统的可行性

首先拟定一个大尺寸蒸发塔方案来检验立体高效蒸发系统是否在本工程可行。检验方案：蒸发塔上设置 8 层蒸发架，蒸发架与水平面夹角为 5° ；第一层蒸发架单侧宽度为 $0.6\,\text{m}$ ，第一层蒸发架以上各层蒸发架单侧宽度依次减少 $3\,\text{cm}$ ；第一层蒸发架到蒸发池底距离为 $0.6\,\text{m}$ ，第一层以上各层蒸发架之间距离为 $0.2\,\text{m}$ ；各蒸发塔之间的横纵向间距均为 $0.5\,\text{m}$ 。

根据当地水文资料， $E = 2\,970\,\text{mm}$ ， $R = 860\,\text{mm}$ ，取 $k = 0.8$ ， $q = 0.95$ ；根据大尺寸蒸发塔方案，得到蒸发塔几何参数(表 1)。根据计算公式，得到检验方案各层蒸发架及不同区域蒸发池水面的折减系数(表 2)。根据计算公式及表 2 计算结果，得到采用检验方案的立体高效蒸发系统各区域的蒸发能力(表 3)。由表 3 可知，采用检验方案的立体高效蒸发系统总蒸发能力为 $21\,723\,\text{m}^3 > 16\,400\,\text{m}^3$ ，因此立体高效蒸发系统在本工程可行。

表 1 检验方案蒸发塔的几何参数

Table 1 Geometric parameters of the evaporation tower in the test plan

系数名称	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	h_8	h	l	b_1
计算结果	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	0.2	1.8	0.6
系数名称	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	ϕ	m	d_w	d_s
计算结果	0.57	0.54	0.51	0.48	0.45	0.42	0.39	5	8	0.5	0.5

表 2 检验方案各层蒸发架及不同区域的各项折减系数

Table 2 Reduction factors for each layer of evaporation rack and different areas in the test plan

系数名称	α	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	γ_1
计算结果	0.982	0.881	0.917	0.931	0.938	0.942	0.944	0.946	0.947	0.887
系数名称	γ_2	γ_3	γ_4	γ_5	γ_6	γ_7	γ_8	δ	ϵ	
计算结果	0.893	0.899	0.905	0.910	0.916	0.922	0.928	0.812	0.911	

表3 检验方案所建立的立体高效蒸发系统
各区域的蒸发能力

Table 3 Evaporation capacity of each area in the
three-dimensional high-efficiency evaporation
system established by the test plan

系数名称	EM_T	EM_S	EM_M	EM_E	EM
计算结果/ m^3	15 897	2 369	2 154	1 303	21 723

3.2.4 蒸发塔方案优化

根据检验结果,可知检验方案的蒸发裕量过大。为简化蒸发塔结构,便于施工及日常维护管理,同时节约投资,需对蒸发塔方案进一步优化。

经试算,确定最优的蒸发塔内蒸发架数量为5层,蒸发架与水平面夹角为 5° ;第一层蒸发架单侧宽度为0.6 m,第一层蒸发架以上蒸发架单侧

宽度依次减少3 cm,第一层蒸发架到蒸发池底距离为0.6 m,第一层以上各层蒸发架之间距离为0.2 m,各蒸发塔之间的横纵向间距均为0.5 m。优化后蒸发塔几何参数见表4。根据计算公式,优化后蒸发塔各层蒸发架及不同区域蒸发池水面的折减系数见表5。

表4 优化后方案蒸发塔的各项几何参数

Table 4 Geometric parameters of the optimized
evaporation tower

系数名称	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h	l	b_1
计算结果	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	0.2	1.8	0.6
系数名称	b_2	b_3	b_4	b_5	ϕ	m	d_w	d_s
计算结果	0.57	0.54	0.51	0.48	5	8	0.5	0.5

表5 优化后蒸发塔各层蒸发架及不同区域的各项折减系数

Table 5 Various reduction factors for each layer of the optimized evaporation tower and different areas

系数名称	α	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	γ_5	δ	ϵ
计算结果	0.982	0.881	0.917	0.931	0.938	0.942	0.887	0.893	0.899	0.905	0.910	0.839	0.933

根据计算公式及表5,采用优化后蒸发塔方案的立体高效蒸发系统各区域的蒸发能力见表6。可以看出,采用优化后蒸发塔方案的立体高效蒸发系统年蒸发能力为16 609 m^3 ,满足16 400 m^3 的年蒸发量要求。

表6 优化后蒸发塔方案所建立的立体高效蒸发
系统各区域的蒸发能力

Table 6 Evaporation capacity of each area in the
three-dimensional high-efficiency evaporation system
established by the optimized evaporation tower scheme

系数名称	EM_T	EM_S	EM_M	EM_E	EM
计算结果/ m^3	10 655	2 447	2 204	1 303	16 609

3.3 立体高效蒸发系统与传统蒸发池对比

最终确定在3 900 m^2 的蒸发池内布置800座5层高的蒸发塔,串联形成立体蒸发加速系统。2年的模拟试验表明,该系统的蒸发能力能够满足生产废水的蒸发处理要求。在本项目中,采用传统蒸发池方案的年蒸发量为9 720 m^3 ;应用立体高效蒸发系统后,其年蒸发量达16 609 m^3 ,蒸发

能力提高近1.8倍。

4 结论

利用经验公式在蒸发池内构建蒸发塔矩阵,形成立体高效蒸发系统,在不耗费能源的情况下,提高了地浸铀矿山蒸发池的蒸发能力,节省了土地资源和工程投资,具有较高的工程应用价值和推广前景。

参考文献:

- [1] 陈海龙,廉冰,于志翔,等.原地浸矿蒸发池表面氡析出率估算方法研究[J].四川环境,2018,37(6):124-128.
CHEN Hailong, LIAN Bing, YU Zhixiang, et al. Study on the estimation method of radon exhalation rate from evaporation tank of in-situ leaching mine [J]. Sichuan Environment, 2018, 37(6): 124-128 (in Chinese).
- [2] 王广才,侯胜利,刘成龙,等.某区放射性环境地质评价研究[J].工程地质学报,2006,14(1):96-100.
WANG Guangcai, HOU Shengli, LIU Chenglong, et al. A survey and assessment of radioactive environ-

- mental geology[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(1): 96-100(in Chinese).
- [3] 李孝君. 地浸铀矿山的辐射影响及防护措施[J]. 绿色科技, 2019, 9(18): 118-119.
LI Xiaojun. Radiation effects and protection measures of the in-situ leaching uranium mining[J]. Journal of Green Science and Technology, 2019, 9(18): 118-119(in Chinese).
- [4] 徐强. 地浸矿山抽注比对溶浸范围影响研究[J]. 铀矿冶, 2017, 36(S1): 93-97.
XU Qiang. Study on influence of the ratio of drawing-injection to in-situ leaching solution diffusion range[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2017, 36(S1): 93-97(in Chinese).
- [5] 侯录, 关键, 侯江, 等. 地浸铀矿山蒸发池渗漏光纤监测系统研究与应用[J]. 铀矿冶, 2019, 38(3): 204-209.
HOU Lu, GUAN Jian, HOU Jiang, et al. Study and application of optical fiber monitoring system for leakage of evaporation pool at in-situ leaching uranium mine [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2019, 38(3): 204-209(in Chinese).
- [6] 徐乐昌, 张国甫, 高洁, 等. 铀矿冶废水的循环利用和处理[J]. 铀矿冶, 2010, 29(2): 78-81.
XU Lechang, ZHANG Guofu, GAO Jie, et al. Recycling and reuse of wastewater from uranium mining and milling [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2010, 29(2): 78-81(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] 吴光辉, 骆枫, 贾占举, 等. 放射性天然蒸发池退役技术研究进展[J]. 山东化工, 2022, 51(9): 83-86.
WU Guanghui, LUO Feng, JIA Zhanju, et al. Research progress on decommissioning technology of radioactive natural evaporation ponds [J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(9): 83-86(in Chinese).
- [9] 胡鄂明, 邵二言, 赵静. 含铀废水处理技术研究进展[J]. 湖南生态科学学报, 2016, 3(1): 42-48.
HU Eming, SHAO Eryan, ZHAO Jing. A study on the research progress in treatment of uranium-bearing wastewater[J]. Journal of Hunan Ecological Science, 2016, 3(1): 42-48(in Chinese).
- [10] 刘彬. 中国实现碳达峰和碳中和目标的基础、挑战和政策路径[J]. 价格月刊, 2021(11): 87-94.
LIU Bin. The basis, challenge and policy path for China to achieve the goal of e-mission peak and carbon neutrality[J]. Price Monthly, 2021(11): 87-94(in Chinese).
- [11] 路艳, 汪兆金, 张寅杰, 等. 浅谈含铀废水处理技术[J]. 甘肃科技纵横, 2014, 43(6): 33-36.
LU Yan, WANG Zhaojin, ZHANG Yinjie, et al. Brief discussion on uranium-containing wastewater treatment technology[J]. Scientific & Technical Information of Gansu, 2014, 43(6): 33-36(in Chinese).
- [12] 毛鑫磊, 曹俊鹏, 支冬安, 等. 某地浸采铀矿山蒸发池的安全环保管理[J]. 铀矿冶, 2022, 41(3): 326-329.
MAO Xinlei, CAO Junpeng, ZHI Dong'an, et al. Safety and environmental protection management of evaporation pond in an in-situ leaching uranium mine[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(3): 326-329(in Chinese).
- [13] 常泽辉, 侯静, 温雯. 太阳能海水淡化技术研究进展[J]. 价值工程, 2013, 32(6): 301-302.
CHANG Zehui, HOU Jing, WEN Wen. Advance in research of solar seawater desalination technology [J]. Value Engineering, 2013, 32(6): 301-302(in Chinese).
- [14] 赵敬恩. 基于风能利用的海水淡化技术途径研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2013.
- [15] 曾志伟, 王攀, 战景明, 等. 碳纤维蒸发帘强化蒸发池低放射性废水自然蒸发[J]. 工业水处理, 2022, 42(10): 160-165.
ZENG Zhiwei, WANG Pan, ZHAN Jingming, et al. Carbon fiber evaporative curtain enhanced natural evaporation of low-level radioactive wastewater in evaporation pool [J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(10): 160-165(in Chinese).
- [16] 林刚. 碳纤维产业“聚变”发展: 2020 全球碳纤维复合材料市场报告[J]. 纺织科学研究, 2021, 32(5): 27-49.
LIN Gang. Carbon fiber industry "fusion" development: 2020 global carbon fiber composite market report[J]. Textile Science Research, 2021, 32(5): 27-49(in Chinese).
- [17] 黄波, 江鸿, 贺周同, 等. 熔盐堆石墨控制棒套管碳纤维布增强工艺及性能研究[J]. 核技术, 2021, 44(4): 85-92.
HUANG Bo, JIANG Hong, HE Zhoutong, et al. Study on the reinforcement process and perform-

- ance of carbon fiber fabric for graphite control rod guide tube of molten salt reactor[J]. Nuclear Techniques, 2021, 44(4): 85-92(in Chinese).
- [18] 杜娟娟, 李元. 生态碳纤维在水污染治理中的吸附及挂膜性能研究[J]. 水资源开发与管理, 2019, 17(8): 48-51.
- DU Juanjuan, LI Yuan. Adsorption of ecological carbon fiber in water pollution control and study on its film-forming performance[J]. Water Resources Development and Management, 2019, 17(8): 48-51 (in Chinese).
- [19] 蔺发军, 王红光, 林乐科, 等. 风向对蒸发波导环境特性影响的研究[J]. 电波科学学报, 2007, 22(3): 410-413.
- LIN Fajun, WANG Hongguang, LIN Leke, et al. Influence of wind direction on characteristics of evaporation duct[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(3): 410-413(in Chinese).
- [20] 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.
- LI Xilong, WANG Haizhen, WEI Longfeng, et al. Research and application of wind energy for synergistic evaporator at in-situ leaching mine[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2019, 38(2): 128-132 (in Chinese).
- [21] 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(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).

A Three-dimensional Evaporation System for Efficiently Enhancing the Evaporation Capacity of Evaporation Pond

GUO Daping¹, JI Junshuang², LI Yulei¹, HU Liangcai¹, ZHANG Ning¹

(1. The Fourth Research and Design Engineering Corporation of CNNC, Shijiazhuang 050021, China;

2. Hebei Water Conservancy Planning and Design Institute Co., Ltd., Shijiazhuang 050011, China)

Abstract: Usually, uranium mines discharge the waste water generated during the adsorption process into an evaporation pond, and eliminate radioactive waste water by natural evaporation. The active acceleration technology for the evaporation capacity of domestic evaporation ponds, such as atomization devices, heating devices, wind blowing devices, etc., mostly has high energy consumption losses, high operating costs, and is difficult to put into large-scale use. Passive acceleration devices generally have limited improvement in evaporation capacity. A new type of evaporation tower with a frame structure and multiple horizontal evaporation surfaces was proposed. The evaporation towers are uniformly arranged in a matrix form in the evaporation pool, and each tower is connected in series by a wastewater pipeline fixed at the top of the tower to form a collaborative three-dimensional evaporation surface structure, greatly improving the utilization level of evaporation space and generating a multiplier effect on the evaporation capacity of the original evaporation pool. By conducting small-scale simulation experiments, the empirical calculation formula for the evaporation capacity of the evaporation tower matrix system can be used to achieve refined and quantitative design of the three-dimensional evaporation system. This method has the advantages of environmental protection, high efficiency, and no energy consumption, and is suitable for dry and low wind areas. It can effectively save land resources and engineering investment.

Key words: in-situ leaching uranium mine; new type of evaporation tower; evaporation pond; three-dimensional evaporation system; no energy consumption; high efficiency