

基于浸润线矩阵的尾矿坝稳定性分析

王飞跃, 杨锐腾, 徐志胜, 金永健

(中南大学 防灾科学与安全技术研究所, 长沙 410075)

摘 要: 由于尾矿坝的渗流边界条件极为复杂, 采用的二维简化理论分析法的计算结果有可能与实测浸润线的结果相差较大, 急需一种能较为准确预测尾矿坝浸润线位置的简易算法。在深入剖析尾矿坝浸润线影响因素的基础上, 建立了浸润线叠加影响函数, 归纳出与尾矿坝坝体特征相关的阶段影响因子, 提出反映阶段影响因子的浸润线矩阵。运用多项式回归分析浸润线观测数据, 拟合得出浸润线观测孔水位与库水位的函数曲线, 求得尾矿坝浸润线矩阵。

关 键 词: 尾矿坝; 浸润线矩阵; 稳定性分析

中图分类号: TD 221

文献标识码: A

Stability analysis of tailings dam based on saturation line matrix

WANG Fei-yue, YANG Kai-teng, XU Zhi-sheng, JIN Yong-jian

(Institute of Disaster Prevention Science & Safety Technology, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Due to the extremely complicated boundary conditions of saturation flow of tailings dam, the calculation results adopting two-dimensional simplified theory may be greatly different from the measured results. A simple accurate calculation method to forecast saturation line is needed urgently. Based on deep analysis of affecting factors of saturation line in tailings dams, the superposition influence function is established; and the saturation line matrix prediction method is brought forward to predict the saturation line. According to the daily observation of saturation line, the water level of observation well and reservoir water level curves are attained by polynomial regression analysis.

Key words: tailings dam; saturation line matrix; stability analysis;

1 引 言

尾矿库是我国重大危险源的一种类型。尾矿坝稳定性是尾矿库安全度的主要衡量指标。浸润线是影响尾矿坝稳定的一个最重要因素^[1-2], 浸润线每下降 1 m, 可使静力稳定性安全因数增加 0.05 甚至更多, 因此, 准确预测尾矿坝浸润线位置对于尾矿库安全度的正确判定具有至关重要的影响。

然而影响尾矿坝浸润线位置高低的因素较多, 精确计算尾矿坝的浸润线位置存在较大困难。目前, 常运用数值模拟、电模拟试验法或二维简化理论分析法预测浸润线位置。由于尾矿坝的边界条件十分复杂, 数值模拟^[3-4]难度大, 技术含量高, 其结果的准确与否取决于工程勘察的质量、分析人员的水平及分析软件的精度。而电模拟试验^[5]能较为精确

地预测浸润线位置, 但存在费用高、工作量大的问题。二维简化理论分析法是在对工程作适当概化的基础上采用相应的近似公式求解。前两种方法适合大型尾矿坝, 而对于中、小型尾矿坝一般采用《尾矿库安全技术规程》(以下简称规程)推荐的二维简化理论分析法^[6]。但由于各个尾矿坝的边界条件各异, 规程推荐采用的二维简化理论分析法有可能与实测浸润线的结果相差较大。因此, 急需一种易为普通工程技术人员掌握, 能较为准确预测尾矿坝浸润线位置的简易算法。

本文在深入剖析尾矿坝浸润线影响因素的基础上, 建立了浸润线叠加影响函数, 归纳出与尾矿坝坝体特征相关的阶段影响因子。分析浸润线叠加影响函数的耦合关系, 建立了浸润线观测孔水位与库水位的函数曲线, 运用多项式拟合, 求得尾矿坝浸

润线矩阵。通过浸润线矩阵, 能预测不同库水位的浸润线位置。并且通过某尾矿坝的工程实例, 说明基于浸润线矩阵的尾矿坝稳定分析方法。

2 浸润线的影响因素

影响尾矿坝浸润线位置的主要因素有库水位、初期坝坝型、堆积坝特征、坝基透水性、尾矿的分层情况、尾矿的渗透特性及沉积滩的坡度, 如图1。

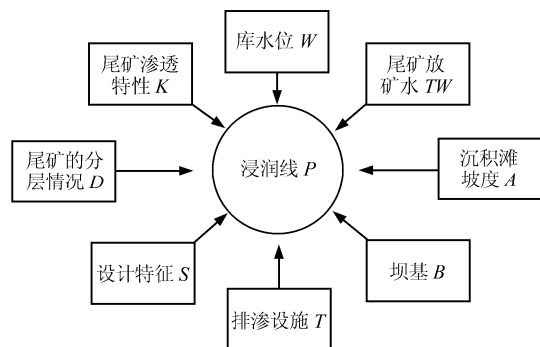


图1 浸润线影响因素

Fig.1 Influence factors of saturation line

由于尾矿渗透特性复杂, 各尾矿种类的渗透系数呈现较大差异, 尾中砂与尾矿泥渗透系数的差异达 10^4 。同时, 尾矿的垂直渗透系数与水平渗透系数间也存在较大差别。在由单一尾矿成分组成的均匀滩面上, 其比值约为 $1/2 \sim 1/10$, 在放矿不均的尾矿滩面上, 其比值可达到 $1/100$ 以上^[7]。

尾矿的渗透特性差异大, 尾矿的分层情况对浸润线的影响显著。不均匀排放尾矿, 长时间定点排放尾矿, 独管放矿及库侧放矿等均会使尾矿分层杂乱, 出现水平相对不透水层和透镜体现象。笔者参与过的尾矿库安全评价项目中, 相当部分存在尾矿排放不均匀现象, 致使浸润线情况比设计考虑的情况要高。

尾矿坝本身的设计特征对坝体浸润线位置同样影响显著, 这其中包括初期坝坝型、堆积坝高度及堆积速度。初期坝坝形密切影响着尾矿坝的浸润线特性。在同等条件下, 采用堆石坝作为初期坝的尾矿坝, 由于堆石坝起到良好的排渗作用, 相当于设置了排渗棱体, 浸润线高度明显低于土坝。当采用土坝时, 土坝筑坝材料的渗透系数与浸润线密切相关, 如图2所示^[8]。

库水位及沉积滩坡度决定了干滩长度, 尾矿坝的干滩长度对浸润线有着重要影响。当水平渗透系数为尾矿垂直渗透系数的10倍时, 浸润线随 L/H 的比值减少而迅速上升, 如图3所示^[8-9]。

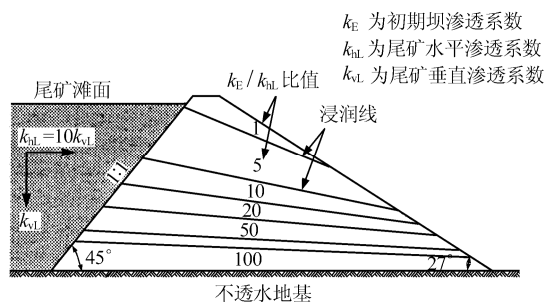


图2 使用不同筑坝材料初期坝的浸润线分布

Fig.2 Locations of saturation lines in a stream embankment

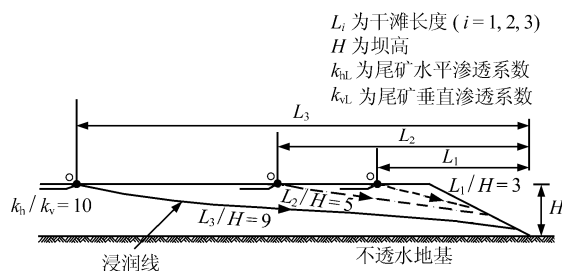


图3 干滩长度对浸润线的影响

Fig.3 Influence of beach width on saturation line

尾矿库放矿常为水力输送, 一般的尾矿排放浓度为20%左右, 用于输送的水分, 部分沿着沉积滩面向下渗透, 其影响不可忽略。据分析, 分散尾矿排放时尾矿排放水对浸润线影响的修正系数为 $0.5 \sim 0.8 h'$, h' 为考虑尾矿排放水影响与不考虑尾矿排放水影响时的浸润线之差^[3]。规程^[2]通过化引滩长及化引库水位考虑尾矿放矿水的影响。对于干滩为100 m, 干滩坡度为2%, 放矿水覆盖绝大部分滩面的尾矿坝, 其化引滩长为30.1 m, 相当于将库水位提高了1.4 m。

为降低尾矿坝浸润线高度, 常在尾矿堆积坝设置排渗设施, 主要型式有水平排渗层、盲沟排渗、水平管排渗及辐射井等^[10-11]。排渗设施的型式、完好情况对浸润线位置有显著影响。不同的排渗形式有相应的简化计算公式计算其排渗能力。但使用过程中, 排渗设施实际排渗效果取决于其完好情况, 定量分析其对尾矿坝的影响难度较大。

坝基透水层深度、渗透特性及基底形状均影响浸润线位置^[12-14]。当尾矿坝处于岩溶地区时, 边界条件就更为复杂了。

总的来说, 尾矿坝坝体浸润线主要是由以上几个方面叠加影响, 其函数表达式可写成下式:

$$H_p = f(x, W, k, D, S, T, B, A, TW) \quad (1)$$

式中: H_p 为浸润线高度; x 为横坐标; W 为库水位影响因子; k 为尾矿渗透特性影响因子; D 为尾矿

分层影响因子; S 为设计特征影响因子; T 为排渗设施影响因子; B 为坝基影响因子; A 为沉积滩坡度; TW 为放矿水影响因子。

对于某一筑坝阶段的尾矿坝、尾矿渗透特性、尾矿分层、坝基、设计特征、排渗设施、沉积滩坡度及放矿方式都是一定的。

令 $P = P(k, D, S, T, B, A, TW)$ 为阶段影响因子。在某一堆积坝高情况下, 阶段影响因子 P 为一固定形式函数。

则 $H_p = f(x, W, P(k, D, S, T, B, A, TW))$, 就与横坐标 x 、库水位 W 、阶段影响因子 $P(k, D, S, T, B, A, TW)$ 有关。

因此, 当横坐标 x 为一常数时, 浸润线高度 H_p 、库水位 W 及阶段影响因子 P 存在耦合关系。

3 浸润线矩阵

对于 30 m 以上的尾矿坝, 均要求设置浸润线观测孔。浸润线观测孔水位随库水位变化情况可用函数式表达为

$$\left. \begin{aligned} H_p &= f(x, W, P(k, D, S, T, B, A, TW)) \\ x &= c (c \text{ 为常数}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

采集日常浸润线孔水位观测数据, 建立各观测孔地下水高度与库水位散点图, 如图 4。

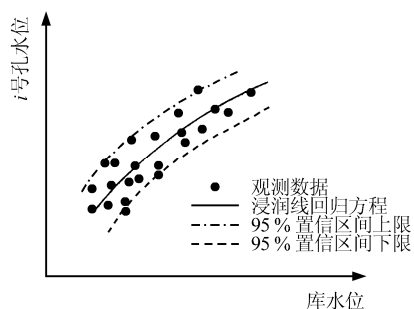


图 4 第 i 号孔水位与库水位相关曲线示意图

Fig.4 Relation curves between reservoir water level and hole No. i water level

应用多项式线性回归, 对上述曲线进行拟合, 求出对应方程。

$$H_i = K_{i1}W^n + \dots + K_{ij}W^{n-1} + \dots + K_{in}W + K_{i(n+1)} \quad (3)$$

式中: W 为尾矿库库水位; H_i 为第 i 号浸润线观测孔水位; $i=1, 2, \dots, m$, 其中 m 为浸润线观测孔的数目; K_{ij} 为多项式系数, $j=1, 2, \dots, n+1$, 其中 n 为拟合采用的多项式阶数写成矩阵形式

$$\begin{Bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \dots \\ \dots \\ H_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & \dots & K_{1n} & K_{1(n+1)} \\ K_{21} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & K_{ij} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{m1} & \dots & \dots & \dots & K_{mn} & K_{m(n+1)} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} W^n \\ W^{n-1} \\ \dots \\ \dots \\ W \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

令

$$\{K\} = \begin{Bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & \dots & K_{1n} & K_{1(n+1)} \\ K_{21} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & K_{ij} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{m1} & \dots & \dots & \dots & K_{mn} & K_{m(n+1)} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

本文把 $\{K\}$ 称为浸润线矩阵。它反映了阶段影响因子 P 对尾矿坝浸润线的影响。依据浸润线矩阵, 能求得任意库水位的浸润线。

由于尾矿坝浸润线位置是影响坝体稳定性的重要因素, 浸润线的预测应按最不利情况考虑。因此, 在求得浸润线回归曲线基础上, 运用其 95% 置信区间上限曲线, 进行多项式拟合, 得出浸润线预测矩阵。在稳定性分析时, 采用浸润线预测矩阵预测浸润线位置, 如图 4 所示。

基于浸润线矩阵尾矿坝稳定性分析框图如图 5 所示。

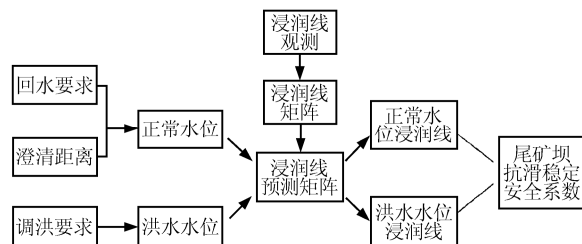


图 5 基于浸润线矩阵的稳定性分析框图

Fig.5 Stability analysis diagram based on saturation line matrix

4 工程算例

4.1 工程概况

某尾矿坝初期坝为堆石坝, 坝高为 18 m, 堆积坝坝高为 17.6 m, 堆积边坡总体坡比为 1: 3。因此, 尾矿坝总坝高为 35.6 m, 属于 4 级库。尾矿分层如图 6 所示。

依据该尾矿坝的工程勘察报告, 尾矿坝的物理力学指标如表 1。

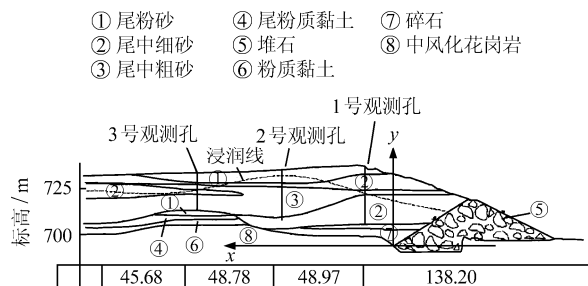


图6 某尾矿坝横剖面图

Fig.6 Profile of a tailing dam

表1 尾矿坝物理力学指标

Table 1 Physico-mechanical properties of tailings dam

土类	天然重度 (kN/m ³)	承载力 特征值 /kPa	抗剪强度			渗透系数 /(cm/s)
			内摩擦角/(°)		凝聚力 /kPa	
			水上	水下		
堆石	17.5	3.04	34	32	0	1.8×10^{-2}
尾粉砂	20.0	100	20	18	0	4.2×10^{-4}
尾中细砂	21.0	200	22	20	0	7.6×10^{-3}
尾中粗砂	19.1	320	25	23	0	1.0×10^{-2}
尾粉质黏土	19.2	120	16	14	10	3.0×10^{-6}
人工填土	22.0	90	22	20	3	2.4×10^{-3}
粉质黏土	19.5	210	25	23	20	8.9×10^{-7}
碎石	22.5	280	32	30	0	1.8×10^{-2}
中风化花岗岩	26.2	3500				

4.2 浸润线矩阵的计算

采集日常观测尾矿坝浸润线数据, 把各观测孔的数据绘制在坐标图上, 浸润线观测孔 i 的观测数据如图7。运用多项式回归分析, 对观测数据进行曲线拟合, 得出该尾矿坝的浸润线矩阵:

$$\begin{Bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -0.154\ 57 & 12.569\ 08 & -224.832\ 89 \\ -0.110\ 89 & 9.405\ 94 & -158.769\ 85 \\ -0.013\ 84 & 1.807\ 57 & 17.964\ 98 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} W^2 \\ W \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

对95%置信区间上限曲线进行多项式拟合, 求得浸润线预测矩阵:

$$\begin{Bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -0.146\ 69 & 11.977\ 34 & -213.650\ 85 \\ -0.101\ 28 & 8.683\ 9 & -145.125\ 37 \\ -0.005\ 06 & 1.148\ 5 & -5.510\ 31 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} W^2 \\ W \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

根据该库多年的运行经验, 澄清距离保持在200 m以上能同时满足环保要求及矿山回水的要求, 此澄清距离对应的正常水位的 Y 坐标为37.9 m。经调洪演算得200年一遇洪水期间的库水位 Y 坐标为40.9 m。运用浸润线预测矩阵计算正常水位及洪水水位的浸润线位置, 计算结果如表2。

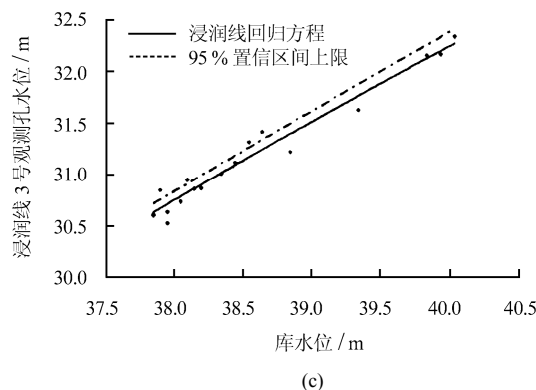
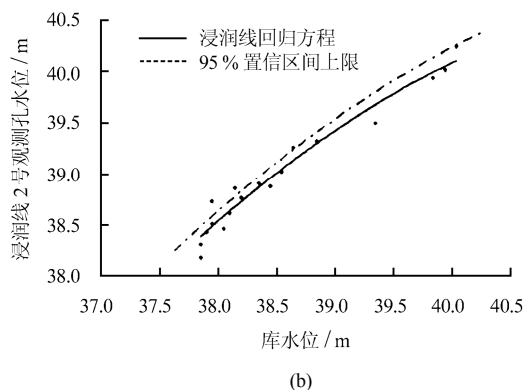
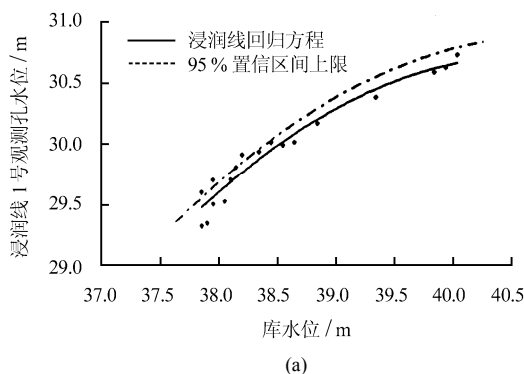


图7 浸润线观测数据

Fig.7 Monitor data of saturation line

由于放矿水的影响致使3号观测孔的水位低于2号孔。偏安全考虑, 使用2号孔水位与水边线之间采用对数曲线相连, 作为计算浸润线。

表2 浸润线计算结果

Table 2 Prediction results of saturation line

水位	浸润线观测孔编号		
	1	2	3
正常水位/m	29.60	38.52	30.74
洪水水位/m	30.84	40.62	32.99

依据规程^[6]第5.3.18条及5.3.19条, 尾矿库稳定性计算可采用简化毕肖普法与瑞典圆弧法进行比较, 可参照《碾压式土石坝设计规范》有关规定选

用两种方法各自的最小安全系数。因此,采用瑞典圆弧法及毕肖普简化法分析该尾矿坝的稳定性,稳定性分析结果见表3。

表3 稳定性评价结果
Table 3 Results of stability analysis

运行状态	计算方法	抗滑安全系数		规范要求		结论
		瑞典法	毕肖普法	瑞典法	毕肖普法	
正常运行	总应力法	1.22	1.373	1.15	1.3	稳定
洪水运行	总应力法	1.13	1.235	1.05	1.2	稳定

4.3 应用建议

1) 由于浸润线矩阵是采用了回归分析方法拟合所得,需要一定量的观测数据才能满足精度要求。因此,至少要经过一个汛期的浸润线密切观测,才能得到较为满意的结果。

2) 浸润线矩阵采用了多项式拟合。次数高的多项式波动大,很不稳定,建议采用2阶多项式。当相关关系必须用次数很高的多项式回归才能得到满意的结果时,应将库水位的范围划分为若干段,分段采用低阶多项式拟合。

5 结 语

(1) 尾矿库是我国重大危险源的一种类型,尾矿坝的稳定情况关系到下游人民的生命财产安全。尾矿坝的浸润线情况与坝体稳定性息息相关。准确预测尾矿坝浸润线位置才能准确评价尾矿坝的坝体稳定性。

(2) 尾矿坝浸润线的影响因素十分复杂,包括库水位,初期坝坝型、堆积坝特征、坝基透水性、尾矿的分层情况、尾矿的渗透特性,沉积滩的坡度几个主要方面,因此,难以求得准确的解析解。

(3) 通过采集日常的浸润线观测数据,建立浸润线矩阵,应用简单的数学运算,便能预测不同库水位的浸润线位置。同时,本方法可用于实测浸润线数据与计算浸润线偏差较大的情况,可通过浸润线矩阵预测洪水位的浸润线,解决洪水工况的稳定性验算问题。

参 考 文 献

- [1] 祝玉学,戚国庆. 尾矿库工程分析与管理[M]. 北京:冶金工业出版社,1999.
- [2] 胡明鉴,郭爱国,陈守义. 某上游法尾矿坝抗滑稳定性分析的几点思考[J]. 岩土力学,2004,25(5):769-773. HU Ming-jian, GUO Ai-guo, CHEN Shou-yi. Reflections on anti-slide stability analysis of a gangue dam[J]. **Rock and Soil Mechanics**,2004,25(5):769-773.
- [3] 尹光志,余果,张东明,等. 细粒尾矿库地下渗流场的

数值模拟分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2005,28(6):81-83.

YIN Guang-zhi, YU Guo, ZHANG Dong-ming, et al. Numerical calculation analysis about saturation field of fine grained tailings Pool[J]. **Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)**, 2005, 28(6): 81-83.

- [4] 路美丽,崔莉. 复杂地形尾矿坝的三维渗流分析[J]. 岩土力学,2006,27(7):1176-1180. LU Mei-li, CUI Li. Three-dimensional saturation analysis for complex topographical tailings dam[J]. **Rock and Soil Mechanics**,2006,27(7):1176-1180.
- [5] 速宝玉,赵坚,张祝添,等. 正置模型在尾矿坝空间渗流场电模拟试验中的应用[J]. 金属矿山,1994,(3):27-29. SU Bao-yu, ZHAO Jian, ZHANG Zhu-tian, et al. Application of positive position model in the electronic simulation test of the spacial infiltration flow field of tailings dams[J]. **Metal Mine**, 1994, (3): 27-29.
- [6] 国家安全生产监督管理总局. AQ2006-2005 尾矿库安全技术规程[S]. 北京:煤炭工业出版社,2006.
- [7] VICK S G. Planning, Design and analysis of tailings dams[M]. New York: John Wiley & Sons, 1983.
- [8] SARSBY R. Environmental geotechnics[M]. London: Thomas Telford, 2000.
- [9] WITT K J, SCHÖNHARDT M. Tailings management facilities - risks and reliability[R]. UK: Report of the European RTD Project, 2004.
- [10] 蒋卫东,李夕兵,邱更生. 银山铅锌矿尾矿坝浸润线最大Lyapunov指数分析[J]. 金属矿山,2003,(4):43-45. JIANG Wei-dong, LI Xi-bing, QIU Geng-sheng. Analysis of the largest Lyapunov exponent of the saturation line of tailings dam of Yinshan lead-zinc mine[J]. **Metal Mine**, 2003, (4): 43-45.
- [11] 蒋卫东,李夕兵. 尾矿坝浸润线时空混沌模型及反分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2003,34(6):704-707. JIANG Wei-dong, LI Xi-bing. Spatiotemporal chaos model of saturation line in tailings dam and its back analysis[J]. **Journal of Central South University of Technology (Natural Science)**, 2003, 34(6): 704-707.
- [12] 陈守义. 浅议上游法细粒尾矿堆坝问题[J]. 岩土力学,1995,16(3):70-76. CHEN Shou-yi. Some superficial views on the problem of building fine grain tailings fill dams by means of up-stream method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1995, 16(3): 70-76.
- [13] 魏作安. 细粒尾矿及其堆坝稳定性研究[D]. 重庆:重庆大学,2004.
- [14] 路美丽,崔莉. 复杂地形尾矿坝的三维渗流分析[J]. 岩土力学,2006,27(7):1176-1180. LU Mei-li, CUI Li. Three-dimensional seepage analysis for complex topographical tailings dam[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(7): 1176-1180.