



移动扫码阅读

孙杰,郝喆,陈红丹.尾矿坝加高对重金属 Cu^{2+} 迁移影响的数值模拟研究[J].能源环境保护,2022,36(2):59-67.
SUN Jie,HAO Zhe,CHEN Hongdan. Numerical simulation research on the influence of heightening tailings dam on the migration of heavy metal Cu^{2+} [J]. Energy Environmental Protection,2022,36(2):59-67.

尾矿坝加高对重金属 Cu^{2+} 迁移影响的数值模拟研究

孙 杰,郝 喆*,陈红丹

(辽宁大学 环境学院,辽宁 沈阳 110036)

摘要:为研究尾矿坝加高对 Cu^{2+} 在尾矿库中迁移的影响,以歪头山尾矿库为例,采用 GeoStudio 软件进行数值模拟,建立不同坝高的尾矿库模型,获得了不同坝高下的孔隙水压力等势图、重金属浓度分布等势图和粒子迁移路径图。结果表明:当尾矿坝加高时,相同位置的孔隙水压力增大;在尾矿库相同深度,尾矿坝加高会增大 Cu^{2+} 浓度和污染物迁移距离;经过相同时间的迁移,同一深度处,尾矿坝加高会使重金属污染物的质量浓度增大;尾矿坝加高会增大污染物颗粒的迁移距离和平均迁移速度。

关键词:尾矿库;尾矿坝加高;重金属迁移; Cu^{2+} 迁移;数值模拟;GeoStudio

中图分类号:X523

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2022)02-0059-09

Numerical simulation research on the influence of heightening tailings dam on the migration of heavy metal Cu^{2+}

SUN Jie,HAO Zhe*,CHEN Hongdan

(College of Environment Sciences,Liaoning University,Shenyang 110036,China)

Abstract: In order to study the influence of heightening tailings dam on the migration of Cu^{2+} in the tailings pond, the numerical simulation was carried out by GeoStudio software in Waitoushan tailings pond. The tailings pond models with different dam heights were established. The equipotential diagrams of pore water pressure and heavy metal concentration distribution and the diagrams of particle migration path with different dam heights were obtained. The results showed that the pore water pressure at the same position increased with the height of the tailings dam. At the same depth of the tailings dam, the concentration of Cu^{2+} and the migration distance of pollutants increased with the height of tailings dam. After migration for the same time, the mass concentration of heavy metal pollutants at the same depth increased with the height of the tailings dam. The migration distance and average migration speed of pollutant particles increased with the height of the tailings dam.

Key Words: Tailings pond; Heightening tailings dam; Heavy metal migration; Cu^{2+} migration; Numerical simulation; GeoStudio

0 引 言

尾矿库用于堆放矿山开采后产生的尾矿,是矿山开采中的重要设施^[1]。它也是矿山开采中产生的人造污染源^[2],若管理不当,可能会造成尾矿

砂外泄、污染物扩散等后果,严重威胁周围环境、资源及下游人民的生命财产安全^[3]。尾矿坝是尾矿库中最主要的构筑物,由初期坝和后期尾矿材料形成的坝体共同构成^[4]。尾矿废水中含有重金属污染物及其他有毒有害物质,其经过迁移作用

收稿日期:2021-12-16;责任编辑:蒋雯婷

基金项目:辽宁省自然科学基金项目(20180550192);辽宁省科技计划项目(2019JH8/10300107);辽宁省百千万人才资助项目(辽百千万立项[2015]33号);辽宁省科技计划项目(2020JH2/10300100);辽宁省科技计划项目(2019JH8/10300105);中央引导地方科技发展专项资金(2021JH6/10500015)

第一作者简介:孙杰(1993-),男,安徽亳州人,硕士在读,主要从事矿山环境治理领域的研究工作。E-mail:13998341218@163.com

通讯作者简介:郝喆(1972-),男,辽宁沈阳人,教授,主要从事矿山环境治理领域的研究工作。E-mail:626447443@qq.com

会对周围的水和土壤造成污染^[5-7],因此,尾矿库引发的重金属污染问题愈加受到关注。

目前,许多学者在尾矿库污染物运移的数值模拟方面已有一定的研究进展。张建军^[1]等应用 GEO-SLOPE 软件中的 SEEP/W 和 CTRAN/W 模块分析了尾矿砂各层渗透系数比、干滩长度等对渗流场的影响,并且模拟了考虑和不考虑吸附两种情况下 100 天、1 000 天坝体内铜离子的迁移过程;陈红丹^[8]等模拟了降雨、蒸发与地下水耦合作用下的大型尾矿库重金属 Cu^{2+} 的迁移过程;周泽超^[9]等利用 TOUGH2 软件根据建立的地下水流动模型与地下水污染物迁移模型,模拟计算出了各时刻铜离子在坝体中的分布情况;Yu Liren 等^[10]模拟研究了阿纳马市附近的索利莫斯河的流动与污染物的运移;B.O.Tsydenov^[11]通过数值模拟分析了某海域秋季热坝发展过程中,污染物在不同风况下的空间迁移规律及分布特点;Ben Abdelghani Farouk^[12]等运用 Hydro-Geosphere 软件模拟了污染物在露天矿山中随时间推移的迁移

情况。上述研究多基于现有尾矿库研究重金属污染物的对流-弥散作用,未见在尾矿库堆积过程中,尾矿坝加高对于重金属迁移范围的影响研究。本文以本钢集团歪头山尾矿库为例,利用 GeoStudio 软件中的 SEEP/W 和 CTRAN/W 模块建立尾矿库数值模型,研究尾矿坝加高对于重金属 Cu^{2+} 在尾矿库中迁移范围的影响,为大型尾矿库环境地质评价和污染预测防治提供依据。

1 研究区域及方法

1.1 研究区域

研究区域位于辽宁省本溪市溪湖区,该尾矿库属于二等尾矿库。库区占地面积 1.62 km^2 ,现库容量约为 1 亿 m^3 。尾矿库初期坝由透水堆石坝构成,初期坝坝顶标高为 191.9 m ,坝底标高 180.0 m ,相对高度 11.9 m ,顶宽 4.0 m ,坝长 410.0 m ,内坡比 $1:2$,外坡比 $1:2.5$ 。尾矿库的主坝尾矿堆积,坝顶标高为 280.0 m ,坝库坝底标高 180 m ,主坝高度差约为 100 m ,坝顶坝长约为 $1 600 \text{ m}$ 。



(a) 尾矿库坝顶



(b) 尾矿库下游

图1 尾矿库现场

Fig.1 Site of the tailings pond

1.2 研究方法

Geostudio 系统软件是由加拿大岩土软件 GEO-SLOPE 公司开发的面向岩土、采矿、交通、水利、地质、环境工程等领域的仿真分析软件,是全球最知名的岩土工程分析软件之一。它包含以下八种专业分析模块: SLOPE/W (边坡稳定性分析)、SEEP/W (地下水渗流分析)、SIGMA/W (岩土应力变形分析)、QUAKE/W (地震动力响应分析)、TEMP/W (地热分析)、CTRAN/W (地下水污染物传输分析)、VADOSE/W (综合渗流蒸发区和土壤表层分析)。当用户需要进行多模块工作时,只需将模型的边界条件和材料参数等定义在一个模块中,使用其他模块时不需重复输入相关参数,因此该软件建模高效、操作简单^[13]。本研究中所使用的 Geostudio 版本为 2012 版。

SEEP/W 模块主要用于分析多孔渗水材料,它可以分析饱和稳态及饱和-不饱和瞬态问题,几乎可以对所有地下水问题进行建模分析,其计算原理是通过内插函数来表征该单元上每一节点处的水头值,单元内的水头分布用线性差值函数来近似。CTRAN/W 模块主要用于分析污染物通过土层和岩石等渗流介质外界环境中的水体,经过地面和地下水的非饱和区域进入地下水体的问题,其计算原理是伽辽金有限元法,该方法从剩余加权法出发对对流-弥散方程进行数值离散,是求解微分方程近似解的一种方法。CTRAN/W 和 SEEP/W 相结合,可以用来分析污染物的运移。SEEP/W 模块计算水的流速、水体积含量和水流量,CTRAN/W 模块则用这些参数计算污染物的迁移。SEEP/W 和 CTRAN/W 模块均属于有限元

分析软件。

运用 GeoStudio 中的 SEEP/W 和 CTRAN/W 两个模块开展尾矿坝加高对重金属污染物 Cu^{2+} 在尾矿库中迁移规律影响的数值模拟研究。在 SEEP/W 模块中设置尾矿库模型材料参数、边界条件等参数,通过稳态渗流计算得出尾矿库孔隙水压力等势图、体积含水率等结果;利用 CTRAN/W 模块建立对流-弥散和粒子示踪模型,通过计算重金属 Cu^{2+} 的对流-弥散过程,分析对流-弥散过程计算出的重金属浓度等势图、粒子路径迁移图等结果,得到 Cu^{2+} 在尾矿库中迁移的情况,最终通过分析得出尾矿坝加高过程中 Cu^{2+} 的迁移规律。

2 基础原理及模型建立

2.1 Darcy 定律

Darcy 定律是渗流理论中的基本定律^[14],是形容饱和土中水的渗流速度与水力坡降之间的联系。其最初是从饱和土中得到的,同样也适用

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \left[\frac{\partial}{\partial x} (u_x C) + \frac{\partial}{\partial y} (u_y C) \right] = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3)$$

式(3)中: D_x ——横向弥散系数, m^2/d ; D_y ——纵向弥散系数, m^2/d ; C ——污染物浓度, g/m^3 ; u_x ——横向渗流速度, m/d ; u_y ——纵向渗流速度, m/d 。

2.4 模型建立

本文以歪头山尾矿库为例,模拟在尾矿坝加高过程中重金属 Cu^{2+} 的迁移过程,通过对比在不

于非饱和土,不同之处在于渗流系数是否为常量^[15]。表达式为:

$$Q = ki \quad (1)$$

式(1)中: Q ——流速, m/d ; k ——渗流系数, m/d ; i ——渗透坡降,无量纲。

2.2 渗流基本方程

渗流计算方程^[16]:

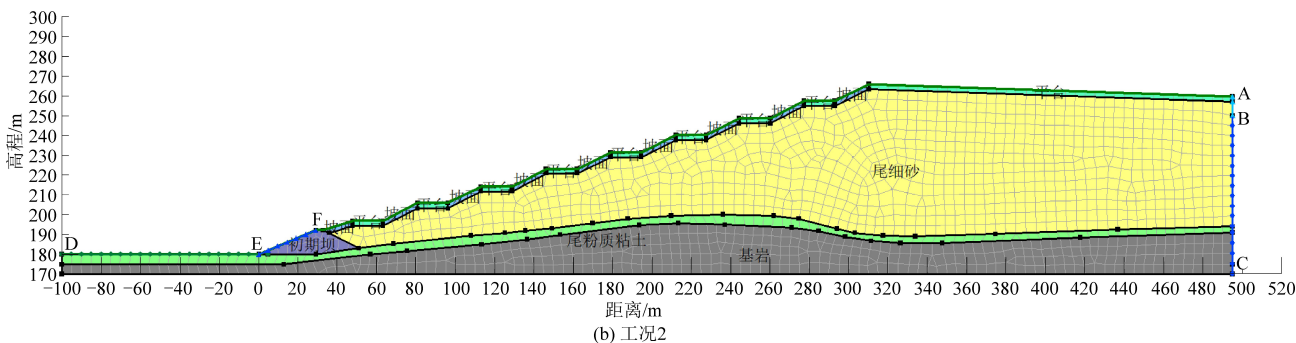
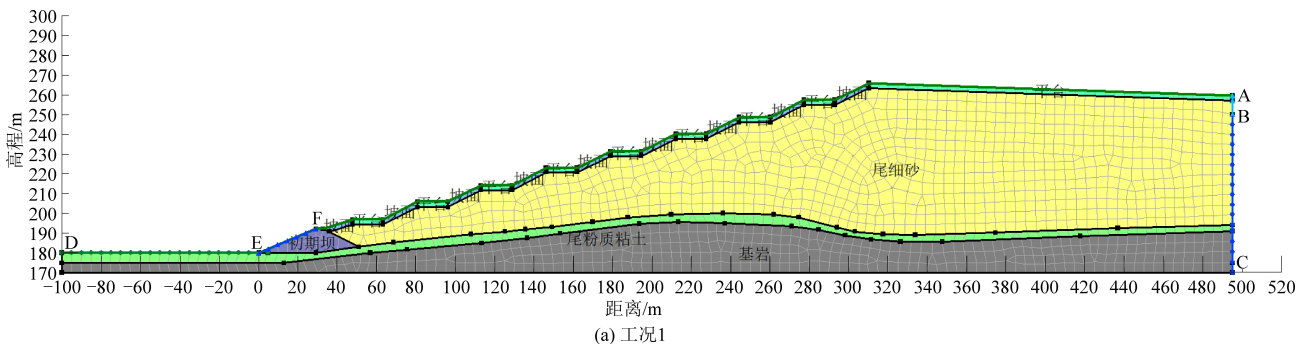
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2)$$

式(2)中: H ——总水头, m ; k_x —— x 方向的渗流系数, m/d ; k_y —— y 方向的渗流系数, m/d ; Q ——边界流量, m^3/d ; θ ——体积水容量, L/m^3 ; t ——时间, d 。

2.3 对流-弥散方程

污染物的迁移机理受到对流-弥散、吸附-沉淀、解吸、络合、生物降解等作用。根据尾矿库各参数性质,本文仅考虑重金属的对流-弥散作用。对流-弥散方程为^[17]:

同尾矿坝坝高下重金属的迁移范围及其浓度分布情况,研究尾矿坝加高对重金属污染物迁移的影响规律。如图 2 所示,本次研究共选取三种不同坝高,工况 1、工况 2、工况 3 的顶部高程分别为 236、263、280 m,三个概化计算模型剖面的地面高程均为 180 m,计算区域的水平距离均为 595 m。模型网格剖分为三角形或四边形,在模拟中已做



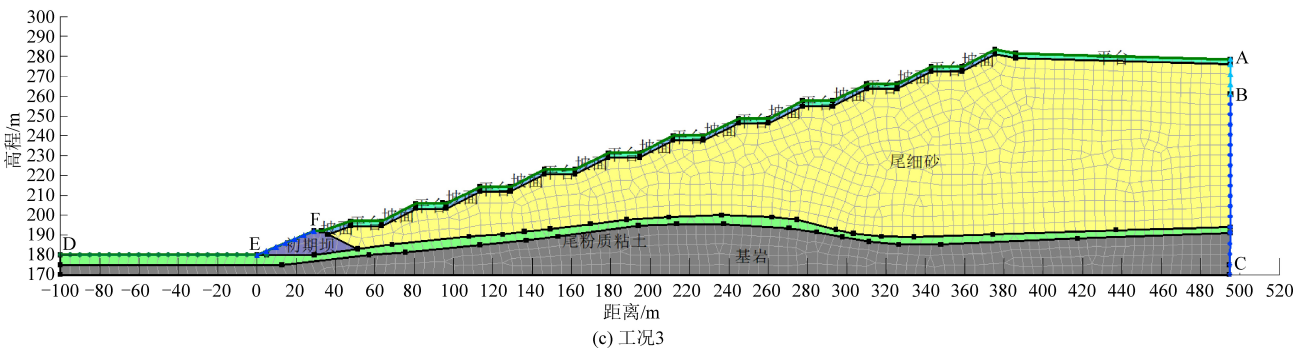


图 2 尾矿库概化计算模型

Fig.2 Generalized calculation model of the tailings pond

网格无关化检验,网格尺寸大小的划分对重金属迁移的影响可忽略不计,本文尾矿库模型全局单元尺寸取 5 m,工况 1、工况 2、工况 3 剖分单元分别为 1 212 个、1 450 个、1 545 个,节点分别为 1 320 个、1 551 个、1 644 个。

2.5 模型边界条件

在进行稳态渗流、对流-弥散模拟时,设置排水边界、零流量边界、上游水头、下游水头等水力边界条件和污染物边界条件。如图 2 所示,在稳态渗流模拟中,AB 为零流量边界,BC 为上游水头,DE 为下游水头,EF 为排水边界。在进行对流-弥散模拟时,BC 为重金属 Cu^{2+} 污染物边界,初始浓度为 50 g/m^3 。

2.6 材料参数

在概化计算模型中,包含尾细砂、尾粉质粘土、基岩等三种不同土层,其中前两层为饱和/不饱和模型,基岩为饱和模型,各介质水文地质参数如表 1 所示,土水特征曲线及各土层渗透系数-基质吸力曲线详见图 3 和图 4。

表 1 各介质水文地质参数

材料	体积含水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	纵向弥散 度/m	横向弥散 度/m
初期坝	0.35	4.0×10^{-2}	10.0	5.0
尾细砂	0.35	4.0×10^{-4}	1.5	0.7
尾粉质粘土	0.34	4.0×10^{-6}	1.0	0.3
基岩	0.35	4.0×10^{-7}	1.0	0.3

3 数值模拟计算结果分析

3.1 渗流分析

图 5 为不同坝高下的尾矿库孔隙水压力等势图,图中所示剖面 1 和剖面 2 交点高程坐标分别为 (211.93 m, 240.31 m)、(146.35 m, 223.01 m)。图 6 为两个剖面在工况 1 高度、工况 2 高度和工

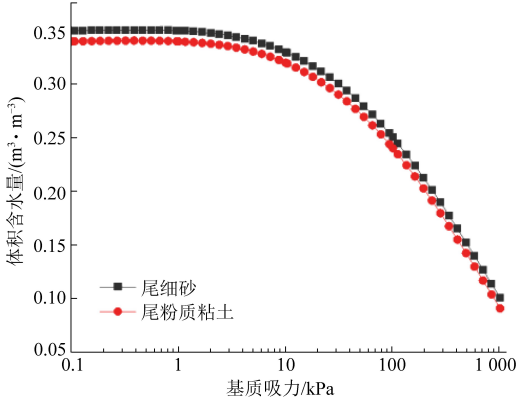


图 3 各介质土水特征曲线

Fig.3 Soil and water characteristic curves of each medium

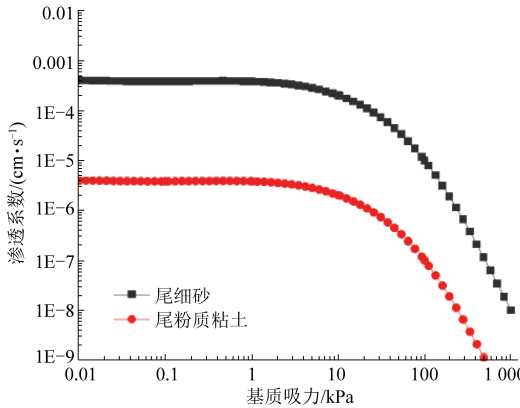


图 4 各介质渗透系数-基质吸力特征曲线

Fig.4 Seepage coefficient-matric suction characteristic curve of each medium

况 3 高度下的垂直方向孔隙水压力等势分布情况。根据图 5 和图 6 可知,在同一尾矿库模型中,垂直方向上孔隙水压力随着尾矿库深度的增加而增大,尾矿库底部的孔隙水压力最大,尾矿库顶部的孔隙水压力最小。且孔隙水压力随高程变化的曲线大致呈一条直线,所以孔隙水压力随高程变化的关系为一次函数关系,经过数据分析可得函数斜率为-9.77,即高程每增加 1 m,孔隙水压力减少 9.77 kPa。

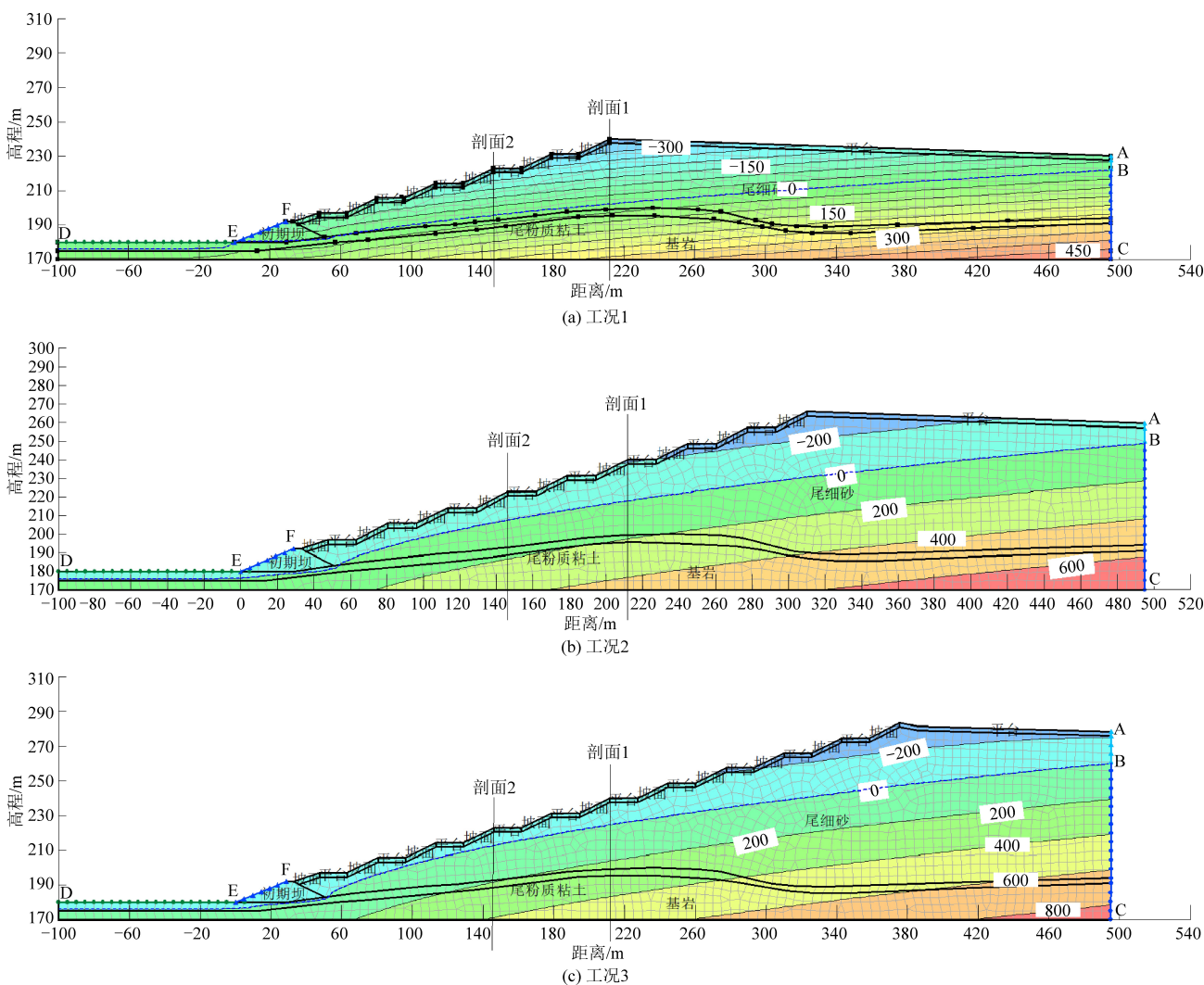


图 5 稳态渗流作用下尾矿库孔隙水压力等势分布图

Fig.5 Equipotential distribution diagrams of pore water pressure of the tailing pond under steady seepage

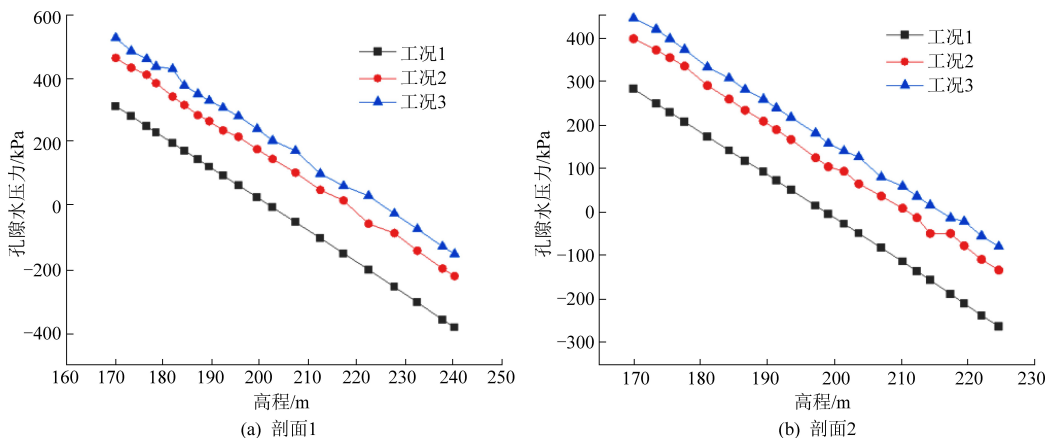


图 6 垂直剖面孔隙水压力分布

Fig.6 Pressure distribution of pore water in vertical section

通过图 6 可知,在剖面 1 处,当高程为 199.27 m 时,工况 1、工况 2、工况 3 的孔隙水压力分别为 29.43、180.69、244.08 kPa;当高程为 240.20 m 时,工况 1、工况 2、工况 3 的孔隙水压力分别为 -378.70、

-217.80、-148.49 kPa。在剖面 2 处,当高程为 169.97 m 时,工况 1、工况 2、工况 3 的孔隙水压力分别为 251.81、362.86、408.23 kPa;当高程为 223.00 m 时,工况 1、工况 2、工况 3 的孔隙水压力分别为

-272.86、-148.59、-96.36 kPa。由此可知,孔隙水压力会受到尾矿坝高度的影响,当尾矿坝高度增加时,相同位置的孔隙水压力增大。

3.2 重金属 Cu^{2+} 迁移规律分析

根据实际水质检测结果,在不考虑吸附和离子间相互作用的情况下,研究区域的重金属 Cu^{2+} 初始浓度为 50 g/m^3 。通过对尾矿库进行对流-弥散和粒子示踪模型计算,分析研究尾矿坝加高对于重金属污染物的迁移规律。根据 GeoStudio 数值模拟 2 920 d 计算结果,得出重金属 Cu^{2+} 在不同坝高下的浓度分布情况和粒子迁移路径,如图 7

和 8 所示。图 7 中粉色阴影表示 Cu^{2+} 浓度高于 40 g/m^3 ,蓝色阴影表示 Cu^{2+} 浓度低于 10 g/m^3 。

通过观察图 7 可以看出,在同一尾矿库模型中,污染物浓度沿初始浓度边界向初期坝方向逐渐降低。通过对比发现,不同坝高的尾矿库重金属污染物 Cu^{2+} 迁移的质量浓度等势分布不同,尾矿坝加高会对污染物迁移产生影响。在剖面 1 和剖面 2 处可以看出,当尾矿库深度相同时,尾矿坝越高,重金属 Cu^{2+} 浓度越大。由图 8 粒子迁移路径可知,重金属 Cu^{2+} 是随地下水沿尾矿坝方向迁移的,且随着尾矿坝的加高,污染物的迁移距离越大。

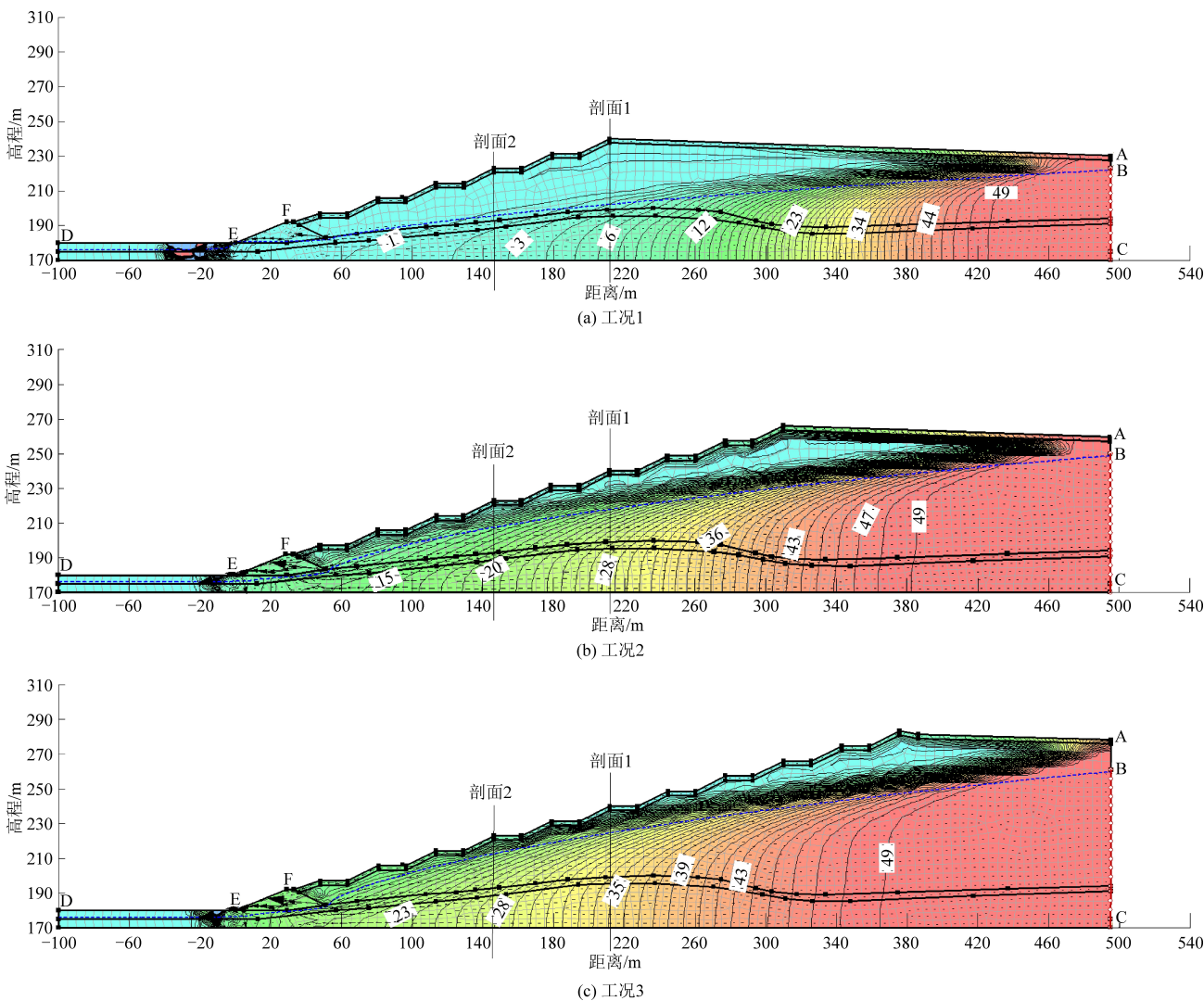
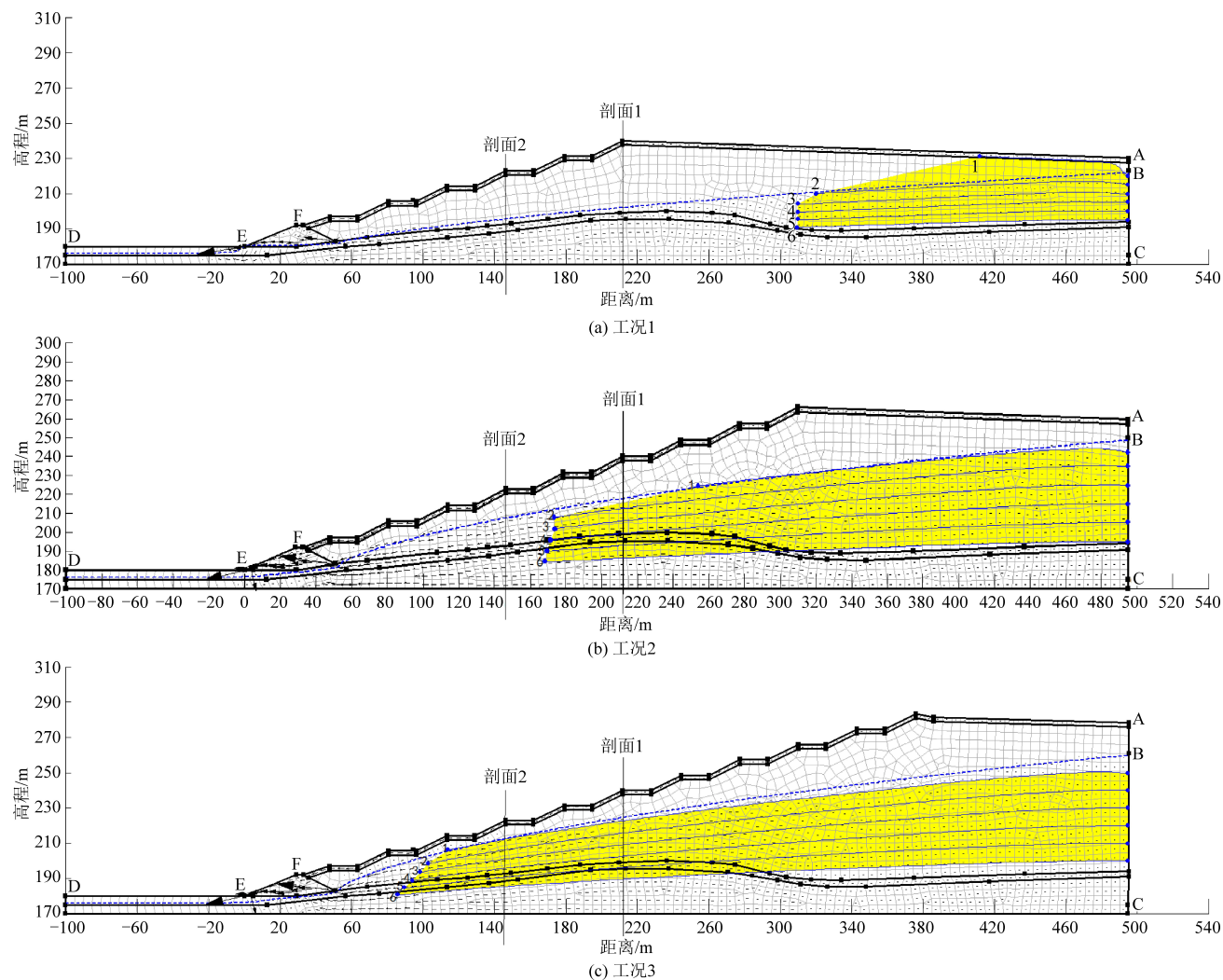
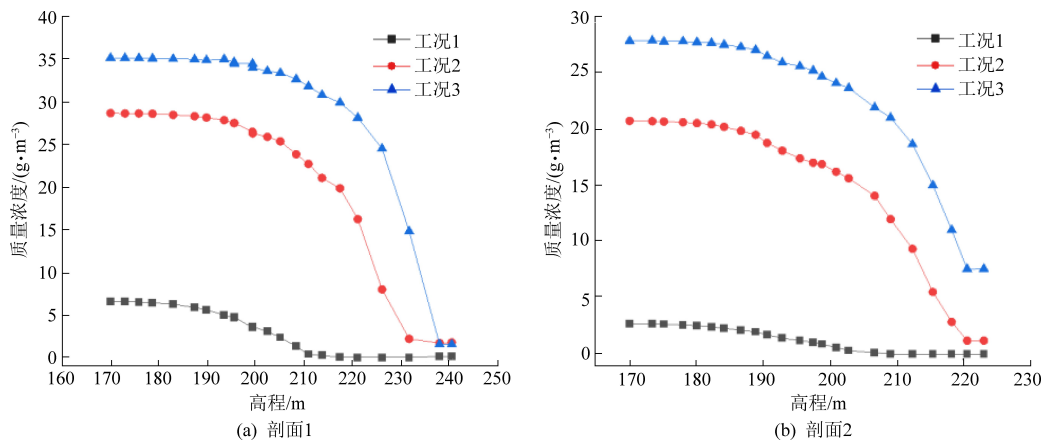


图 7 重金属 Cu^{2+} 迁移 2 920 d 浓度等势图

Fig.7 Concentration equipotential diagrams of heavy metal Cu^{2+} after migration for 2 920 days

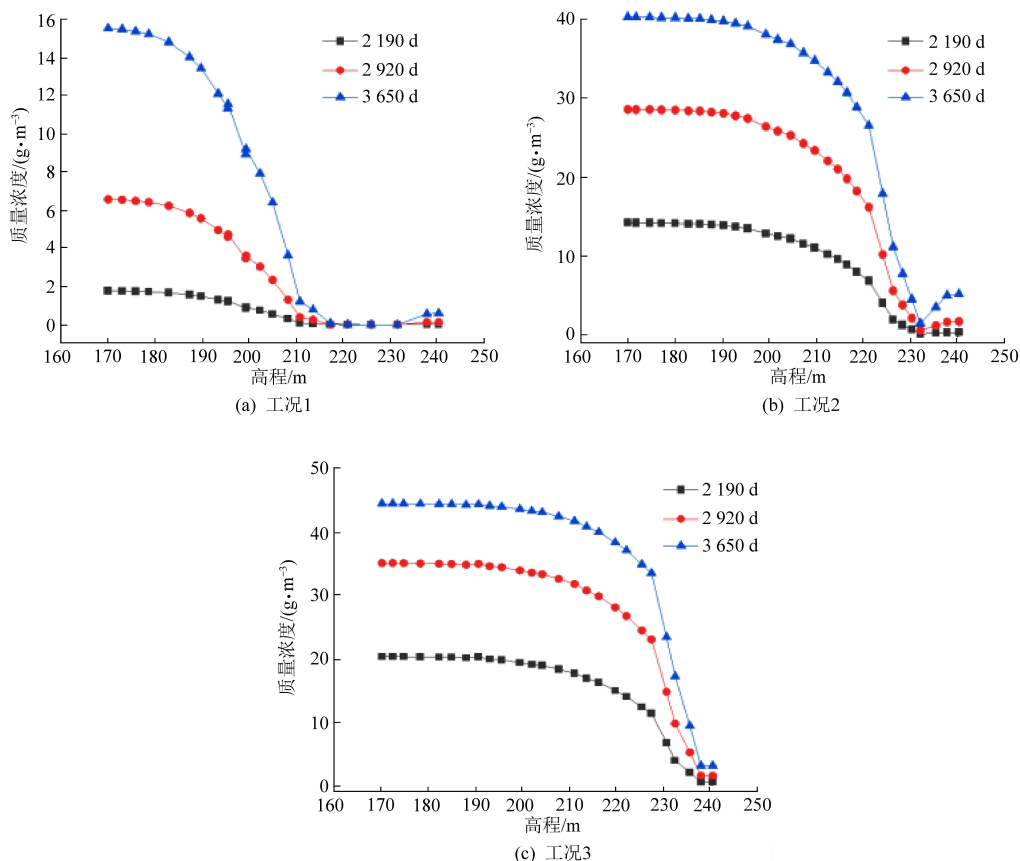
根据图 9 可知,在同一尾矿库模型中, Cu^{2+} 的质量浓度随着高程的增加而减小,尾矿库底部浓度最高,尾矿库表层浓度最低且接近于 0。在剖面 1 处,当高程为 169.97 m 时,工况 1、工况 2、工况 3 的 Cu^{2+} 质量浓度分别为 6.59、28.65、35.14 g/m^3 ;

当高程为 199.25 m 时,工况 1、工况 2、工况 3 的 Cu^{2+} 质量浓度分别为 3.63、26.27、33.97 g/m^3 。在剖面 2 处,当高程为 169.97 m 时,工况 1、工况 2、工况 3 的 Cu^{2+} 质量浓度分别为 2.72、20.72、27.83 g/m^3 ;当高程为 200.90 m 时,工况 1、工

图 8 重金属 Cu^{2+} 迁移 2 920 d 路径分布Fig.8 Path distribution of heavy metal Cu^{2+} after migration for 2 920 days图 9 垂直剖面重金属 Cu^{2+} 浓度分布 (2 920 d)Fig.9 Concentration distribution of heavy metal Cu^{2+} in vertical profile (2 920 days)

况 2、工况 3 的 Cu^{2+} 质量浓度分别为 0.59、16.20、24.08 g/m^3 。由此可见,在同一深度,经过相同的时间,尾矿坝加高会使重金属污染物

的质量浓度增大。通过图 10 可知,随着时间的推移,在同一高程位置处,污染物 Cu^{2+} 浓度呈上升趋势。

图 10 不同迁移时间下 Cu^{2+} 浓度分布 (剖面 1)Fig.10 Concentration distribution of Cu^{2+} after migration for different time (profile1)

由图 11 和图 12 可以看出,尾矿坝加高会使污染物颗粒的迁移距离和平均迁移速度增大,且尾矿坝越高,颗粒的迁移距离和平均迁移速度越大。当尾矿坝加高到工况 2 时,1~6 号颗粒在 2 920 d 内的移动距离和平均迁移速度比工况 1 时分别增加了 190.35%、84.14%、73.29%、74.95%、75.64%、76.21%;当尾矿坝加高到工况 3 时,1~6 号颗粒在 2 920 d 内的移动距离和平均迁

移速度比工况 2 时分别增加了 57.92%、21.85%、23.57%、24.10%、24.64%、25.20%。

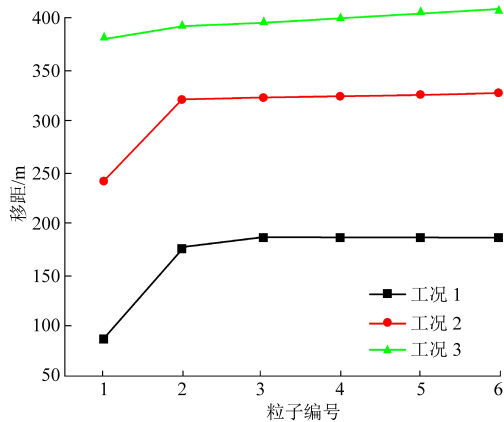


图 11 各粒子移距变化 (2 920 d)

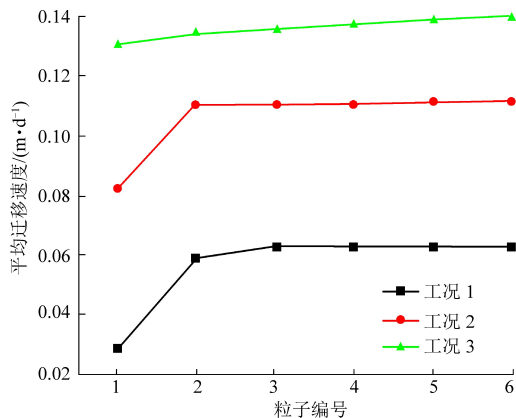


图 12 各粒子平均迁移速度变化 (2 920 d)

Fig.12 Variation of average migration velocity of each particle (2 920 days)

4 结 论

通过以歪头山尾矿库为例进行数值模拟分析,利用 GeoStudio 软件中的 SEEP/W 和 CTRAN/W 两个模块建立数值模型,研究尾矿坝加高对于

Fig.11 Displacement variation of each particle (2 920 days)

重金属 Cu^{2+} 在尾矿库中迁移范围的影响,得出以下结论:

(1)在同一尾矿库模型中,垂直方向上孔隙水压力随着尾矿库深度的增加而增大,深度每增加 1 m,孔隙水压力增加 9.77 kPa,尾矿库底部的孔隙水压力最大,尾矿库顶部的孔隙水压力最小。此外,孔隙水压力会受到尾矿坝高度的影响,当尾矿坝加高时,相同位置的孔隙水压力增大。

(2)在同一尾矿库模型中,重金属污染物浓度沿初始浓度边界向初期坝方向逐渐降低。当尾矿库深度相同时,尾矿坝加高会使重金属 Cu^{2+} 浓度增大。重金属 Cu^{2+} 是随地下水沿尾矿坝方向迁移的,且随着尾矿坝的加高,污染物的迁移距离越大。

(3)在同一尾矿库模型中, Cu^{2+} 浓度随着尾矿库的深度增加而增大,尾矿库底部浓度最高,尾矿库表层重金属浓度最低且接近于 0,且随着时间的推移,尾矿库同一深度处,污染物 Cu^{2+} 浓度呈上升趋势。重金属污染物 Cu^{2+} 经过相同时间的迁移下,尾矿坝加高会使重金属污染物的质量浓度增大。

(4)尾矿坝加高会使污染物颗粒的迁移距离和平均迁移速度增大,且尾矿坝越高,颗粒的迁移距离和平均迁移速度越大。

参考文献

- [1] 张建军. 某尾矿坝污染物迁移的数值模拟研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2007: 1-10.
- [2] 郝喆, 徐连满, 毛伟伟, 等. 矿山生态退化区修复治理关键技术研究 [M]. 辽宁: 辽宁大学出版社, 2015: 2-10.
- [3] 鲍瑞雪, 陈松, 吴超. 尾矿库重金属污染物迁移的现代数值模拟方法 [J]. 中国安全科学学报, 2010, 20 (12): 39-45.
- [4] 董凤强. 渗流对尾矿坝稳定性影响的分析 [D]. 昆明: 昆

- 明理工大学, 2011: 9-12.
- [5] 张燕, 张卉芳, 张云峰. 垃圾填埋坝渗滤液迁移数值模拟研究 [J]. 水利技术监督, 2020 (2): 162-165.
- [6] 谢学斌, 饶宝文, 罗海霞, 等. 基于改良渗透系数的尾矿库污染物运移模拟 [J]. 科技导报, 2013, 31 (27): 49-54.
- [7] 侯永莉, 曹明杰, 郝喆. 铁矿排土场不同基质改良方法下生态修复效果评价 [J]. 有色金属工程, 2020, 10 (6): 114-119.
- [8] 陈红丹, 郝喆, 滕达, 等. 降雨-蒸发与地下水耦合作用下的大型尾矿库重金属 Cu^{2+} 迁移数值模拟分析 [J]. 有色金属工程, 2021, 11 (4): 133-142.
- [9] 周泽超, 李寻, 罗跃, 等. 铜离子在尾矿库坝体中迁移数值模拟 [J]. 现代矿业, 2020, 2 (2): 199-202.
- [10] Yu Liren. Numerical simulation of flow and contaminant transport using multiple depth-averaged two-equation turbulence models in the Solimoes River near the Anama City [J]. Scientific Journal of Environmental Sciences, 2014, 3 (5): 36-48.
- [11] B O Tsydenov. Numerical simulation of the effect of wind on the transport of contaminants in the Selenga Shallow Waters of Lake Baikal during the autumnal thermal bar [J]. Moscow University Physics Bulletin, 2020, 75 (1): 81-86.
- [12] Farouk Ben Abdelghani, Michel Aubertin, Richard Simon, et al. Numerical simulations of water flow and contaminants transport near mining wastes disposed in a fractured rock mass [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2015, 25 (1): 37-45.
- [13] John Krahn. Stability Modeling With SLOPE/W [M]. Canada: GEO—SLOPE/W International Ltd, 2004.
- [14] 刘晓宇. 达西定律在地下水环境影响评价中的应用 [J]. 环境影响评价, 2019, 41 (1): 72-75.
- [15] 冯卫. 大渡河沙湾水电站尾水渠渠堤渗流场特征及稳定性分析 [D]. 成都: 成都理工大学, 2009: 22-24.
- [16] 周奇. SEEP/W 在基于非饱和土理论的公路排水设计计算中的应用 [J]. 中外公路, 2009, 29 (6): 42-46.
- [17] 作彦卿. 多孔介质渗流与污染物迁移数学模型 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 226-233.