

铀尾矿库排渗加固措施渗流控制分析

胡良才, 郭大平, 李玉雷, 李哲辉, 张 宁

(中核第四研究设计工程有限公司, 河北 石家庄 050021)

摘要: 某铀尾矿库坝体沉积结构复杂、排渗设施设置不足, 导致浸润线最小埋深小于规范限值。基于 GeoStudio 软件开展了尾矿坝渗流及稳定性数值模拟分析, 系统分析了正常水位、设计水位、特殊水位下, 采取排渗加固措施前后坝体浸润线、抗滑稳定安全系数的变化规律。结果表明: 未采取排渗加固措施时, 正常、设计、特殊水位下浸润线最小埋深分别为 1.74、0.93、0 m, 特殊水位下浸润线自 140.9 m 平台上部的堆积坝坡逸出; 相应的坝体安全系数分别为 1.329、1.321、1.291; 设置水平排渗管进行排渗加固后, 坝体浸润线埋深增加 3.48~4.59 m, 正常、设计、特殊水位下的安全系数分别增至 1.431、1.425、1.402, 增幅达 7.68%~8.59%。排渗加固措施可有效改善尾矿坝渗流条件, 显著降低坝体浸润线高度, 提高坝体稳定性, 渗流控制效果较好。研究成果可为尾矿坝排渗加固设计提供强有力的技术支撑, 为尾矿库安全稳定运行提供参考。

关键词: 尾矿坝; 浸润线; 排渗加固; 水平排渗管; 渗流控制; 数值模拟

中图分类号: TL75; X591 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2025)04-0136-07

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.04.07

尾矿库是贮存矿石选别金属或非金属过程中所产生的尾矿的场所, 也是一种由散粒材料堆筑而成的特殊水工构筑物, 是矿山的重大危险源之一。中国超过 90% 的尾矿库采用上游法筑坝^[1], 该法筑坝工艺简单、运行成本低, 但存在排渗设施易淤堵、坝体浸润线较高、坝坡地震动力稳定性较差等不足^[2-3]。世界范围内, 约 76% 发生事故的尾矿库采用了上游法筑坝^[4]。由于尾矿坝排渗设施失效致使坝体浸润线增高, 进而导致上游法筑坝尾矿库溃坝事故时有发生^[5]。

如何做好尾矿库渗流控制, 提高坝体稳定性, 一直是国内外研究的热点。韩亚兵等采用数值模拟方法研究了水平排渗盲沟布置位置及方向对尾矿坝渗流场和坝体稳定性的影响^[6]; Wei 等指出采用水平排渗管作为排渗加固措施后, 尾矿坝安全系数提高了 19.4%^[7]; Pak 等采用 GeoStudio 软件分析了水平排渗管、竖式排渗等排渗加固措施的渗流控制效果^[8]; 仲良等研究了反式排渗管的渗流影响范围, 提出了合理的排渗管布设间

距^[9]。Liu 等指出采用反式排渗管进行排渗加固后, 尾矿坝浸润线埋深增加 5.6~9.3 m^[10]; 陶东良等研究了土工席垫的等效模拟方法及等效渗透系数, 提出可采用土工席垫作为尾矿坝加高扩容的排渗措施^[11]; 李雪辰等采用饱和/非饱和渗流理论分析了土工席垫不同失效程度下尾矿坝渗流场的变化情况^[12]; Zhang 等采用三维数值模拟方法分析了排水席垫联合水平排渗管作为排渗加固措施的渗流控制效果^[13]; 徐力群等采用三维有限元方法分析了虹吸管与辐射井相结合的排渗设施的排渗效果^[14]。

诸多研究成果对于提高尾矿坝渗流分析水平, 保障尾矿库坝体安全作出了突出贡献。但各尾矿库实际情况不同, 影响其渗流及坝体安全的因素较多, 不能照搬个别尾矿库设计经验, 直接确定尾矿坝排渗加固方案。因此, 以某铀尾矿库为研究对象, 建立尾矿坝二维有限元数值模型, 采用 GeoStudio 软件分析不同水位下、排渗加固前后坝体浸润线埋深变化情况, 采用极限平衡法分析

收稿日期: 2025-04-14

基金项目: 中国铀业有限公司—东华理工大学核资源与环境国家重点实验室联合创新基金(NRE2021-13, 伴生放射性废渣安全固化处置关键技术及黏土屏蔽作用机理研究)。

第一作者简介: 胡良才(1983—), 男, 河北邢台人, 硕士, 正高级工程师, 主要从事放射性废物安全处置技术研究、设计咨询工作。

不同工况下尾矿坝的稳定性,旨在为尾矿坝排渗加固设计及后期运行管理提供技术支撑。

1 工程概况

1.1 尾矿库简介

铀尾矿库于 1973 年建成,已运行 50 余年,尾矿库由初期坝、尾矿堆积坝、副坝、排洪设施、渗水收集和处理设施等组成。初期坝为碾压式均质土坝,坝顶标高 125 m,坝高约 25 m,上游坝坡坡比 1:2.5,下游坝坡坡比 1:2。在初期坝库容使用完毕后,设计采用上游法利用尾矿堆坝,尾矿堆积坝坡比为 1:3.5。根据尾矿库周围实际地形,设计尾矿库堆积标高为 155 m,相应有效库容约 500 万 m³。根据《核工业铀矿冶工程技术标准》(GB 50521—2023),该尾矿库为三等库。

尾矿库投入使用初期,由于未按设计要求在初期坝前放矿筑坝,而是自库尾向库内放矿,造成了粗颗粒尾砂沉积在库尾、细颗粒尾矿泥沉积在初期坝前的情形。1979 年初,尾矿库放矿位置调

整到初期坝前,此时初期坝前沉积的细颗粒尾矿泥厚度已超过 20 m。1986 年,运营单位对该尾矿库进行了加固整治,对标高 120 m 以下的初期坝坡用块石进行了护坡压重,并沿坝轴线方向在堆积坝内靠近初期坝顶位置设置了一道水平排渗管作为排渗设施。

由于堆积坝座在渗透性差的细颗粒尾矿泥上,且坝体内排渗设施较少,导致坝体浸润线较高。经计算,当堆积坝顶标高为 155 m 时,正常水位下坝体浸润线最小埋深约为 1.74 m,不满足浸润线埋深不小于 2.0 m 的要求^[15]。需采取排渗加固措施,以降低坝体浸润线高度,提高坝体稳定性。

1.2 岩土层物理力学参数

根据尾矿库岩土工程勘察报告,尾矿库地层自下而上依次为碎石层、粉质黏土层、尾黏土、尾细砂 2、尾中砂、尾细砂 1。根据勘察成果得到的各岩土层物理力学参数建议值,用于尾矿库渗流及坝体稳定分析的各岩土层物理力学参数见表 1。

表 1 尾矿库岩土层物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical properties of soil in the tailings pond

土层名称	容重(γ)/(kN/m ³)	内摩擦角(φ)/(°)	凝聚力(c)/kPa	渗透系数(k)/(cm/s)	
				水平渗透系数(k_h)	垂直渗透系数(k_v)
块石	17.56	37.0	0	5.0×10^{-1}	5.0×10^{-1}
尾细砂 1	17.66	32.0	0	4.2×10^{-4}	3.1×10^{-4}
尾中砂	17.46	33.2	0	5.1×10^{-4}	3.2×10^{-4}
尾细砂 2	17.36	30.6	0	4.3×10^{-4}	2.2×10^{-4}
尾黏土	14.72	23.3	16	4.1×10^{-5}	2.3×10^{-5}
坝体黏土	16.78	22.9	11	1.1×10^{-6}	1.1×10^{-6}
粉质黏土	17.76	24.5	11	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}
碎石层	18.54	35.0	3	3.1×10^{-2}	3.1×10^{-2}

1.3 排渗加固措施优选

排渗加固是通过在尾矿坝内设置排渗设施,以改善坝体渗透条件,加速尾矿排水固结,从而有效提高坝体渗流和抗滑稳定性的方法。常用的尾矿坝排渗加固措施包括排渗管排渗、管井排渗、垂直-水平联合排渗、虹吸排渗、辐射井排渗等^[16-18]。由于尾矿粒径、放矿方式和筑坝方式等差异,不同尾矿坝坝体沉积规律千差万别,而排渗加固措施的适用条件和排渗效果不尽相同^[19],因此应结合

尾矿库特点选择合理的排渗加固措施。

相对于其他排渗加固措施,水平排渗管具有建设方便、造价低、运营成本低等优点^[20-21]。结合该尾矿库坝体沉积规律及各岩土层物理力学性质,在尾矿坝内标高为 133.3、142.5 m 处,沿坝轴线方向增设水平排渗管作为排渗加固措施,水平排渗管埋深分别为 7.6、7.5 m。排渗管为倒梯形结构,底宽 0.5 m、顶宽 1.0 m、高 0.5 m,中间埋设 $\phi 200$ 塑料盲沟,周围回填砂卵

石。排渗管在尾矿坝最大坝高处标高最高,并以约1%的坡比坡向坝体两端检查井。坝体渗水通过 DN200 聚乙烯管自检查井引入坝肩排水

沟,排入尾矿库渗水收集及处理设施。尾矿库排渗加固方案示意图见图1,水平排渗管示意图见图2。

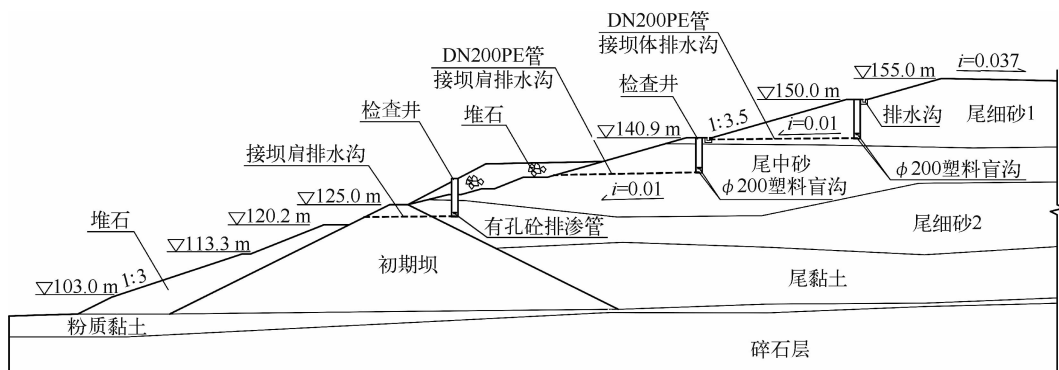


图1 排渗加固方案示意图

Fig. 1 Schematic of the drainage consolidation measure

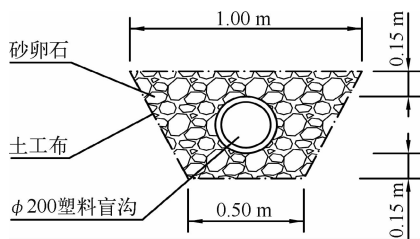


图2 水平排渗管示意图

Fig. 2 Schematic of the horizontal drainage pipe

2 数值模型建立

2.1 模型建立

根据尾矿库实测地形图、施工图纸、勘察报告提供的坝体剖面图等,使用 CAD 软件建立尾矿坝最大坝高剖面的二维数值模型并导出为 dxf 格式文件,将 dxf 格式文件导入 GeoStudio 软件,设置各岩土层材料属性、网格、边界条件等,建立并完善尾矿坝渗流及稳定数值模型。

根据尾矿库勘察报告,结合尾矿库内各岩土层的分层情况及其渗透特性,对尾矿坝进行适当概化分区,概化分区以基本不改变渗流场的水头分布为评判依据。建模时定义尾矿库上游方向为 x 轴正方向,重力方向为 y 轴负方向。坝体、坝基各岩土层的材料模型选择摩尔-库仑 (Mohr-Coulomb) 模型。

2.2 网格及边界条件

在 GeoStudio 软件 Seep/W 渗流分析模块中,设置尾矿坝数值模型全局单元尺寸为 1.0 m,对水平排渗管周围的关键区域进行加密,整个模型共划分 12 055 个单元、11 840 个节点。

Seep/W 模块中边界条件主要有总水头、压力水头、潜在渗流面等^[22]。进行尾矿坝稳态渗流分析时,设置尾矿坝右侧为总水头边界条件,水头按照不同运行状态下水头给定;尾矿坝下游坝坡为潜在渗流面,水流量(Q)设置为 0;水平排渗管设置为压力水头边界条件,压力水头(P)设置为 0。渗流计算时不考虑尾矿颗粒的运移,亦不考虑尾矿坝位移及变形。

2.3 数值模型验证

2.3.1 模型简介

采用无排渗设施的均质土坝模型验证建立的渗流数值模型的准确性。均质土坝坝高 12 m,坝顶宽 4 m,上游坝坡坡比 1:2.0,下游坝坡坡比 1:2.0,上游稳定水深 11 m,坝体渗透系数为 1×10^{-6} m/s。无排渗设施的均质土坝模型示意图见图 3。采用三角形和四边形混合的非结构化网格对均质土坝坝体进行网格划分,网格全局尺寸设置为 0.5 m,共计 1 401 个单元、1 507 个节点。均质土坝上游坝坡给定总水头边界条件,总水头即为水深(11 m);坝体下游坝坡为潜在渗流面,水流量(Q)设置为 0;下游坝坡与地基的交点设置

为压力水头边界条件,压力水头(P)设置为0。

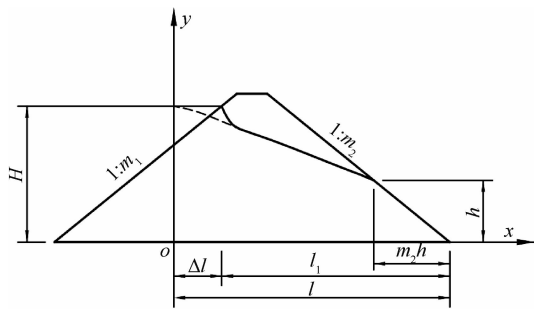


图3 无排渗设施的均质土坝模型

Fig. 3 Homogeneous earth dam without drainage consolidation measure

2.3.2 模型验证

浸润线高度计算式为^[23-24]

$$y = \sqrt{H^2 - \frac{H^2 - h^2}{l - m_2 h} x}, \quad (1)$$

式中: y —浸润线高度,m; H —上游水深,m; h —下游坝坡浸润线逸出高度,m; l —化引渗透长度,m, $l = l_1 + \Delta l$, $\Delta l = m_1 H / (2m_1 + l)$; m_2 —下游坝坡边坡系数; x —浸润线某点的横坐标,m。

将 Seep/W 模块计算得到的坝体浸润线与理论计算结果进行对比,数值模拟及理论计算得到的坝体浸润线高度随距离的变化见图4。

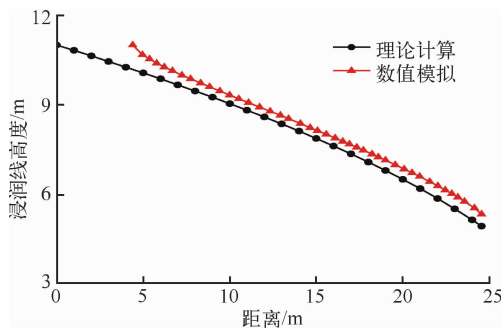


图4 均质土坝数值模拟和理论计算浸润线

Fig. 4 Phreatic line of homogeneous earth dam by theoretical formula and numerical simulation

由图4可见,渗流数值模拟与理论计算得到的浸润线高度随距离变化趋势一致,数值模拟得到的浸润线高度略大于理论计算,两者在数值上符合性较好,误差在2.72%~7.84%,说明数值模拟精确度较高。最大误差7.84%出现在 $x =$

4.40 m处,即上游坝坡入渗点处,这是因为理论计算将入渗点上游坝体用长度为 Δl 的等效虚拟矩形体代替,将倾斜的上游坝坡简化为具有垂直上游边坡的土坝断面图形,使得理论计算得到的入渗点下部浸润线较低。

2.4 计算工况

尾矿库滩面坡度(i)约为3.7%,当堆积坝顶标高为155 m时,设计正常运行水位为149.45 m,相应干滩长度约为149 m;设计洪水水位150.52 m,相应干滩长度约为121 m;设定最小干滩长度限值为40 m时对应的水位为特殊水位,计算确定特殊水位为153.52 m。进行不同水位下、采取排渗加固措施前后的坝体渗流及稳定性数值模拟,数值模拟计算工况见表2。

表2 数值模拟工况

Table 2 Numerical simulation conditions

工况	运行状态	水位/m	是否采取排渗加固措施
工况1	正常水位	149.45	否
工况2	正常水位		是
工况3	设计水位	150.52	否
工况4	设计水位		是
工况5	特殊水位	153.52	否
工况6	特殊水位		是

3 模拟结果及分析

3.1 尾矿坝渗流分析

采用 GeoStudio 软件的 Seep/W 模块进行尾矿坝渗流分析,设置渗流分析状态为稳态分析,得到不同工况下尾矿坝内渗流场分布及浸润线高度(图5)。可以看出,尾矿库运行水位越高,坝体浸润线越高,相应浸润线埋深越小。采取排渗加固措施前,正常水位、设计水位及特殊水位下坝体浸润线最小埋深均出现在140.9 m马道处,分别为1.74、0.93、0 m,浸润线最小埋深不满足相关规范要求;尤其是特殊水位下,浸润线自140.9 m平台上部的堆积坝坡逸出,不利于坝体稳定。采取排渗加固措施后,各工况下浸润线在水平排渗管处均出现明显下降,堆积坝浸润线均明显降低,正常水位、设计水位及特殊水位下,坝体浸润线最小埋深分别为5.22、5.07、4.59 m,满足相关规范关于最小埋深的要求,排渗加固措施的渗流控制效果明显。

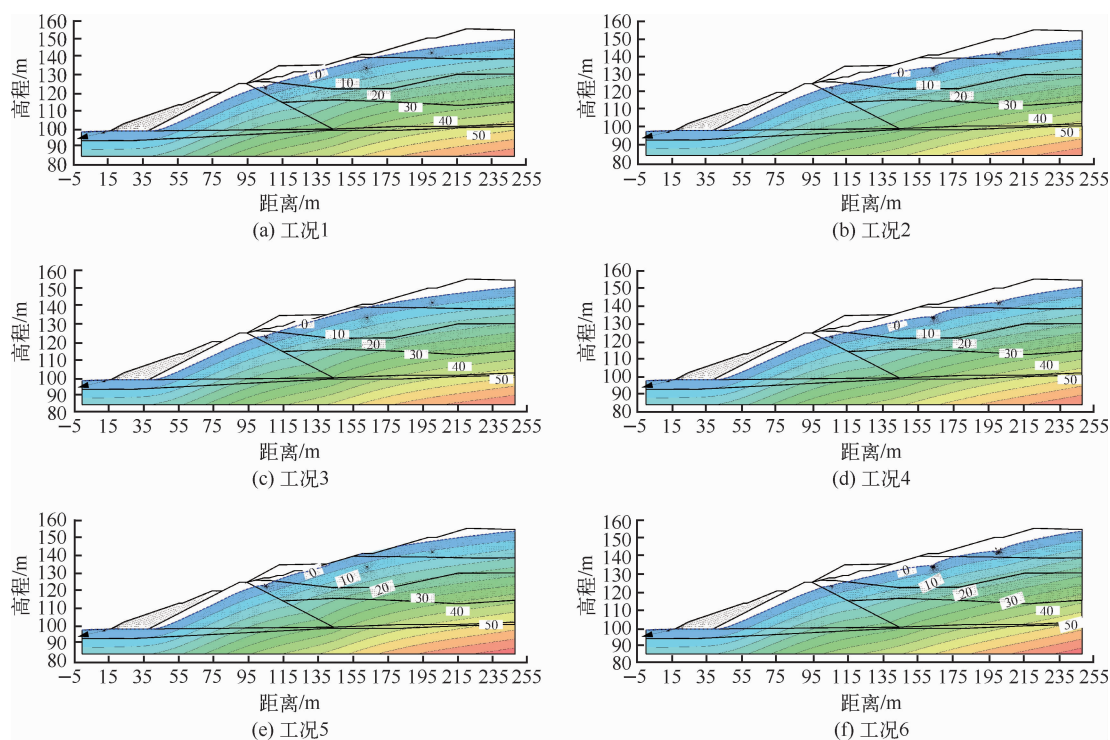


图5 不同工况下尾矿坝渗流场

Fig. 5 Flow field of tailings dam under different conditions

3.2 尾矿坝稳定分析

将 Seep/W 模块渗流分析结果作为输入条件,使用 GeoStudio 软件的 Slope/W 模块分析尾矿坝稳定性,采用计及条块间作用力的简化毕肖普法进行分析,得到不同工况下尾矿坝抗滑稳定最小安全系数(图6)。

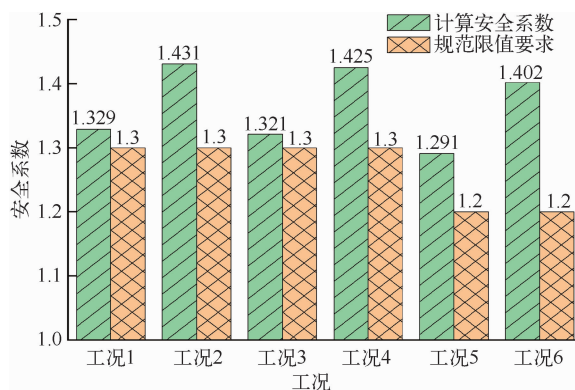


图6 不同工况下坝体最小安全系数

Fig. 6 Minimum safety factor under different conditions

由图6可见,无论是否采取排渗加固措施,坝体安全系数均随库水位升高呈逐渐降低趋势。采

取排渗加固措施前,正常水位、设计水位及特殊水位下坝体最小安全系数分别为 1.329、1.321、1.291;采取排渗加固措施后,正常水位、设计水位及特殊水位下坝体最小安全系数分别为 1.431、1.425、1.402,满足《核工业铀矿冶工程技术标准》关于最小安全系数的要求(正常工作条件,最小安全系数 1.30;非常工作条件 I,最小安全系数 1.20),各水位下坝体安全系数均明显提高,增幅分别为 7.68%、7.95%、8.59%。

4 结论

为分析排渗加固措施的渗流控制效果,指导尾矿库排渗加固方案设计及后期安全管理,以某铀尾矿库为例,开展了不同工况下尾矿坝渗流及稳定数值分析,得出结论如下:

1)采取排渗加固措施前,坝体浸润线最小埋深不满足规范要求;采取排渗加固措施后,各水位下,坝体浸润线均明显降低,坝体抗滑稳定安全系数均明显提高,增幅达 7.68%~8.59%,浸润线最小埋深及坝体安全系数均满足相关规范要求,排渗加固措施渗流控制效果较好。

2)数值模拟可以用于尾矿库排渗加固设计方

案优选。考虑到尾矿库坝体结构复杂性,在经费、周期等条件许可下,可考虑采用渗流三维数值模拟或物理模型试验方法,进一步研究尾矿坝三维渗流及整体坝体稳定性。

参考文献:

- [1] CORNWALL W. A dam big problem[J]. Science, 2020, 369(6506):906-909.
- [2] 杨春和,张超,李全明,等.大型高尾矿坝灾变机制与防控方法[J].岩土力学,2021,42(1):1-17.
YANG Chunhe, ZHANG Chao, LI Quanming, et al. Disaster mechanism and prevention methods of large-scale high tailings dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(1):1-17 (in Chinese).
- [3] 胡良才,李哲辉,程琳.铀尾矿安全处置技术现状及发展方向[J].铀矿冶,2022,41(4):423-430.
HU Liangcai, LI Zhehui, CHENG Lin. Present situation and development trend of safe disposal technology of uranium tailings[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(4):423-430 (in Chinese).
- [4] COULIBALY Y, TIKOU B, CHENG L Z. Numerical analysis and geophysical monitoring for stability assessment of the northwest tailings dam at Westwood mine[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2017, 27(4):701-710.
- [5] 杨春和,李泽华,冒海军,等.尾矿坝排渗系统淤堵机理试验研究[J].广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(3):845-854.
YANG Chunhe, LI Zehua, MAO Haijun, et al. Experimental study on the clogging mechanism of drainage system in tailings dam[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2019, 44(3):845-854 (in Chinese).
- [6] 韩亚兵,崔旋.排渗盲沟布置型式对某尾矿坝渗流稳定性影响的模拟分析[J].现代矿业,2019,35(9):68-71.
HAN Yabing, CUI Xuan. Seepage and stability simulation analysis of a tailings dam by blind drainage ditch layout[J]. Modern Mining, 2019, 35(9):68-71 (in Chinese).
- [7] WEI Z A, YIN G Z, WAN L, et al. A case study on a geotechnical investigation of drainage methods for heightening a tailings dam[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(106):1-10.
- [8] PAK A, NABIPOUR M. Numerical study of the effects of drainage systems on saturated/unsaturated seepage and stability of tailings dams[J]. Mine Water and the Environment, 2017, 36:341-355.
- [9] 仲良,沈振中,王建,等.某尾矿坝反式预埋槽孔排渗管排渗效果有限元数值分析[J].水电能源科学, 2015, 33(2):60-62.
ZHONG Liang, SHEN Zhenzhong, WANG Jian, et al. Finite element numerical calculation on drainage effect of trans-embedded slotted pipe in tailings dam[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(2):60-62 (in Chinese).
- [10] LIU C, SHEN Z Z, GAN L, et al. The seepage and stability performance assessment of a new drainage system to increase the height of a tailings dam[J]. Applied Sciences, 2018, 8(10):1-20.
- [11] 陶东良,梅聪,陆誉婷.白岩尾矿坝土工席垫排渗措施模拟及渗控效果分析[J].水力发电,2015,41(6):69-72.
TAO Dongliang, MEI Cong, LU Yuting. Drainage effect analysis of geotechnical mat in baiyan tailings dam[J]. Water Power, 2015, 41(6):69-72 (in Chinese).
- [12] 李雪辰,沈振中.土工席垫与排渗墙相结合的尾矿库渗控效果分析[J].有色金属(矿山部分),2024,76(4):74-80.
LI Xuechen, SHEN Zhenzhong. Evaluation of seepage control effect of drainage wall and geotechnical mat combined system of tailings pond[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2024, 76(4):74-80 (in Chinese).
- [13] ZHANG H W, SHEN Z Z, LIU D T, et al. A suggested equivalent method for a drainage structure to analyze seepage in tailings dam[J]. Materials, 2022, 15(20):1-17.
- [14] 徐力群,贾凡,徐琼,等.虹吸管与辐射井相结合的尾矿坝排渗系统排渗效果分析[J].水电能源科学, 2014, 32(9):94-97.
XU Liqun, JIA Fan, XU Qiong, et al. Study on effect of drainage system combined by siphon and radial wells for tailings dam[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(9):94-97 (in Chinese).
- [15] 核工业铀矿冶工程技术标准:GB 50521—2023[S].北京:中国计划出版社,2023.
- [16] 奚兴符,阮茂盛.尾矿库排渗工程技术方法[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(5):81-86.
XI Xingfu, RUAN Maosheng. Technological method of seepage drainage of tailing pond[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(5):81-86 (in Chinese).

- [17] 金松丽,徐宏达,张伟,等.尾矿坝排渗技术的研究现状[J].现代矿业,2012,27(7):35-38.
JIN Songli, XU Hongda, ZHANG Wei, et al. Research situation of drainage technology of tailings dam[J]. Modern Mining, 2012, 27 (7): 35-38 (in Chinese).
- [18] 胡祥群.尾矿坝的排渗设施及其应用[J].中国矿山工程,2014,43(1):68-70.
HU Xiangqun. The drainage installations of tailings dam and its application[J]. China Mine Engineering, 2014, 43(1):68-70(in Chinese).
- [19] 万凯军,彭易华,徐牧明,等.尾矿堆积坝排渗加固方法及其适用条件探讨[J].现代矿业,2014,30(9):163-165.
WAN Kaijun, PENG Yihua, XU Muming, et al. Discussion on drainage-consolidation methods for tailings dam and their applicable conditions[J]. Modern Mining, 2014, 30(9):163-165(in Chinese).
- [20] 叶剑,兰吉武,陈云敏,等.垃圾填埋场中水平导排盲沟渗流模型及间距设计[J].岩土工程学报,2016,39(10):1923-1929.
YE Jian, LAN Jiwu, CHEN Yunmin, et al. Seepage model and spacing design of horizontal trench in landfills[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 39(10):1923-1929(in Chinese).
- [21] 赵发,陈文都,曾姣红.降低铀尾矿库浸润线的技术实践[J].铀矿冶,2024,43(3):100-105.
ZHAO Fa, CHEN Wendu, ZENG Jiaohong. Technical practice of reducing the seepage line of uranium tailings pond[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(3):100-105(in Chinese).
- [22] GEOSLOPE INTERNATIONAL LTD. Heat and mass transfer modeling with GeoStudio[R]. Calgary:Geoslope International Ltd, 2021.
- [23] 尾矿设施设计参考资料编写组.尾矿设施设计参考资料[M].北京:冶金工业出版社,1980.
- [24] 毛昶熙.渗流计算分析与控制:第二版[M].北京:中国水利水电出版社,2003.

Analysis of Seepage Control of Drainage Consolidation Measures for a Uranium Tailings Pond

HU Liangcai, GUO Daping, LI Yulei, LI Zhehui, ZHANG Ning

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

Abstract: In order to solve the problem that the minimum buried depth of the phreatic surface in a uranium tailings dam is less than the code limit due to complex depositional structures and insufficient drainage facilities in the tailings dam, the numerical analysis on seepage and stability of the tailings dam were conducted by GeoStudio. The variation patterns of phreatic surface and factor of safety under normal, design, special water levels, with/without drainage consolidation measures, were systematically investigated. The results show that before the drainage consolidation measures were taken, the minimum buried depth of the phreatic surface is 1.74 m, 0.93 m, and 0 m under normal, design, and special water levels, respectively. Especially under the special water level, the phreatic surface emerged from the embankment above the 140.9 m platform. The factor of safety was 1.329, 1.321, 1.291 respectively before the drainage consolidation measures were taken. After setting up the horizontal drainage pipe as drainage consolidation measures, the phreatic surface burial depth increased by 3.48~4.59 m, while factor of safety at normal, design, special water levels rose to 1.431, 1.425, 1.402 respectively, with an increase of 7.68%~8.59%. The drainage consolidation measures can effectively optimize seepage conditions of the embankment, significantly reduce the phreatic surface elevation, and enhance dam stability, confirming satisfactory seepage control effectiveness. The results provide strong technical support for the design of drainage consolidation measures in tailings dams and offer valuable references for ensuring long-term safe operation of tailings ponds.

Key words: tailings dam; phreatic line; drainage consolidation; horizontal drainage pipe; seepage control; numerical simulation