

文章编号:1000-582X(2009)03-0308-06

# 模型试验与数值模拟对尾矿坝稳定性综合预测

敬小非<sup>a,b</sup>, 尹光志<sup>a,b</sup>, 魏作安<sup>a,b</sup>, 黄 滚<sup>a,b</sup>

(重庆大学 a. 资源及环境科学学院; b. 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400030)

**摘 要:**为探析设计中的小打鹅尾矿坝在未来运行中的稳定性,遂以小打鹅尾矿库设计资料为依据,采用尾矿坝堆坝物理模型试验方法模拟了该尾矿坝堆积的全过程,探析尾矿颗粒在库内的分布与沉积特征、坝体浸润线的埋深及变化规律,在此基础上运用 ANSYS 非线性软件对该尾矿坝在正常运行和洪水运行两种工况条件下进行数值模拟,综合预测了尾矿坝在未来运行中的稳定性。结果表明:堆坝初期干滩面较短;堆坝中后期浸润线埋深基本保持在 6~10 cm 下相对稳定的位置;水流对尾矿的分选作用不很明显,在库水位置尾矿出现明显细化现象;正常运行下坝体是稳定的,洪水情况下坝体浸润线偏高、受力较大,相对比较危险,必须采取相应排渗措施。

**关键词:**尾矿坝;模型试验;数值模拟;稳定性预测

中图分类号:TD853.34

文献标志码:A

## Model test and numerical simulation of tailing dam safety forecasting

JING Xiao-fei<sup>a,b</sup>, YIN Guang-zhi<sup>a,b</sup>, WEI Zuo-an<sup>a,b</sup>, HUANG Gun<sup>a,b</sup>,

(a. College of Resources and Environmental Science;

b. The Key Laboratory of Exploitation of Southwestern Resources and Environmental Hazard Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** To explore the safety of dam in future operation, we study the stability of Xiaodae tailing dam, Sichuan Province, P. R. China, via model testing and numerical simulation according to preliminary dam design information. The results show that the deposited beach length initially is shorter and the depth of the saturation line in a tailing dam is relative shallow. The length of deposited beach is relatively long in the middle and later periods, and the saturation line maintains a relatively stable position. The numerical simulation shows that horizontal dam displacement is 0.68 m and the greatest vertical displacement is 3.44 m at the dam vertices when the dam reaches the designed elevation. Meanwhile, the dam possesses normal stability. The largest shear stress in flooding exceeds that of normal conditions and the dam saturation line is higher. Unless measures are taken, these conditions will influence dam security.

**Key words:** tailing dam; safety forecasting; model test; numerical simulation

尾矿库是一种特殊的工业建筑物,也是矿山三大控制性工程之一。纵观国内外研究资料,国外主

要研究尾矿库工程对周围环境的影响<sup>[1-6]</sup>,对尾矿库的稳定性研究甚少。而在中国由于尾矿库工程失效

收稿日期:2008-11-19

基金项目:国家重点基础研究发展 973 计划资助项目(2005cb221502);国家自然科学基金资助项目(50874124);国家自然科学基金重点资助项目(50534080);重庆市自然科学基金计划重点资助项目(CSTC,2008ba6028)

作者简介:敬小非(1983-),男,重庆大学博士研究生,主要从事矿业工程和土力学方面的研究。

尹光志(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(Tel)023-65111228;(E-mail)gzyin@cqu.edu.cn。

欢迎访问重庆大学期刊社 <http://qks.cqu.edu.cn>

造成严重灾害的事例屡见不鲜<sup>[7]</sup>,为此,中国投入了大量财力和物力用于尾矿库工程安全技术方面的研究,包括尾矿库(坝)的稳定性评价、筑坝工艺与技术研究等,以确保尾矿库安全运行。按照设计规划,小打鹅尾矿库尾矿坝总高185 m(初期坝72.5 m,堆积坝115.0 m)这个堆坝高度目前在国内外矿山中都比较少见,因此,按照规范必须对其稳定性和可靠性进行系统研究。

模型试验即保持工作规律相似的模型试验,它能够直观地、清晰地将物理现象展现在研究者面前,作为工程科学研究的一种重要手段,已被广泛应用于许多领域<sup>[8-12]</sup>,而计算机数值模拟分析能定量的分析尾矿坝受力、变形情况,为此,将数值模拟分析与模型试验相结合,充分发挥各自的优势,提高了尾矿坝稳定性分析正确性。当然,由于经济等诸多方面原因,通过堆坝物理模型试验来研究尾矿坝的几乎没有,相应的文献资料也少之又少。

## 1 小打鹅尾矿库工程概况

小打鹅尾矿库位于凉山自治州小打鹅沟,属山谷型尾矿库,沟谷大致呈北南向,沟谷狭长,呈“V”形,库底宽约10~25 m;纵坡较陡,平均坡降 $J=0.17$ 左右。沟谷植被较一般,均为荒山和坡地,如图1所示。



图1 小打鹅沟库区地形地貌

小打鹅尾矿库初期坝采用堆石坝的形式,初期坝顶标高1240 m,坝高72.5 m(不考虑清基),上游坡比为1:1.75,下游坡比为1:2.0,每升高15 m设置宽度为1.5 m的马道,初期坝内有效库容为 $1.46 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,满足选厂使用年限约1.2年的要求。尾矿库采用上游法筑坝,放矿方式为坝顶分散放矿。尾矿库从坝顶标高1240 m起开始利用尾矿堆坝,堆坝坡比1:4.0,最终堆坝标高1355 m,堆坝高115 m。尾矿库总坝高185 m,最终设计有效库容 $979 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,能满足选厂使用7.4年。

## 2 模型试验及结果分析

### 2.1 试验研究内容

试验研究内容主要有:1)以小打鹅尾矿库的设计资料为蓝本,按照1:200的比尺缩小,模拟该尾矿库(坝)的堆积全过程,并测试其稳定性;2)研究设计中的小打鹅尾矿库库内颗粒的分布与沉积特征、坝体浸润线的埋深及变化规律。

### 2.2 模型试验参数确定

物理模型试验必须保持工作规律相似,以小打鹅尾矿坝的设计资料为蓝本,根据相似第三定律<sup>[13]</sup>,计算出堆坝模型试验参数(见表1)。

表1 相似模型比例系数

相似物理量	模型试验参数	相似比尺
长度/m	5.10	1:200
体积/ $\text{m}^3$	3.30	1:200 <sup>3</sup>
速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	9.87	1:14.1
体积流量/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	435.80	1:200 <sup>5/2</sup>
重力加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	9.80	1:1

### 2.3 模型试验装置和材料

模型试验装置主要分为4部分:试验沟槽、放矿系统、地下水位测量系统、排水系统。考虑到能够清晰观察地下水位变化情况,水位管采用规格为 $\Phi 5 \text{ mm}$ 的透明钢化玻璃管,与测压管连通,并预先在地下水位管内滴入少许煤油,以观察水位变化情况;放矿主管选用规格为 $\Phi 75 \text{ mm}$ 的塑胶管并与放矿支管连接;排水系统均选用规格为 $\Phi 50 \text{ mm}$ 的塑胶管,并事先将排水井钻孔并用土工布缠绕。小打鹅尾矿库的库区谷底标高1139.00~1264.00 m,高差120 m,谷底坡度为 $8^\circ \sim 10^\circ$ ,按1:200的比尺缩小,则试验沟槽外形尺寸为 $7 \text{ m} \times 2.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),试验沟槽材料选用与小打鹅沟地质条件类似的粘土。整个模型试验装置如图2所示。



图2 模型试验装置

小打鹅尾矿库堆坝物理模型试验的尾矿材料来源于会理县马鞍坪矿山废石综合利用有限公司采用拉拉铜矿原露天采场废弃的废石作为原料,回收以铜为主的矿产资源而剩下的矿渣<sup>[14]</sup>,其颗粒组成见表 2。

表 2 堆坝尾矿的颗粒组成

粒径/mm	小打鹅尾矿/%
>0.482	7.0
0.482~0.334	20.0
0.334~0.204	38.0
0.204~0.083	27.0
<0.083	8.0

## 2.4 试验结果分析

首次采用堆坝模型试验方法动态模拟尾矿库(坝)堆积全过程,探析了尾矿颗粒在库内的分布与沉积特征、坝体浸润线的埋深及变化规律,取得了很好的效果,并得到了以下结果。

### 2.4.1 干滩面长度与坡度变化规律

在堆坝试验期间,观测干滩面长度变化情况发现:其变化范围介于 23~110 cm 之间。由图 3(a)可知,堆坝初期干滩面较短,基本介于 23~35 cm 范围内,此阶段库区沟谷坡度较陡,纵向轴线长度短,垂高相同情况下有效库容小,使得库水抬升快,阻挡了尾砂向库内流动;堆坝中后期随着坝体升高,库区地形开阔,纵向轴线长度变长,库水抬升较慢,尾砂流动相对较远,干滩面长度相应增长,基本在 74~110 cm 之间变化。

而干滩面坡度的变化情况为:从排放口到库水位置(干滩面)矿浆流动比较均匀,形成的坡面坡度相对比较平缓,遇到库水后,矿浆流动速度骤减,造成的坡面坡度较陡,如图 3(b)。

### 2.4.2 浸润线变化规律

在试验槽内沿尾矿库的纵向主剖面位置预先埋设了 7 根地下水位测量管(如图 4),根据不同堆坝时期对水位的测量得出了地下水位测量管内水位变化情况,绘制成浸润线,如图 5。从图中可以看出,浸润线随着坝体升高而上升,但不同堆坝时期浸润线的上升速率有所不同。尾矿库运行初期浸润线上升速率较快,埋深较浅,但并不发生库水从坝面溢出现象;运行中后期,随着坝体升高,干滩面相应增长,但浸润线上升速率有所减小,埋深逐渐增大,基本保持在 6~10 cm 以下,这对坝体稳定非常有利。当坝

高超过 65 cm 后,随着堆坝的进行,浸润线高度变化极小,基本保持在 59 cm 左右。



(a)形成的干滩面与库水全貌



(b)无水干滩面全貌

图 3 尾矿库堆坝图

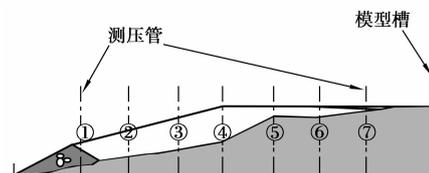


图 4 测压管分布示意图

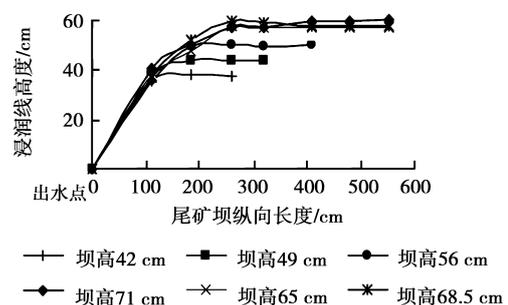


图 5 浸润线位置变化图

### 2.4.3 干滩面尾矿颗粒分布规律

堆坝试验期间,分别在干滩面长度为 80、140、180 cm 时沿尾矿库的纵向取样,并在堆坝试验完成后沿尾矿坝主剖面垂向取样,经过分析得出了尾矿库内尾矿颗粒分布规律及沉积特征,如图 6、7 所示。从图 6 可以看出,水流对尾砂的分选作用不是很明显,在干滩面长度为 120 cm 范围内,平均粒径无较大变化,基本为 0.25 mm 左右的粗颗粒,在 120~180 cm 范围内基本是粒径为 0.089 mm 的细

小颗粒,干滩面较短可能是造成分选不明显的主要原因;在尾矿坝纵向 120~180 cm 范围内为放矿库水位置,矿浆碰到库水的阻挡后,流动速度骤减,尾矿出现细化现象,此段基本为细小颗粒。从图 7 可以看出,垂向上从上到下尾矿粒径由粗变细基本呈线性分布,分层较明显。通过库内尾矿颗粒分布与沉积特性分析,可以对尾矿的物理力学特性进行全面的了解<sup>[15]</sup>。

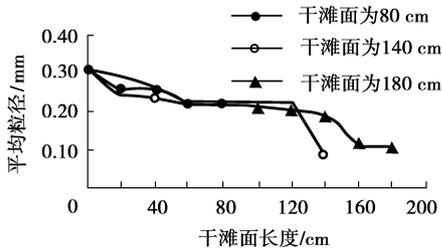


图 6 平均粒径沿干滩面的变化规律曲线

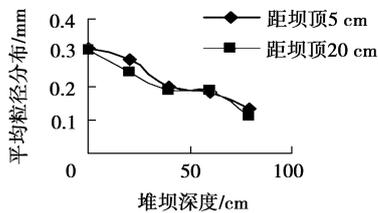


图 7 平均粒径沿堆坝深度的变化规律曲线

### 3 尾矿库(坝)数值模拟结果与分析

通过堆坝模型试验,得到了尾矿颗粒在库内的分布与沉积特征、坝体浸润线的埋深及变化规律,但并不清楚尾矿坝在正常运行和洪水运行下坝体各处的受力和变形情况,为了了解尾矿坝在各种工况运行下最易破坏的区域,对尾矿坝进行了数值模拟分析。

#### 3.1 模型建立与参数选取

根据现场实际情况,尾矿坝问题可简化为平面应变问题,拟选择尾矿坝的纵向主剖面进行计算分析并确定出模型的几何尺寸;根据以往所做类似工程的有限元数值分析实例,再结合现场实际情况定边界条件。计算模型材料共分 4 种,即:基岩(坝基)、堆石体(初期坝)、尾粉土和堆积坝中的尾粉砂(子坝)。本构模型采用已被广泛应用于土坝和地基等土工问题的邓肯(Duncan)和张(Chang)双曲线模型<sup>[16]</sup>。则整个尾矿坝计算模型如图 8 所示。材料的物理力学参数是根据该尾矿的室内土工实验测试

结果,参照有关尾矿和堆石坝等相关资料,综合分析后,确定出各材料的计算参数,见表 3。

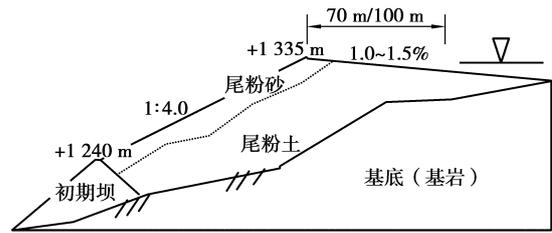


图 8 坝体的几何模型

表 3 材料参数一览表

材料	密度 $\rho$ /( $g \cdot cm^{-3}$ )	粘结力 $C$ /(kPa)	内摩擦角 $\varphi$ /( $^{\circ}$ )	杨氏模量 $E$	体积模量 $K$	泊松比
尾粉砂	1.93	10.80	30.1	37.0	35.5	0.38
尾粉土	1.98	11.29	25.5	32.0	30.0	0.39
初期坝	2.20	0	34.0	42.0	46.0	0.28
基底	2.30	10.00	38.0	220.0	260.0	0.25

#### 3.2 数值计算结果与分析

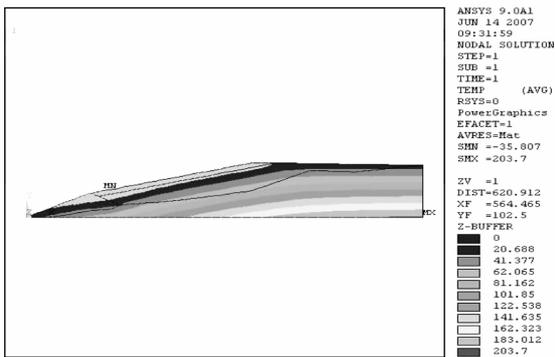
考虑到地下水的作用,在数值模拟计算中采用流-固耦合方式来计算,即先计算渗流场(2 种情况,一是洪水情况(干滩面为 70 m,规范规定最小长度),二是正常情况(按照 100 m)),然后把渗流场叠加到土体应力中,计算出尾矿坝在洪水情况和正常情况两种条件下浸润线位置、最大剪应力和最大位移区域,如图 9 示。

分析计算结果可以知道:

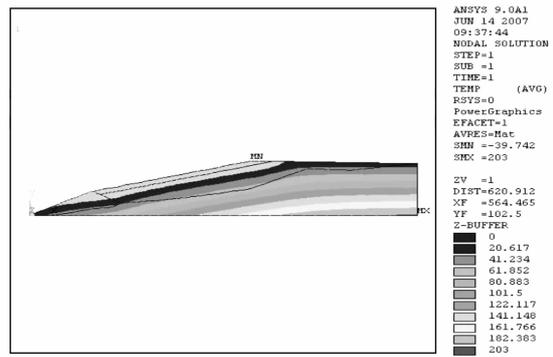
1)尾矿坝在洪水情况下的浸润线埋深为 9.7 m,尾矿坝在正常情况下的浸润线埋深在 20.5 m 左右。显然在洪水情况下浸润线埋深比正常情况下高,这个高度对尾矿坝的稳定十分不利。

2)坝体的位移在水平方向不大,最大约为 0.68 m,方向向着坝外坡;垂直方向的位移较大,最高点(即坝顶处)最大达到 3.44 m,说明尾矿的压缩性比较大,沉降比较明显。

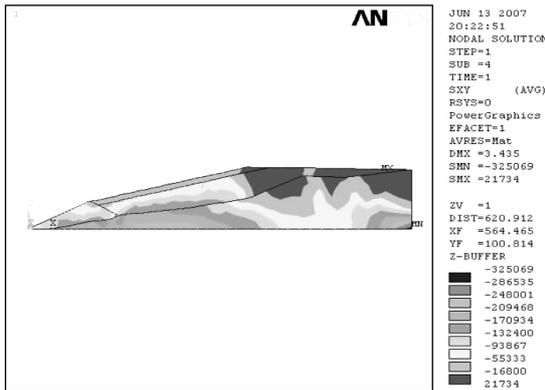
3)尾矿坝在正常运行情况下的最大位移为 3.435 m,在洪水情况下的最大位移为 3.439 m,说明地下水对坝体位移影响较小;洪水情况下的最大剪应力比正常情况下增大了近 7%,说明地下水对坝体应力有一定影响。所以,从保证坝体稳定而言,应该采取有效排渗措施,尽量降低地下水位。



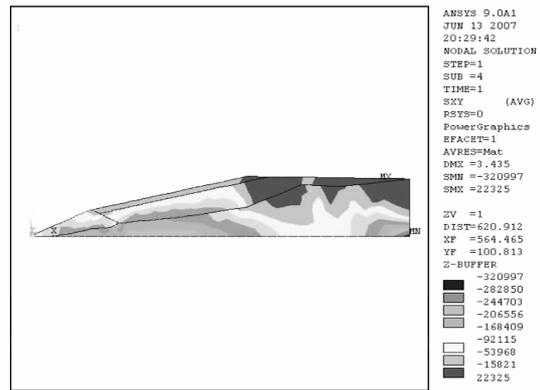
(a) 洪水情况下 (70 m干滩面) 地下水水位线



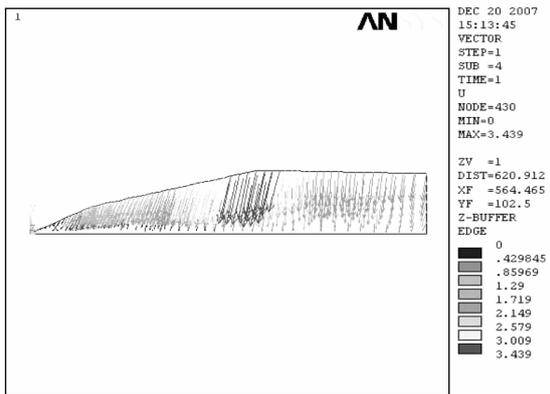
(b) 正常情况下 (100 m干滩面) 地下水水位线



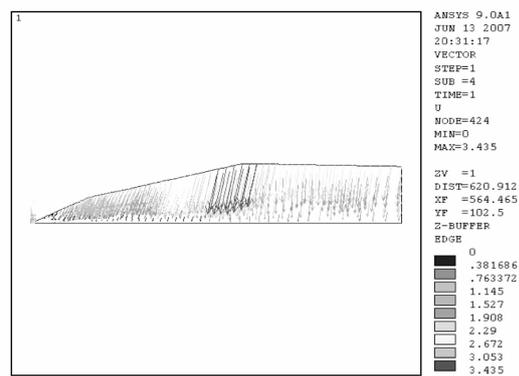
(c) 洪水情况下坝体剪应力分布云图



(d) 正常情况下坝体剪应力分布云图



(e) 洪水情况下坝体总位移矢量图



(f) 正常情况下坝体总位移矢量图

图 9 尾矿坝在洪水情况和正常情况下的浸润线位置、最大剪应力和最大位移图

### 4 结论与讨论

以小打鹅尾矿坝稳定性研究为实例,通过综合分析,取得了很好的效果,并得出了以下结论:

- 1) 该次室内模型试验是国内首次采用堆坝模型试验动态模拟尾矿坝堆筑过程,试验成果仅供该工程设计和施工参考。
- 2) 堆坝初期干滩面相对较短,水流对尾矿的分

选作用不是很明显,且在库水位置尾矿出现明显细化现象,基本为细小颗粒,中后期干滩面长度满足国家规范要求;

- 3) 浸润线高度随着坝体升高而上升,但不同堆坝时期浸润线的上升速率有所不同。当坝高超过 65 cm 后,随着堆坝的进行,浸润线高度变化极小,基本保持在 59 cm 高度左右。
- 4) 由于水流的分选作用以及不同粒径颗粒沉积

特性,尾矿在库内水平方向分布不是很均匀,在垂直方向分布也不均匀。

5)地下水对坝体位移影响较小,但对坝体应力有一定影响;尾矿坝在正常情况下是稳定的,在洪水运行情况下,浸润线偏高,在设计施工中应该采取有效排渗措施,尽量降低地下水位。

采用模型试验与数值模拟相结合的研究手段综合预测了尾矿坝未来运行的稳定性,取得了很好的效果,试验成果可供该工程设计和施工参考。在研究过程中也遇到了诸多问题,例如:在模型试验前,按照相似准则计算的流速、流量等参数,在试验过程中不能够精确的实现;在数值模拟中,坝体材料的模拟情况不能精确的按照堆坝模型试验所得的颗粒分布数据来设定等。如何将物理模型试验与数值模拟更好地结合,提高稳定性分析的精确性,值得进一步探索。

#### 参考文献:

- [1] GOMEZ G, BAOS R, GOMARA B, et al. Influence of a mine tailing accident near doñana national park (Spain) on heavy metals and arsenic accumulation in 14 species of waterfowl[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2004, 47(4): 521-529.
- [2] MILTON A, COOKE J A, JHONSON M S. A comparison of cadmium in ecosystems on metalliferous mine tailings in wales and Ireland[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2004, 153(1/4): 157-172.
- [3] ROSNER T, SCHALKWYK A V. The environmental impact of gold mine tailings footprints in the Johannesburg region, South Africa [J]. Bulletin of Engineering Geology and Environment, 2000, 59(2): 137-148.
- [4] SCHWARTZ M O, SCHIPPERS A, HAHN L. H. • rochemical models of the sulphidic tailings dumps at Matchless (Namibia) and Selebi-Phikwe (Botswana)[J]. Environmental Geology, 2006, 49(4): 504-510.
- [5] TNYNBEKOV A K, ALIEV M S. The ecological condition of KADJI-SAI URANIUM tailings [J]. Environmental Security and Public Safety, 2005, 47(3): 187-195.
- [6] MORQUEZ-FERRANDO R, SANTOS X, PLEGUE-ZUELOS J M, et al. Bioaccumulation of heavy metals in the lizard Psammotromus algirus after a tailing-dam collapse in Aznalcóllar[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2008(6): 231-239.
- [7] 徐宏达. 我国尾矿库病害事故统计分析[J]. 工业建筑, 2001, 31(1): 69-71.  
XU HONG-DA. Statistical analysis of tailings pond accidents in China[J]. Industrial Architecture, 2001, 31(1): 69-71.
- [8] 杨俊杰. 相似理论与结构模型实验[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005.
- [9] HANCOCK G. The use of landscape evolution models in mining rehabilitation design [J]. Environmental Geology, 2004, 46(5): 561-573.
- [10] 甘祥根. 物理模型及其应用[J]. 广东技术师范学院学报, 2004(6): 17-19.  
GAN XIANG-GEN. Physics model and application[J]. Journal of Guang-Dong Technical Normal College, 2004(6): 17-19.
- [11] 尹光志, 余果, 张东明, 等. 细粒尾矿堆积坝物理模型试验研究[J]. 矿业安全与环保, 2005, 32(5): 4-6.  
YING GUANG-ZHI, YU GUO, ZHANG DONG-MING, et al. Test study on physical model of fine stacking dam [J]. Mining Safty and Enviromental Protection, 2005, 32(5): 4-6.
- [12] 胡修文, 唐辉明, 刘佑荣. 三峡库区赵树岭滑坡稳定性物理模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2089-2094.  
HU XIU-WEN, TANG HUI-MING, LIU YOU-RONG. Physical model studies on stability of zhaoshuling landslide in area of three gorges reservoir [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2089-2094.
- [13] DOUGLAS J F, GASIOREK J M, SWAFFIELD J A. Fluid dynamics [M]. British: British Miners Publishing Co. Ltd, 1979: 512-518.
- [14] 昆明有色冶金设计研究院. 会理县马鞍坪矿山废石综合利用有限责任公司矿山废石综合利用工程选矿厂尾矿库安全专篇[R]. 昆明: [s. n.], 2006.
- [15] 尹光志, 杨作亚, 魏作安, 等. 羊拉铜矿尾矿料到物理力学性质[J]. 重庆大学学报, 2007, 30(9): 118-121.  
YIN GUANG-ZHI, YANG ZUO-YA, WEI ZUO-AN, et al. Physical and mechanical properties of yangla-copper's tailings [J] Journal of Chongqing University, 2007, 30(9): 118-121.
- [16] 黄玮征. 堆石料的 Duncan-Chang 模型参数研究[D]. 南京: 河海大学岩土工程研究所, 2006.

(编辑 赵 静)