

地浸铀矿山蒸发池防渗结构优化建议

朱全政¹, 葛佳亮², 刘晓超², 曹凤波², 李梦姣², 路晓卫²

(1. 中国铀业股份有限公司, 北京 100013;

2. 中核第四研究设计工程有限公司, 河北 石家庄 050021)

摘要: 梳理了中国地浸铀矿山蒸发池防渗结构现状, 指出了当前防渗结构存在的防渗冗余不足、检漏功能单一且抗干扰能力一般、保护层过厚致使退役废物增多等问题。通过调研国内外各行业蒸发池的防渗结构设计规范及工程实践, 探讨各类蒸发池防渗结构的优缺点, 并结合地浸铀矿山蒸发池的特点, 提出“冗余防渗-智能检漏-废物减量”三位一体优化建议, 可为规范地浸蒸发池防渗结构设计提供参考。

关键词: 地浸采铀; 蒸发池; 防渗结构; HDPE土工膜; 检漏层; 保护层

中图分类号: TL212; X523; X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2025)04-0129-07

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.03.11

蒸发池(又称“蒸发塘”或“晾晒池”)是在合适的自然气候条件下, 有效利用太阳辐射的热量通过蒸发去除水分的技术设施, 其具有投资成本低、建设维护简单、处理效率高, 及绿色节能等优点, 现已被广泛应用于工业废水处理、盐田卤水浓缩及海盐结晶等领域^[1-3]。在地浸采铀过程中, 通过控制井场抽液量大于注液量以提高溶浸效率并减轻开采过程对周围地下水环境的影响, 因此会产生一定量的吸附尾液^[4]。此外, 受地浸采铀工艺的制约, 水冶厂运行期间, 也会产生少量的工艺废水, 如反冲废水、转型废水、沉淀母液等^[5-6]。中国地浸铀矿山多采用蒸发池处理该部分吸附尾液和工艺废水^[7], 如在内蒙古和新疆等地(纳岭沟、钱家店、巴彦乌拉、蒙其古尔等)的地浸采铀工程中建设了蒸发池。这些地区气候干燥、降雨量小、年蒸发量大、地广人稀, 且通常缺乏具有足够稀释能力的受纳水体, 这为利用蒸发池处理工艺废水提供了有利的自然条件和社会条件^[8-10]。

地浸铀矿山蒸发池(以下简称“地浸蒸发池”)作为一种放射性废水处理环保设施, 其防渗结构对于放射性废水渗漏污染的防治至关重要。目前, 中国现行标准仅对地浸蒸发池的选址、防渗要求、边坡高度、截排洪措施、监测井布设等进行了

规定, 尚未针对防渗结构提出具体要求^[11-13]。经调研发现, 国内多个地浸蒸发池防渗结构不尽相同, 各种防渗结构的优缺点和适宜性也有待深入探讨, 这使得环境风险存在一定的不确定性。此外, 在中国现役地浸蒸发池防渗结构中, 一般会在HDPE膜上铺设300~500 mm厚的回填土或黏土作为防渗保护层。受放射性废水长期浸泡后, 该保护层最终可能会形成新的放射性固体废物, 在退役治理时将面临大规模放射性废物的处置难题。

基于此, 在全面梳理中国地浸蒸发池防渗结构现状及不足的基础上, 深入调研并借鉴国内外不同蒸发池防渗结构的优势, 提出中国地浸蒸发池防渗结构的优化建议, 以期规范地浸蒸发池防渗结构的设置, 降低潜在环境污染风险, 减少退役放射性废物的产生, 推动地浸采铀行业的可持续发展。

1 中国地浸蒸发池防渗结构

中国现役地浸蒸发池防渗结构从上至下一般依次为防渗保护层、土工膜防渗层、钠基膨润土垫层和防渗检漏层^[14-15](图1)。

1.1 防渗保护层

防渗保护层主要由300~500 mm厚回填土

收稿日期: 2025-03-27

第一作者简介: 朱全政(1983—), 男, 青海乐都人, 高级工程师, 主要从事铀矿冶辐射防护与环境保护管理工作。

通信作者简介: 葛佳亮(1992—), 男, 河北石家庄人, 硕士, 工程师, 主要从事铀矿冶辐射防护与环境保护。

或黏土构成,主要作用是抵御紫外线辐射、防止废水冻融和水流冲击等,从而降低下部 HDPE 土工膜的老化速度,同时避免蒸发池残渣等坚硬物对 HDPE 土工膜产生摩擦、穿刺、割裂等破坏。

早期建设的地浸蒸发池,其防渗保护层主要由黏土组成,主要考虑在保护功能的基础上,兼备一定的防渗能力。然而,为避免损坏下部 HDPE 膜,不能使用大型机械设备对黏土进行夯实,所以难以形成密闭体系,其防渗性能一般可忽略。通过等效渗透系数计算可知,黏土层的防渗效果对于蒸发池整体防渗能力的贡献微乎其微,膜上覆土的主要功能还是维护 HDPE 土工膜的安全。因此,近年来该保护层材料的选取一般建议就地取材,选用回填土,既可避免异地取土对生态环境造成破坏,又可实现弃土的就地利用。

1.2 土工膜防渗层

土工膜防渗层主要为 HDPE 膜,其渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-12}$ cm/s,厚度一般为 1.5 mm。HDPE 膜是一种结晶度高、非极性的热塑性树脂,是高分子聚合物组成的无毒、无味、无臭的环保防水卷材,其具有较高的拉伸强度,以及出色的防腐、防电、防潮及防渗漏性能,已被广泛应用于各类污水池、填埋场等领域^[16]。HDPE 膜的耐久性与日照、温度等环境因素有关,也与接触液体的化学性质及保护措施密切相关。在自然环境下,其使用寿命约为 50~70 年^[17-18]。在地浸蒸发池防渗结构中,HDPE 膜为主要人工衬层,承担着核心防渗功能,是防止废

水渗漏污染地下水和土壤的关键所在。

1.3 钠基膨润土垫层

钠基膨润土垫层是由高膨胀性钠基膨润土颗粒与两层土工布通过针刺、胶粘等工艺制成的毯状防水卷材,其防水防渗的原理是钠基膨润土遇水膨胀,形成致密的胶体层,其渗透系数约 5×10^{-9} cm/s^[19]。此外,其还具备分离、加固、防护、过滤等多种特性。钠基膨润土为天然无机材料,具有抗老化、抗腐蚀的优点,使用寿命约 50~100 年。在地浸蒸发池防渗结构中,钠基膨润土垫层具有两方面重要作用,一是作为次要人工衬层,具备一定的应急防渗能力,当土工膜破损时,可吸收一部分废水,阻滞废水进一步下渗;二是兼做 HDPE 膜的下保护层,对上部 HDPE 膜具有保护和支撑作用,有助于延长 HDPE 膜的使用寿命。

1.4 防渗检漏层

防渗检漏层一般采用导线铺层作为监测手段,在防渗结构出现渗漏时,通过导线监测可发现渗透,实现渗漏预警功能。目前,常用的导线材质有铜导线和光纤。铜导线应用较为广泛,其工作原理是在蒸发池防渗层下部铺设间距 5~10 m 的回形铜线网格,通过测量导线间电阻的变化对蒸发池泄漏情况进行监控;这种方式需要人工定期检测,检漏存在一定的滞后性。光纤铺层较为先进,可实现在线监测;但由于成本较高,经济可行性欠佳,尚未得到广泛应用。新疆的蒙其古尔一期地浸工程蒸发池是采用光纤铺层的典型案例。

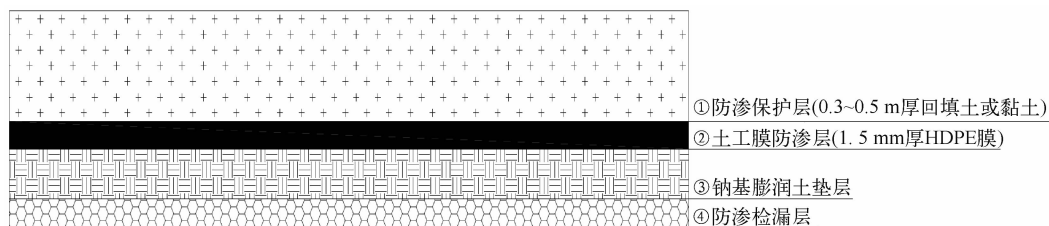


图1 地浸铀矿山蒸发池防渗结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of anti-seepage structure of evaporation pond in in-situ leaching uranium mine

2 国内外蒸发池防渗结构

2.1 国内蒸发池防渗结构

2.1.1 放射性废水蒸发池

受自然条件和社会条件的限制,除地浸蒸发池外,中国使用蒸发池处理放射性废水的案例较

少。20 世纪 60~70 年代,中国曾在西北戈壁某设施附近建设天然蒸发池,用于处理产生的低放射性废水,该废水中主要含³H、¹⁴C、¹⁴⁴Ce 等人工核素^[20]。

该蒸发池建设时充分考虑了区域水文地质、气候气象等条件以及当时环保要求,其基底设置

在第四系黏土层上,铺设1 m厚的夯实黏土作为主要防渗层,并在其上铺设0.7 m厚沙土作为保护层,避免防渗层因冻结或干裂而破坏。该防渗结构常见于早期工程,其建设方便、成本较低;但防渗效果与黏土夯实密度、黏土成分及含水量密切相关,施工不当还可能造成防渗性能分布不均,环境风险较高。该蒸发池未发生过泄漏事故,但随着人们环保意识的不断提高以及新型人工防渗膜材料的日益普及,仅以夯实黏土作为防渗层的设计逐渐被淘汰,取而代之的是夯实黏土与人工防渗层相结合的更安全、更稳定的防渗结构。

2.1.2 浓盐水蒸发塘

浓盐水蒸发塘与地浸蒸发池的工作原理类似,同样是利用太阳辐射蒸发去除液体中水分的废水处理设施,广泛应用于现代煤化工浓盐废水的处理。为了规范其设计、建造、运行和封场,工业和信息化部于2021年5月17日发布了《浓盐水蒸发塘设计规范》(HG/T 20721—2021)^[21-23]。根据该规范,浓盐水蒸发塘防渗结构自上而下主要包括无纺土工布(上层保护层)、HDPE土工膜(上层防渗层)、渗漏检测层、导排层、HDPE土工膜(下层防渗层)、钠基膨润土垫层或无纺土工布(下层保护层,根据压实地基防渗系数选取不同材质)及压实地基。由此可见,浓盐水蒸发塘具有一套较完善的防渗结构,其结构特点对地浸蒸发池防渗结构的优化具有一定借鉴意义。

1) 无纺土工布(保护层)

无纺土工布是由合成纤维通过针刺或编织而成的透水性土工合成材料,具有强度高、耐穿刺、耐腐蚀、耐高温、抗冷冻等特点,是HDPE土工膜保护层的理想选材。然而,长期暴露在紫外线照射下,无纺土工布会加速老化,导致使用寿命大幅缩短^[24]。一般情况下,掩埋在土中的土工布使用寿命约20~50年,而长期暴露在日照下的使用寿命仅约5~8年。

2) 双层HDPE膜防渗结构

浓盐废水浓度高,成分复杂,且需考虑事故状态下的应急防渗能力,因此浓盐水蒸发塘选取了双层HDPE膜防渗结构。其中,HDPE膜的渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-12}$ cm/s,厚度 ≥ 2.0 mm(大于地浸蒸发池的1.5 mm),宽幅 ≥ 8.0 m。该防渗结构可形成双重防渗屏障,即使上层膜因长期受紫外线照射而破损,下层膜仍可独立承担防渗功能,显

著降低渗漏风险,提高防渗结构的可靠性。

3) 渗漏检测层与导排层

浓盐水蒸发塘渗漏检测层选用带有电信号的导线铺设,设置在两层土工膜之间,既可有效监测上层防渗层的泄漏,又能避免防渗结构下部水汽上升造成误报。此外,防渗检漏层下再铺设由复合土工排水网或无纺土工布组成的导排层,并配备渗漏收集设施,以便及时导出泄漏的废水。

2.2 国外蒸发池防渗结构

20世纪50年代起,在美国、澳大利亚、印度和韩国等国家的一些日照时间较长、干旱少雨的区域,陆续开始采用蒸发池处理核设施运行过程中产生的大量低放废水^[25-27],如澳大利亚的Lucas Heights蒸发池、印度的Rajasthan蒸发池、美国的Rocky Flats蒸发池和183-H蒸发池^[28-29]。上述核设施蒸发池建设较早,大多未配备防渗措施,鉴于存在环境风险隐患,目前均已退役^[30]。

在铀矿冶领域,Montrose、Homestake、Sweetwater等铀矿山应用蒸发池处理低放废水较为典型,其设计阶段借鉴了早期蒸发池运行的经验和教训,增加了防渗措施以防蒸发池中放射性核素的扩散。其中,Montrose铀矿蒸发池防渗结构参考了美国环境保护署(EPA)发布的危险废物处理、贮存和处置设施设计标准规范中K部分对“Surface Impoundments”的防渗要求,防渗结构由上而下依次为第一层防渗层(HDPE土工膜)、检漏导排层(至少1%坡度)、第二层防渗层(HDPE土工膜)、钠基膨润土衬垫和土壤垫层(渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-7}$ cm/s,厚度 ≥ 1 m),并配备了泄漏收集和回收系统(LCRS)^[31]。类似地,Homestake铀矿山蒸发池防渗结构也包含第一层防渗层(HDPE土工膜)、检漏导排层和第二层防渗层(HDPE土工膜)。而Sweetwater铀矿山蒸发池也采用了双层土工膜防渗,但在第一层防渗层上覆盖了300 mm厚土层保护层^[32]。

针对HDPE膜的使用寿命,根据Montrose蒸发池设计单位Golder Associates INC研究表明,在HDPE膜外表面增加2%~3%炭黑和化学稳定剂,可有效减缓紫外线暴露等引起的降解反应。1.5 mm厚HDPE土工膜在暴露20年或更长后也不会导致显著降解,预估其使用寿命可达100年。该防渗结构设置了双层1.5 mm厚HDPE土工膜,完全能够满足该蒸发池的服役期

限要求,这一研究成果值得中国地浸铀矿山借鉴^[33]。

3 防渗结构优化建议

3.1 存在的问题

3.1.1 土工膜防渗层

目前,中国现役地浸蒸发池均采用单层HDPE土工膜防渗结构,尽管各地浸铀矿山自建矿以来尚未发生蒸发池泄漏事故;但近年来随着中国环保意识的显著增强以及环保政策体系的日趋完善,多行业对蒸发池等池体的防渗性能提出了更高要求。第2节提及的美国地浸蒸发池及中国非放射性领域的《浓盐水蒸发塘设计规范》(HG/T 20721—2021)都明确要求采用双HDPE膜防渗结构。若地浸蒸发池的防渗性能仅仅依赖单一防渗层,随着服役时间的累计,防渗膜必然会出现老化现象,一定程度上降低环境风险的可控性,不利于地浸采铀行业的可持续发展。

3.1.2 防渗检漏层

防渗检漏层通常用于检测和收集可能的渗漏,防止废水污染土壤和地下水。然而,当前地浸蒸发池的防渗检漏层仅配备了导线检漏层,缺乏土工排水网或砂砾层,不具备导排功能。这就导致泄漏的废水无法及时排出,增加了废水再次下渗污染环境的风险。此外,在部分地下水位较高地区,还可能存在地下水入侵或潜水面水汽上升现象,干扰防渗检漏系统的检测准确性,进而引发误报与漏报问题。

3.1.3 防渗保护层

在蒸发池运行过程中,放射性废水蒸发后所携带的铀、镭等放射性核素会残留在池底的保护层中,形成具有一定放射性的蒸发池底泥。该底泥的放射性水平与保护层体积、运行期间排入的总废水量及其放射性水平密切相关。以中国运行约10年的某地浸蒸发池为例,其底泥中²³⁸U质量分数为1 228 mg/kg,比活度为15.10 Bq/g。铀矿山退役治理时,可能会将蒸发池内污染底泥及残渣进行清挖处置^[34],该处置工作将大幅度增加地浸矿山退役治理的难度和投资。

3.2 优化建议

3.2.1 土工膜防渗层的优化

考虑到地浸工艺废水具有强酸碱、低放射性

等特征,对周边环境的潜在污染性较高。因此,建议借鉴浓盐水蒸发塘及国外铀矿冶蒸发池防渗设计理念,采用双层HDPE土工膜防渗结构来提升冗余防渗能力。其中,HDPE膜的渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-12}$ cm/s,厚度 ≥ 1.5 mm。优化后的主、次防渗层互为备份,能够实现双屏障防渗与泄漏分级拦截,可大幅度降低废水泄漏风险,提供更可靠的防渗性能。

3.2.2 防渗检漏层的优化

鉴于防渗检漏层须具备检测泄漏和收集渗漏废水的功能,建议将防渗检漏层设置在两层HDPE膜之间,可隔绝下部入侵的地下水及水汽,避免防渗检漏层受潮误报,提高检漏系统的有效性。此外,“防渗膜+检漏系统+防渗膜”的结构更有利于渗漏检测,当第一层膜发生破损后,废水会在两膜中间流动,更易于被检漏系统识别。

目前,随着光纤价格的持续走低以及光纤监测系统的普及应用,建议逐步采用光纤代替铜导线布设检漏系统,以达到最优检漏效果。同时,建议在检漏导线层下增设导排层,可采用复合土工排水网或长丝无纺土工布,并考虑设置一定坡度,以便快速导出泄漏的废水,避免其持续下渗污染土壤和地下水。另外,还需配备渗漏废水收集系统,将收集的废水最终返回至蒸发池处理,完成环保措施的闭环。优化后的防渗检漏层将具备更有效的渗漏检测能力和渗水回收性能。

3.2.3 防渗保护层的优化

根据调研结果,《浓盐水蒸发塘设计规范》(HG/T 20721—2021)规定蒸发塘防渗保护层一般采用400 g/m²无纺土工布,厚度约为3 mm。美国Montrose和Sweetwater铀矿蒸发池通过改善土工膜抗紫外线性能并采取双层防渗结构,达到了取消保护层的效果,且该蒸发池所处自然环境与中国内蒙古和新疆相似,运行至今未发生泄漏事故。

因此,在保护防渗层效果不下降的前提下,建议通过改善防渗膜耐久性、采用多层膜防渗或改用土工布等其他保护材料,来减少甚至取缔防渗保护层,以降低蒸发池放射性固体废物的产生,促进放射性废物最小化,进而减轻地浸铀矿山的退役压力。优化后的防渗结构示意图见图2。

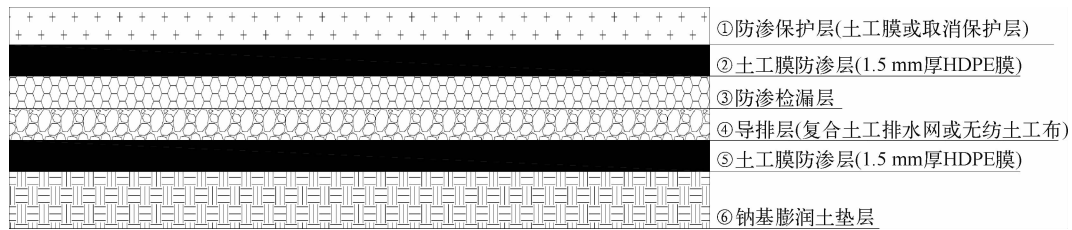


图2 优化后的地浸铀矿山蒸发池防渗结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of optimized anti-seepage structure of evaporation pond in in-situ leaching uranium mine

4 结论

针对中国地浸蒸发池防渗结构存在的关键问题,通过现状梳理、国内外案例对比及借鉴优化分析等过程方法,得到以下主要结论:

1)鉴于中国还未出台地浸蒸发池设计标准,现役地浸蒸发池的防渗结构普遍存在防渗可靠性待提升、检漏系统效率滞后、退役废物处置压力大等问题,亟需制定相关设计标准,推动蒸发池防渗结构的标准化建设。

2)浓盐水蒸发塘及国内外放射性废水蒸发池的防渗结构设计,具有双层防渗膜结构、集成检漏-回收系统及减量化保护层等突出优势,地浸蒸发池防渗结构的优化可进行借鉴。

3)提出的“冗余防渗-智能检漏-废物减量”三位一体优化建议,能够系统性降低地浸蒸发池的环境风险,实现防渗效能提升、检漏实时高效、环境效益提高与退役压力缓解的多重目标。

参考文献:

- [1] ABDELJALIL A, NABIL S, RACHID M. Feasibility and sustainability of evaporation ponds as final basins for industrial wastewater: Statistical evaluation of gross parameters[J]. Desalination Water Treat, 2022, 257: 41-54.
- [2] 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).
- [3] 章国俊. 大型蒸发池 HDPE 土工膜施工工艺及质量控制[J]. 石化技术, 2024, 31(5): 27-29.
ZHANG Guojun. Construction technology and quality control of large evaporation pool HDPE geomem-
- brane[J]. Petrochemical Industry Technology, 2024, 31(5): 27-29 (in Chinese).
- [4] 曹俊鹏, 李喜龙, 阮志龙, 等. 废水减量技术在浸出液处理工艺中的应用[J]. 铀矿冶, 2021, 40(1): 35-38.
CAO Junpeng, LI Xilong, RUAN Zhilong, et al. Application of wastewater reduction technology in leaching solution treatment process[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2021, 40(1): 35-38 (in Chinese).
- [5] 王占龙, 杜娟, 李利, 等. MVR 处理中性地浸采铀矿山蒸发池废水技术研究[J]. 铀矿冶, 2023, 42(2): 89-96.
WANG Zhanlong, DU Juan, LI Li, et al. Study on MVR technology for treating evaporation pond wastewater from neutral in-situ leaching uranium mine[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2023, 42(2): 89-96 (in Chinese).
- [6] 王学贤. 铀矿冶蒸发池液气界面氨析出规律及其对环境影响的模拟研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2021.
- [7] 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.
GUO Dongqing, LI Jing, ZHANG Libo, et al. Progress in the treatment technology of uranium-bearing wastewater in nuclear industry [J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(1): 14-20 (in Chinese).
- [8] 何成垚. 新疆伊犁盆地两种地浸工艺采铀矿区地下水污染特征与产生机理研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2021.
- [9] 苏学斌, 杜志明. 我国地浸采铀工艺技术发展现状与展望[J]. 中国矿业, 2012, 21(9): 79-83.
SU Xuebin, DU Zhiming. Development and prospect of China uranium in-situ leaching technology [J]. China Mining Magazine, 2012, 21(9): 79-83 (in Chinese).
- [10] 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).
- [11] 铀矿冶辐射防护和辐射环境保护规定: GB 23727—2020[S]. 北京:生态环境部, 2020.
- [12] 铀矿冶放射性废物辐射环境管理技术规定: GB 14585—2024[S]. 北京:生态环境部, 2024.
- [13] 核工业铀矿冶工程技术标准: GB50521—2023[S]. 北京:住房和城乡建设部, 2013.
- [14] 新疆中核天山铀业有限公司. 七三七/七三九地浸采铀扩建工程环境影响报告书[R]. 伊犁:新疆中核天山铀业有限公司, 2023.
- [15] 中核通辽铀业有限责任公司. 钱家店铀矿床Ⅳ块地浸采铀工程环境影响报告书[R]. 通辽:中核通辽铀业有限责任公司, 2020.
- [16] LAVOIE F L, KOBELNIK M, VALENTIN C A, et al. Durability of HDPE geomembranes: An overview[J]. *Química Nova*, 2020, 43(5):656-667.
- [17] HUANG Z, LI Y, REN X. Comparing cracking time and structure changes of different high-density polyethylenes during stress and photo-oxidative aging[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2014, 131:20.
- [18] 蒋秀亭. 高密度聚乙烯(HDPE)土工合成材料光氧老化性能研究[D]. 上海:东华大学, 2016.
- [19] 李振军. 钠基膨润土防水毯对包裹埋地管道阴极保护的影响[J]. *腐蚀与防护*, 2024, 45(10):111-115.
LI Zhenjun. Effect of sodium based bentonite waterproof blanket on cathodic protection of wrapped buried pipelines[J]. *Corrosion & Protection*, 2024, 45(10):111-115(in Chinese).
- [20] 戴晓妹, 范承蓉, 付云杉. 天然蒸发池池内源项调查方法探讨[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第三卷). 北京:中国原子能出版社, 2013:5.
- [21] 刘展, 郭瑞亚, 李娜, 等. 高含盐废水资源化利用技术的研究进展[J]. *应用化工*, 2020, 49(10):2657-2661.
LIU Zhan, GUO Ruiya, LI Na, et al. Development of resource utilization technology for highly saline wastewater[J]. *Applied Chemical Industry*, 2020, 49(10):2657-2661(in Chinese).
- [22] 王玉. 蒸发技术在浓盐水零排放处理中的应用概述[J]. *环境与发展*, 2019, 31(7):79-81.
WANG Yu. An overview of the application of evaporation technology in the treatment of zero liquid discharge technologies of concentrated brine[J]. *Environmental and Development*, 2019, 31(7):79-81(in Chinese).
- [23] 浓盐水蒸发塘设计规范: HG/T 20721—2021[S]. 北京:化学工业出版社, 2021.
- [24] 李福一, 刘磊. 温度和渗滤液腐蚀对填埋场无纺布耐久性的影响[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(5):3067-3072.
LI Fuyi, LIU Lei. Effects of temperature and leachate concentration on durability of landfill non-woven geotextiles[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(5):3067-3072(in Chinese).
- [25] DLOUHY Z. Disposal of radioactive wastes[M]. Elsevier, 2009.
- [26] KUMAR S. Integrated radioactive waste management from NPP, research reactor and back end of nuclear fuel cycle-an India experience [C/OL] // IAEA-SM-357/38[2021-09-08]. <http://iaea.org/publish>.
- [27] DICKERSON K S. A rational approach for evaluation and screening of treatment and disposal options for the solar pond sludges at Rocky Flats[R]. Tennessee(United States):Oak Ridge National Lab, 1995.
- [28] HARTMAN M J. Results of groundwater monitoring for the 183 h solar evaporation basins[R]. Washington, D.C. (United States):Pacific Northwest National Lab. (PNNL), 2006.
- [29] 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 Isotope*, 2016, 29(1):58-64(in Chinese).
- [30] 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 technologies of radioactive natural evaporation ponds[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2022, 51(9):83-86(in Chinese).
- [31] JOHN B. Technical evaluation report design for evaporation pond EP3 homestake mining company, grants reclamation project grants, New Mexico[R]. California(United States): Homestake Mining Company, 2008.
- [32] Energy Fuels Resources Corporation A. Evapora-

- tion pond design report pinon ridge project montrose county, Colorado[R]. Energy Fuels Resources Corporation A, 2008.
- [33] MORRISON K F. Operating plan tailings cells and evaporation ponds pion ridge mill[R]. Colorado(U-nited States):Golder Associates Inc. 2010.
- [34] 戴晓姝,范承蓉,付云杉.天然蒸发池近地表处置方案探讨[C]//中国核学会.第二届全国核化学与放射化学青年学术研讨会论文摘要集.北京:中国原子能出版社,2013:94.

Optimization Suggestions for Anti-seepage Structure of Evaporation Ponds in In-situ Leaching Uranium Mines

ZHU Quanzheng¹, GE Jialiang², LIU Xiaochao², CAO Fengbo², LI Mengjiao², LU Xiaowei²

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

2. The Fourth Research and Design Engineering Corporation of CNNC, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: This study reviews the current status of anti-seepage structures in evaporation ponds at in-situ leaching uranium mines in China, highlighting critical issues such as insufficient redundancy in anti-seepage measures, single-function leak detection systems with limited anti-interference capabilities, and excessive thickness of protective layers leading to increased decommissioning waste. By analyzing domestic and international design standards and engineering practices for anti-seepage structures in evaporation ponds across various industries, the advantages and disadvantages of different technologies were systematically evaluated. Combining the unique characteristics of in-situ leaching uranium mine evaporation ponds, a tripartite optimization framework—redundant anti-seepage, intelligent leak detection, and waste reduction—was proposed. This integrated approach aims to standardize the design of anti-seepage structures for such evaporation ponds, thereby enhancing environmental risk control and promoting sustainable development in the uranium mining industry.

Key words: in-situ leaching of uranium; evaporation pond; anti-seepage structure; HDPE geomembrane; leak detection layer; protective layer