

doi:10.3969/j.issn.1671-4172.2024.04.011

# 土工席垫与排渗墙相结合的尾矿库渗控效果分析

李雪辰<sup>1</sup>, 沈振中<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098;

2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

**摘要:**目的:土工席垫具有良好的集水和排水作用,但尾矿库在长期运行后,土工席垫经常出现因淤堵而失效的现象,这会导致坝体内部排水不充分,浸润面升高,进而增加渗透破坏的可能性,为此提出增设排渗墙来解决土工席垫失效引起的排渗安全问题。**方法:**以某尾矿库工程为例,采用饱和-非饱和渗流计算理论,计算分析了土工席垫不同失效程度下以及增设排渗墙后渗流场的变化。**结果:**结果表明:随着土工席垫失效程度逐渐加深,尾矿库坝体内部浸润线会逐渐升高,直至不能满足渗流控制要求。**结论:**在增设排渗墙后,可以有效控制坝体内浸润线埋深,提高坝体的排渗能力,满足安全要求。

**关键词:**尾矿库;渗流场;土工席垫;排渗墙;排渗效果

**中图分类号:**TV641, TD926.4<sup>+</sup>1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1671-4172(2024)04-0074-07

## Evaluation of seepage control effect of drainage wall and geotechnical mat combined system of tailings pond

LI Xuechen<sup>1</sup>, SHEN Zhenzhong<sup>1,2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Purpose: Geotechnical mat has good water collection and drainage functions. However, after long-term operation of tailings pond, geotechnical mat is often failed due to clogging, which will lead to insufficient drainage inside the dam body and an increase in the infiltration surface, thereby increasing the possibility of seepage damage. Therefore, it is proposed to add drainage walls to solve the drainage safety problem caused by the failure of geotechnical mat. **Method:** Taking a tailings pond project as an example, the saturated-unsaturated seepage calculation theory was used to calculate and analyze the changes in the seepage field under different degrees of failure of the geotechnical mat and after the addition of the drainage wall. **Result:** The results show that as the geotechnical mat failure gradually deepens, the infiltration line inside the tailings dam will gradually increase until it cannot meet the seepage control requirements. **Conclusion:** After adding drainage wall, the burial depth of the infiltration line in the dam body can be effectively controlled, the drainage capacity of the dam body can be improved, and the safety requirements can be met.

**Key words:** tailings pond; seepage field; geotechnical mat; drainage wall; drainage effect

尾矿库在生产实践中,会堆置大量废水及尾矿,是具有高势能的泥石流源,一旦发生溃坝,后果不堪

设想<sup>[1-2]</sup>。据资料统计,在坝体失事造成的尾矿库灾害中,渗透破坏占有较高的比例<sup>[3]</sup>。在尾矿库实际运行中常采用一些排渗措施降低坝体浸润面,改善坝体渗流情况,提高稳定性。土工席垫作为尾矿库常用的一种新型土工合成材料,除了具有良好的集水、排水作用外还具有一定的水平加筋作用<sup>[4]</sup>。但尾矿库在长期运行后,土工席垫经常出现因淤堵而失效的现象,这会导致坝体内部排水不充分,浸润面

收稿日期:2024-02-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52179130);江苏高校优势学科建设工程资助项目(水利工程)(YS11001)

作者简介:李雪辰(2000—),男,硕士研究生,研究方向为水工结构工程渗流控制。E-mail:451322743@qq.com。

通信作者:沈振中(1968—),男,教授,博士生导师,研究方向为水工结构工程。E-mail:zhzshen@hhu.edu.cn。

升高,进而增加渗透破坏的可能性。因此,当土工席垫失效时,需要采取相应的措施进行治理。

满健铭等<sup>[5]</sup>研究了排渗设施淤堵失效下尾矿库放矿渗流分析,结果表明淤堵后的排渗席垫渗透系数降低至原渗透系数的0.8,设计放矿强度下放矿不超过7 d,仍然能满足尾矿库安全需求;陶东良等<sup>[6]</sup>分析了排渗席垫不同失效情况下某尾矿库渗流场的变化,结果表明排渗席垫渗透系数降为原来的0.7、0.5和0.3时,堆积坝临界浸润线埋深均满足安全要求;满健铭等<sup>[7]</sup>提出增设水平排渗飘管措施来解决土工席垫失效带来的排渗安全问题,结果表明,水平排渗飘管与土工席垫的联合排渗措施可提高堆积坝的排渗能力,并且有效控制坝体内浸润面。

本文将以某铅矿尾矿库为例,应用渗流有限元分析理论,建立尾矿库坝体三维模型,研究土工席垫与排渗墙相结合的排渗措施的渗控效果,为类似尾矿库工程的排渗设计提供参考。

## 1 工程概况

河南省某铅矿尾矿库工程,初期坝为碾压堆石坝,坝顶高程1 330 m,坝高60 m,初期库容 $162.8 \times$

$10^4 \text{ m}^3$ ,有效库容 $137.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,尾矿库为三等库;后期采用上游法堆坝,平均堆积边坡1:5,设计堆积标高为1 469 m,尾矿堆高139 m,总坝高199 m,总库容 $2 521.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,有效库容 $2 468.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,属于二等库。为降低堆积坝体浸润线,在初期坝顶1 330 m标高以上每隔8 m高程设置坝体土工席垫排渗层,土工席垫宽4 m,厚12 mm,在距堆积坝滩顶150 m沉积滩平行坝轴线分段铺设。图1为该工程设计平面图。该工程采用土工席垫作为排渗设施,堆积坝内部的水从土工席垫处渗入,经由排渗管道排出堆积坝体,排渗效果明显,但长时间运行后,易产生淤堵现象<sup>[8]</sup>。为防止因土工席垫淤堵引起浸润线过浅的问题,提出在堆积坝体内设置两道排渗墙,使其与土工席垫形成联合排渗系统,如图2所示。排渗墙由渗透系数较大的砂砾石、碎石材料作集水墙,连接水平排水管将集水墙中的渗水排出坝体外<sup>[9]</sup>,如图3所示。其中,第一道排渗墙设置于距离(水平距离)坝轴线200 m处,墙宽1 m,高25 m,坝坡高程1 370 m,底部接土工席垫的排水管将坝体渗水排至坝外;第二道排渗墙设置于距离坝轴线440 m处,墙宽1 m,高25 m,坝坡高程1 418 m,底部接土工席垫的排水管将坝体渗水排至坝外。

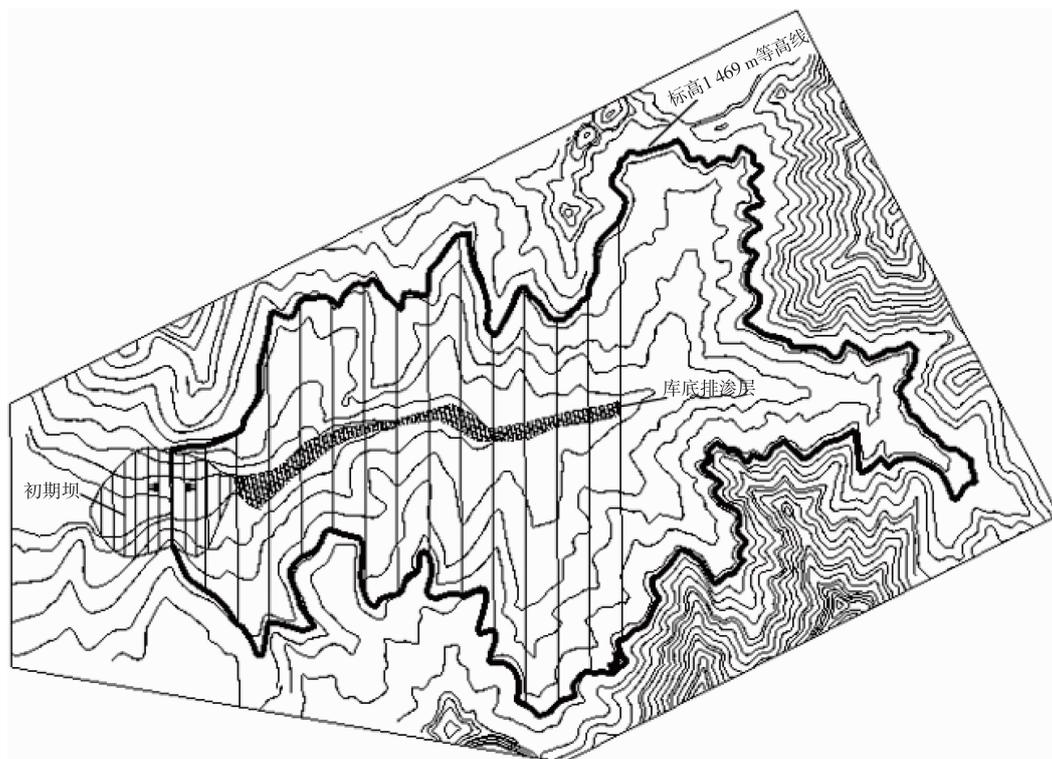


图1 工程设计平面图

Fig. 1 Project overall design plan

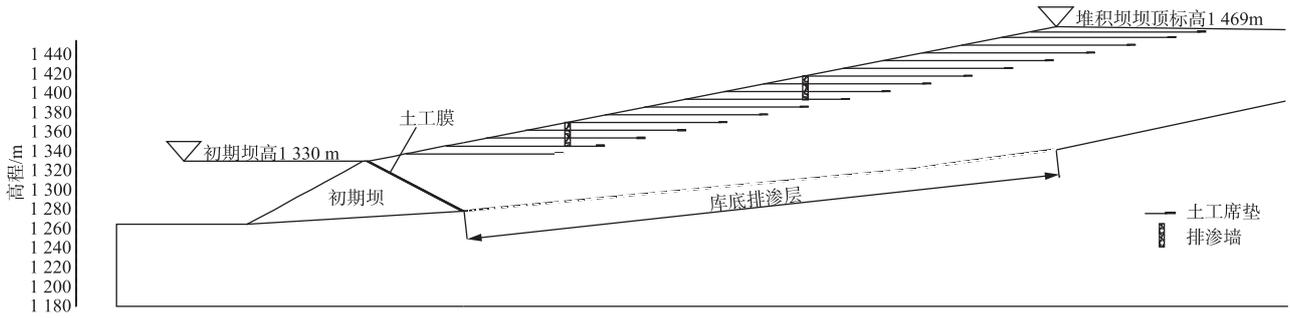


图 2 联合排渗系统结构

Fig. 2 Structure of combined drainage system

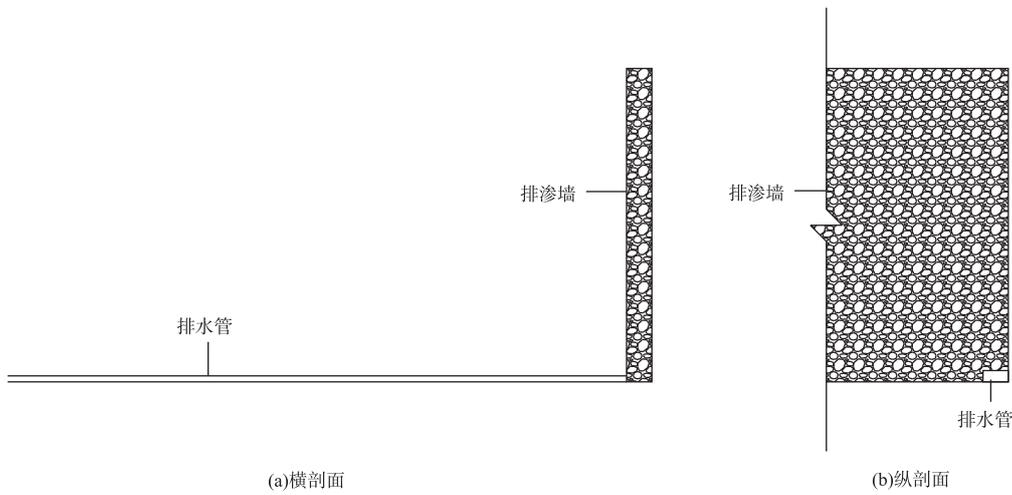


图 3 排渗墙结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of the water seepage drainage wall

## 2 计算模型及参数

### 2.1 计算模型

为判断土工席垫与排渗墙相结合的排渗措施对土工席垫淤堵问题的处理是否合理有效,构建了一个能全面模拟尾矿库结构、坝基和周围山体地质地形条件,并且能够反映尾矿库最终坝高渗流场变化

的三维有限元模型。依据勘察和设计基础资料,考虑实际工程地形、地质和堆积坝结构及其渗流控制措施,采用控制断面超单元法<sup>[10]</sup>,先将计算区域离散成超单元网格,然后通过加密剖分进一步离散成有限元网格。最终计算模型有限元网格节点总数为 28 025 个,单元总数为 28 977 个,尾矿库三维有限元网格如图 4 所示。

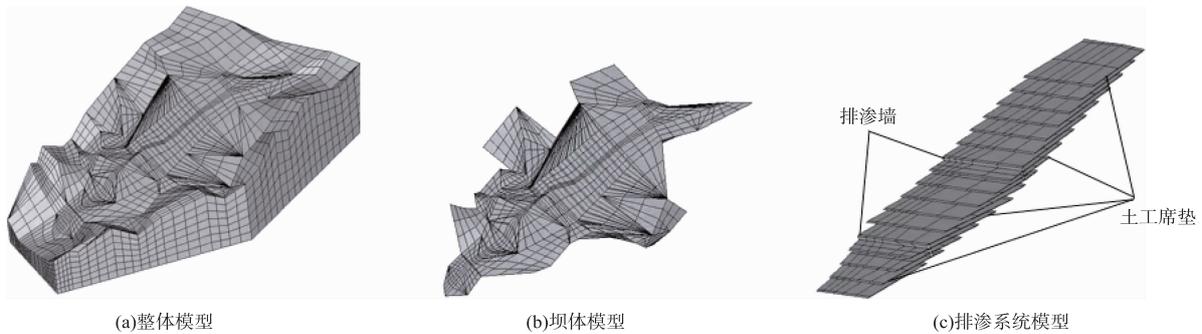


图 4 尾矿库三维有限元模型

Fig. 4 Three-dimensional finite element model of tailing pond

### 2.2 计算参数

依据尾矿库工程水文地质资料、现场钻孔水位资料及勘察和设计基础资料,考虑尾矿砂沉积规律及颗粒级配情况,结合工程实际情况,将尾矿库沉积剖面分为四个区,由堆积坝边坡向库内分别为尾中砂、尾细砂、尾粉砂、尾粉土,见图 5。参考工程地勘资料、类似工程资料并查阅文献,确定用于计算的各

材料渗透系数如表 1 所示。其中,排渗设施即土工席垫部分失效最直观的体现为渗透系数的降低,故可以通过降低排渗设施的渗透系数来模拟工程中由于淤堵而导致的排渗设施失效问题,将土工席垫渗透系数降低为原渗透系数的 0.7 倍与 0.3 倍,分别命名为土工席垫 II 与土工席垫 III。

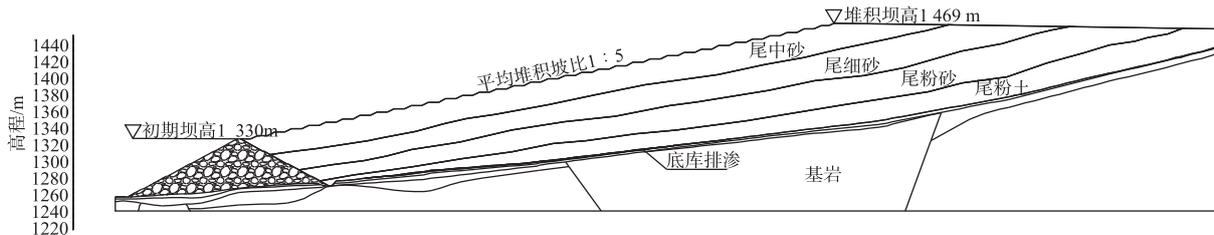


图 5 材料分区示意图

Fig. 5 Schematic diagram of material division

表 1 尾矿坝坝体材料渗透系数

Table 1 Seepage coefficients of tailing dam materials

材料名称	分布部位	渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )	材料名称	分布部位	渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )
基岩	坝基及库底	4.00×10 <sup>-6</sup>	尾粉土	沉积滩	3.00×10 <sup>-5</sup>
堆石	初期坝	3.00×10 <sup>-1</sup>	土工席垫 I	堆积坝	1.00×10 <sup>-2</sup>
土工膜	初期坝内表面	1.00×10 <sup>-6</sup>	土工席垫 II	堆积坝	0.70×10 <sup>-2</sup>
尾中砂	沉积滩	1.50×10 <sup>-3</sup>	土工席垫 III	堆积坝	0.30×10 <sup>-2</sup>
尾细砂	沉积滩	2.50×10 <sup>-4</sup>	排渗墙	堆积坝	1.50×10 <sup>-2</sup>
尾粉砂	沉积滩	7.50×10 <sup>-5</sup>	库底排渗层	库底	1.00×10 <sup>-2</sup>

### 2.3 模型边界条件

本文尾矿库渗流计算中,不计降雨影响,考虑稳定渗流,计算模型边界类型主要分为已知水头边界、出渗边界、不透水边界三种。已知水头边界包括尾矿库上游水位淹没线以下的尾矿库坝面、山体和河道等;出渗边界包括尾矿库下游坡面、初期坝下游坡面、土工席垫与排水管结合处、排渗墙与排水管结合处、底库排渗层上游末端(位于初期坝上游坡脚附近)以及库区水位以上的山体表面等;不透水边界包括模型截取边界及坝体与地基接触边界。

最高洪水位 1 467.39 m,初期坝下游无水。

采用渗流有限元法及截止负压法计算<sup>[11]</sup>,并绘制尾矿库地下水位等值线图、堆积坝最大剖面位势及浸润线分布图。

## 3 联合排渗措施效果分析

为分析土工席垫与排渗墙相结合的排渗措施的渗控效果,需对比分析不同工况下尾矿库的渗流特性,本文考虑以下 5 种工况:1)工况 1。土工席垫正常运行,不设排渗墙。2)工况 2。土工席垫渗透系数降低为原来的 0.7 倍,不设排渗墙。3)工况 3。土工席垫渗透系数降低为原来的 0.7 倍,设置排渗墙。4)工况 4。土工席垫渗透系数降低为原来的 0.3 倍,不设排渗墙。5)工况 5。土工席垫渗透系数降低为原来的 0.3 倍,设置排渗墙。计算水位取库内

### 3.1 尾矿库平面渗流特性对比

5 种不同工况下尾矿库地下水位等值线如图 6 所示。从图 6 可以看出,工况 1、工况 2 和工况 4,由于土工席垫的渗透系数逐渐降低,同位置地下水位等值线数值逐渐增大。因为土工膜的作用,初期坝附近地下水位等值线分布较为密集,但由于土工席垫仍发挥作用,并未出现某一部位特别密集,即无法排渗导致渗透坡降变大的情况。分别对比工况 2 和工况 3、工况 4 和工况 5,工况 2 和工况 4 地下水位等值线分布均匀,而工况 3 和工况 5 地下水位等值线在 x 坐标为 400 m 和 640 m 附近较为密集,这是因为在堆积坝 x 坐标为 400 m 和 640 m 处设置了两道排渗墙,致使地下水经过排渗墙后水位降低较快,因此其附近地下水位等值线较为密集。另外,工况 3 和工况 5 相对于工况 2 和工况 4 而言,同位置地下水位等值线数值较小,这是因为设置排渗墙改变了排渗条件,导致地下水位整体降低。

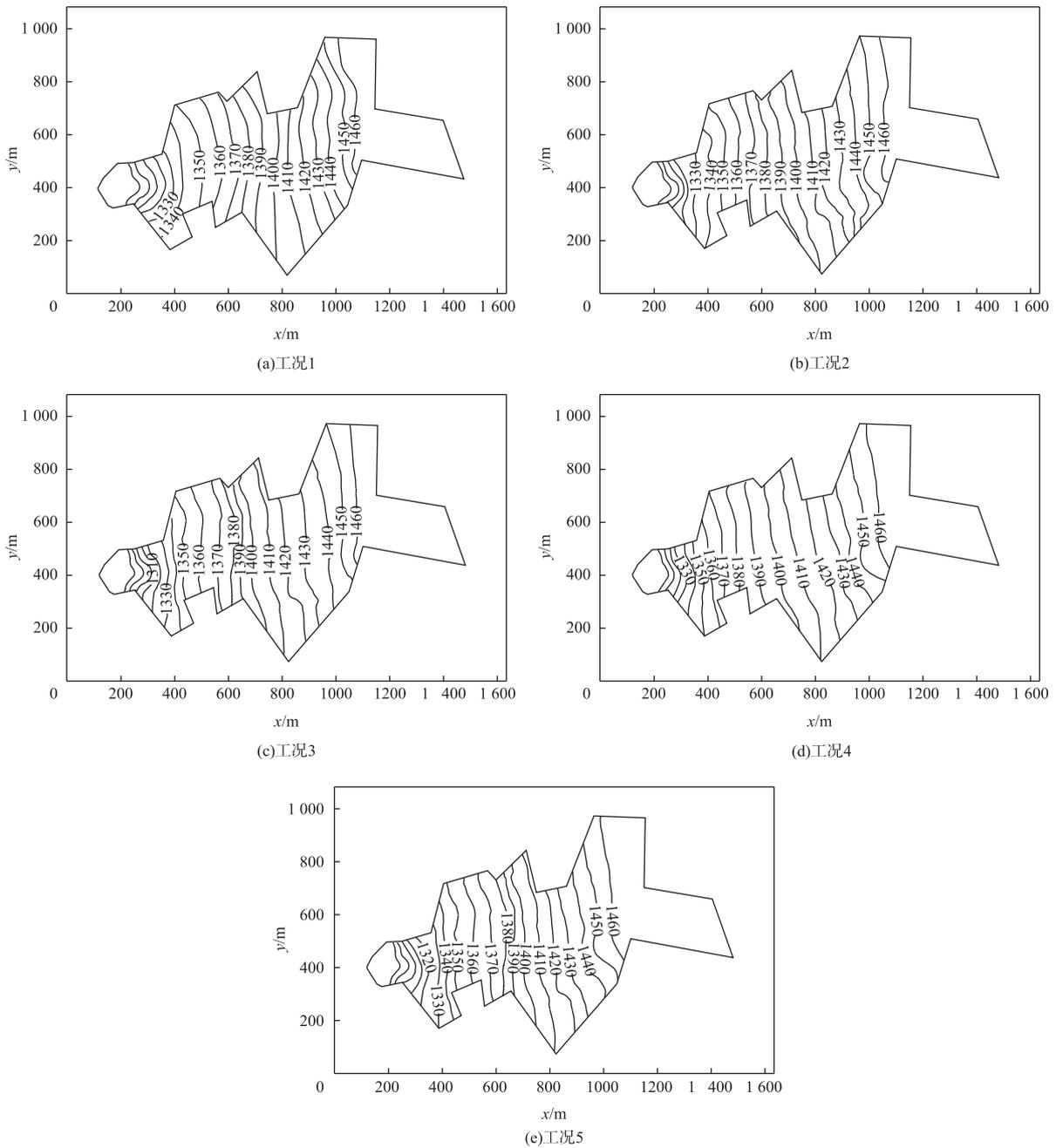


图6 各工况下尾矿库地下水位等值线分布图(注意排的时候按 a、b、c、d、e 顺序排图)

Fig. 6 Contour map of underground water level of tailings pond under various working conditions

### 3.2 尾矿库剖面渗流特性对比

图7为不同工况下尾矿库最大剖面排渗效果对比图,表2为各工况下最大剖面浸润线埋深。由图7可知,标高1469 m尾矿库在最高洪水位1467.39 m时,尾矿库沉积滩后集水池中的水透过尾矿堆积体,通过初期坝下的基岩由库内向库外下游排泄。从图7和表2可以看出,土工席垫正常运行时,尾矿库的排渗效果显著,说明土工席垫能够起到很好的排渗作用;随着土工席垫的失效,坝体内部

的浸润线不断升高,但尾矿库内渗流场的水力坡降变化规律大体一致,整体比较平缓,靠近初期坝,由于土工膜作用,水力坡降又逐渐变大。

由表2可以看出,工况2即土工席垫渗透系数降低为原来的0.7倍时,虽然部分失效,但仍能满足浸润线最小埋深需大于6 m的安全设计要求;而工况4即土工席垫渗透系数降低为原来的0.3倍时,浸润线埋深已经不能完全满足浸润线最小埋深需大于6 m的安全设计要求,存在安全隐患,而设置排

渗墙后,浸润线有明显的下降,且各断面浸润线埋深均满足大于 6 m 的安全设计要求,说明土工席垫与

排渗墙相结合的排渗措施合理有效,明显改善渗流场状态,确保尾矿库的运行安全。

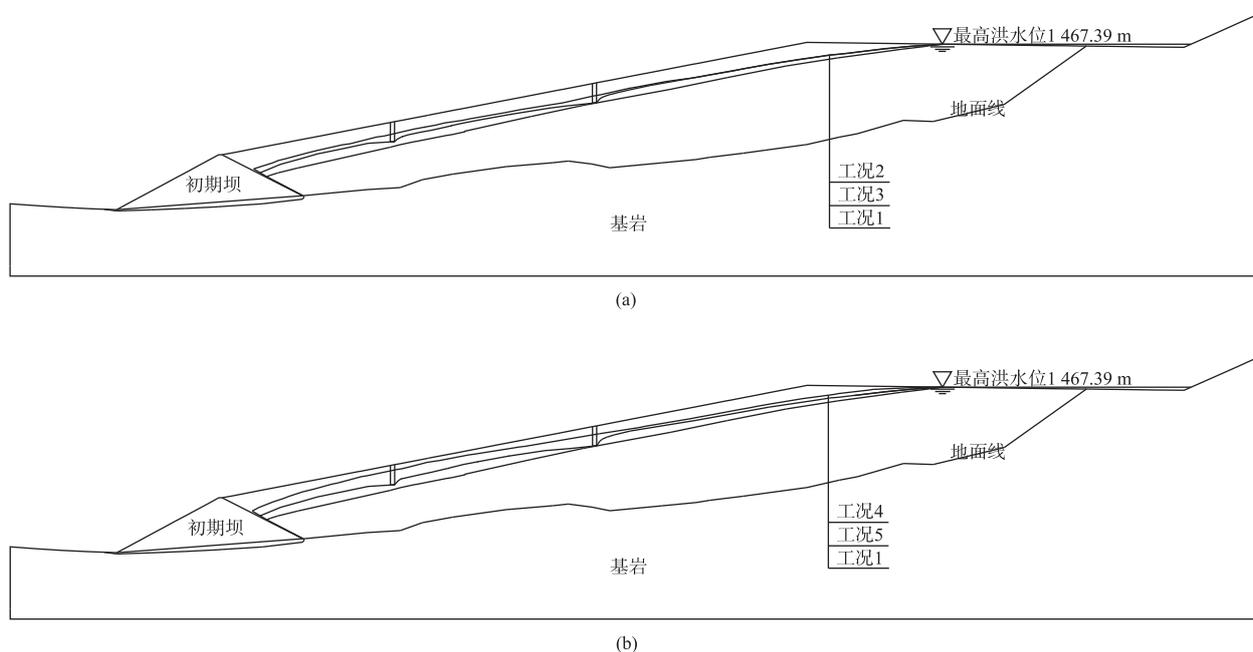


图 7 各工况下最大剖面排渗效果对比

Fig. 7 The comparison of drainage effect in the biggest section under various working conditions

表 2 各工况最大剖面浸润线埋深

Table 2 The buried depth of the infiltration line in the biggest section under various working conditions /m

坝坡标高	埋深				
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
1350	34.03	18.17	23.05	11.61	23.05
1370	30.70	15.00	23.89	6.68	23.89
1390	28.22	14.46	18.01	5.76	16.09
1410	25.44	16.48	20.62	9.18	19.82
1430	25.30	14.76	14.76	12.11	14.69
1450	24.58	17.47	17.47	13.73	17.22
1469	25.22	19.78	19.78	15.65	19.92

#### 4 结论

1)土工席垫长期运行后,容易出现淤堵现象,从而导致土工席垫部分失效,通过有限元法分析得出,随着土工席垫失效程度逐渐加深,尾矿库坝体内部浸润线会逐渐升高,直至不能满足渗流控制要求,影响尾矿库的正常运行。

2)为了解决尾矿库土工席垫部分失效问题,提出使用土工席垫与排渗墙相结合的尾矿库排渗系统,并结合实际工程进行验证,该排渗系统可以有效降低土工席垫部分失效时坝体内浸润线,增强堆积坝体的排渗能力,解决尾矿库加高扩容工程的排渗安全性,证明了该排渗系统的可行性。

#### 参 考 文 献

[1] 沈楼燕,李连通,张超,等.我国尾矿库安全监测技术发展综述[J].有色金属工程,2023,13(1):121-126.  
SHEN Louyan, LI Liantong, ZHANG Chao, et al. Review on the development of safety monitoring technology for tailings pond in China [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(1):121-126.

[2] 边归国,王翔,陈影声,等.我国尾矿库事故次生河流污染事件特征分析[J].矿冶,2023,32(6):96-102.  
BIAN Guiguo, WANG Xiang, CHEN Yingsheng, et al. Analysis on the characteristics of secondary river pollution events caused by tailings pond accidents in China [J]. Mining and Metallurgy, 2023, 32(6):96-102.

[3] 广州绿网环境保护服务中心.全国尾矿库数据分析报告[R].广州,2018.

- Guangzhou Green Data Environmental Service Center. National tailings pond data analysis report[R]. Guangzhou, 2018.
- [4] 林杰,沈振中,满健铭,等.土工席垫提高尾矿坝稳定性的影响研究[J].矿业研究与开发,2020,40(11):28-32.  
LIN Jie, SHEN Zhenzhong, MAN Jianming, et al. Study on the influence of geomat improving the stability of tailings dam[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(11): 28-32.
- [5] 满健铭,沈振中,林杰,等.排渗设施部分失效下的尾矿库放矿渗流分析[J].有色金属(矿山部分),2021,73(2):1-4,10.  
MAN Jianming, SHEN Zhenzhong, LIN Jie, et al. Analysis of drawing-ore seepage in tailings pond under consideration of drainage effect[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2021, 73(2):1-4, 10.
- [6] 陶东良,张国琛,吴蒙蒙,等.排渗系统不同失效程度下尾矿库三维渗流场数值模拟研究[J].水力发电,2023,49(4):42-46,90.  
TAO Dongliang, ZHANG Guochen, WU Mengmeng, et al. Numerical simulation of three-dimensional seepage field in tailings pond under different failure degrees of seepage discharge system[J]. Water Power, 2023, 49(4):42-46, 90.
- [7] 满健铭,沈振中,陶东良,等.尾矿库加高扩容工程排渗飘管与土工席垫联合渗控效果评价[J].水电能源科学,2021,39(5):92-96.  
MAN Jianming, SHEN Zhenzhong, TAO Dongliang, et al. Evaluation of seepage control effect of drainage pipe and geotechnical mat combined system of tailings pond heightening capacity expansion project[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(5):92-96.
- [8] PALMEIRA M E, REMIGIO F A, RAMOS L M, et al. A study on biological clogging of nonwoven geotextiles under leachate flow[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2007, 26(3): 205-219.
- [9] 梁亮,沈振中,王东,等.尾矿坝排渗墙渗流控制效果计算分析[J].水电能源科学,2011,29(4):89-91.  
LIANG Liang, SHEN Zhenzhong, WANG Dong, et al. Calculation analysis of effect of drainage wall on seepage control[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(4):89-91.
- [10] 赵坚,盛金昌,速宝玉,等.三维有限元网格自动剖分的断面节点控制法[J].长江科学院院报,2000(4):34-37.  
ZHAO Jian, SHENG Jinchang, SU Baoyu, et al. Method of section-node control for mesh auto-generation in 3-D FEM analysis[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2000(4):34-37.
- [11] 速宝玉,沈振中,赵坚.用变分不等式理论求解渗流问题的截止负压法[J].水利学报,1996(3):22-29,35.  
SU Baoyu, SHEN Zhenzhong, ZHAO Jian, et al. The cut-off negative pressure method for solving filtration problems based on the theory of variational inequities[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996(3):22-29, 35.

### (上接第66页)

- [2] 罗佳,詹进,林卫星,等.李楼铁矿切割天井行程方案试验研究[J].有色金属(矿山部分),2016,68(2):69-72.  
LUO Jia, ZHAN Jin, LIN Weixing, et al. Experimental study on cutting patio forming technology in Lilou Iron Mine[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2016, 68(2):69-72.
- [3] 张永茂,张强,田奇志.张庄铁矿高阶段矿房切割天井施工工艺试验[J].现代矿业,2020(9):94-96.  
ZHANG Yongmao, ZHANG Qiang, TIAN Qizhi, et al. Experimental study on construction technology of high level chamber ctuuing Raise in Zhangzhuang Iron Mine[J]. Modern Mining, 2020(9):94-96.
- [4] 解世俊.金属矿床地下开采[M].北京:冶金工业出版社,2006.  
XIE Shijun. Underground mining of metal mine[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.
- [5] 李启月,李夕兵,范作鹏,等.深孔爆破一次成井技术与应用案例分析[J].岩石力学与工程学报,2013,32(4):664-670.  
LI Qiyue, LI Xibing, FAN Zuopeng, et al. One time deep hole raise blasting technology and case study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4):664-670.
- [6] 汪旭光.爆破手册[M].北京:冶金工业出版社,2010.  
WANG Xuguang. Handbook of blasting [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.
- [7] 徐敏.中深孔爆破一次成井技术研究及应用[D].长沙:中南大学,2012.  
XU Min. Research and application of blasting to form a shaft by one step with medium-lengthhole [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [8] 郑欣,王伟杰.基于ANSYS/LS-DYNA的竖井掏槽延时爆破研究[J].工程爆破,2021,27(6):59-64.  
ZHENG Xin, WANG Weijie. Research on delay blasting of shaft cutting based on ANSYS/LS-DYNA [J]. Engineering Blasting, 2021, 27(6):59-64.
- [9] 李祥龙,颜世骞,王建国,等.分层一次爆破成井精确延时爆破参数研究[J].高压物理学报,2024,38(2):1-13.  
LI Xianglong, YAN Shiqian, WANG Jianguo, et al. Precise time-delay blasting parameters of stratified single blasting well completion [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024, 38(2):1-13.
- [10] 陈一曦,钟明寿,刘影,等.平行掏槽孔内延时爆破技术的SPH-FEM数值模拟[J].工程爆破,2023,29(3):55-62.  
CHEN Yixi, ZHONG Mingshou, LIU Ying, et al. Numerical simulation on delayed blasting technology in parallel cut hole based on SPH-FEM[J]. Engineering Blasting, 2023, 29(3):55-62.
- [11] 楼晓明,周文海,简文彬,等.岩石破碎机理的微差爆破最佳延时控制[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(2):158-163.  
LOU Xiaoming, ZHOU Wenhai, JIAN Wenbin, et al. Millisecond blasting optimal time delay control based on rock breaking mechanism [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(2):158-163.