

文章编号:1000-582X(2012)05-097-06

尾矿粗细颗粒分层结构体的力学特性分析

张千贵^{1,2}, 尹光志¹, 周永昆³, 敬小非⁴, 蒋长宝¹

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 西南石油大学 石油工程学院, 成都 610500; 3. 四川省安全科学技术研究院, 成都 610045; 4. 重庆科技学院 重庆安全工程研究院, 重庆 401331)

摘要:利用室内三轴试验和直接剪切试验,研究尾矿粗细颗粒分层结构体的力学特性,包括尾矿粗细颗粒 2 层结构和 3 层结构,同时考虑分层厚度变化的影响。三轴试验结果显示:分层结构体的内聚力一般比单一粗粒尾矿和细粒尾矿的低,内摩擦角介于单一细粒尾矿和粗粒尾矿的之间;在 2 层结构中,试件的内聚力随着粗粒尾矿层厚度的增加而减小,内摩擦角随着粗粒尾矿层厚度的增加而增大;在 3 层结构中,粗粒尾矿作夹层时,结构体的内聚力随着夹层厚度的增加而显著减小,以细粒尾矿作夹层时,结构体的内摩擦角随着夹层厚度的增加而减小。直接剪切试验结果显示:分层结构体的内聚力和内摩擦角均比粗粒尾矿和细粒尾矿的值低。

关键词:采矿工程尾矿;分层结构;试验测试;抗剪强度

中图分类号:TU411.7

文献标志码:A

Analysis on mechanical characteristic of coarse and fine particles layered structure of tailings

ZHANG Qian-gui^{1, 2}, YIN Guang-zhi¹, ZHOU Yong-kun³, JING Xiao-fei⁴, JIANG Chang-bao¹

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. School of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, P. R. China; 3. Sichuan Sheng Safety Science and Technology Research Institute, Chengdu 610045, P. R. China; 4. Chongqing Safety Engineering Institute, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, P. R. China)

Abstract: Indoor triaxial tests and direct shear tests are adopted to study the mechanical characteristic of coarse and fine particle layered structure of tailings, including two- and three-layer structures, and the influence of the change of lay thickness is taken into account. Triaxial tests results show that hierarchical structure's cohesions, generally, are lower than those of fine and coarse particle tailings, and internal friction angles are between the fine and coarse particle tailings'. For the two-layer structure, the specimen's cohesion reduces and internal friction angle increases with the increase of coarse particle tailings' layer thickness. For the three-layer structure, when the coarse particle tailing is the interlayer, the specimen's cohesion reduces with the increase of interlayer thickness; while when the fine tailing is the interlayer, the specimen's internal friction angle decreases with the increase of interlayer thickness. Direct shear tests

收稿日期:2011-12-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51074199);高等学校博士学科点专项科研基金博导类资助课题(20110191110001)

作者简介:张千贵(1982-),男,重庆大学博士研究生,主要从事岩石力学与岩石工程稳定性方向的研究。

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

results show that hierarchical structure's cohesions and internal friction angles are all lower than those of coarse and fine particle tailings.

Key words: mining engineering tailings; hierarchical structure; experiment testing; shear strength

尾矿库失效造成严重灾害的事例屡见不鲜,不仅破坏库区周边生态环境,而且给库区下游的居民生命财产带来巨大损失^[1-3],如,2008年山西襄汾“9·8”尾矿库事故,造成277人死亡,4人失踪。尾矿坝的失稳、溃决破坏是造成灾害事故的主要形式^[4-6]。为此,国家安全生产总局把尾矿库列为非煤矿山最大危险源,对每座尾矿库实行专门的安全生产许可证制度。同时,国家和企业亦投入了大量人力财力用于尾矿库安全方面的科学研究^[7-10]。

国内85%以上的尾矿库是采用上游法堆坝。上游法堆坝是通过水力充填自然沉积形成尾矿坝。现场工程地质勘察揭示,尾矿堆积坝中,存在粗细颗粒分层结构或透镜体结构^[11](如图1、2)。这些结构体分布状况和力学性质等对尾矿坝的稳定性起着至关重要的作用^[12-14]。文献[15]曾对坝体中透镜体的分布规律进行了研究。有关分层结构和透镜体结构的力学特性方面的研究至今未见报道。笔者利用室内土工试验,对分层结构体的力学特性进行了系统研究。

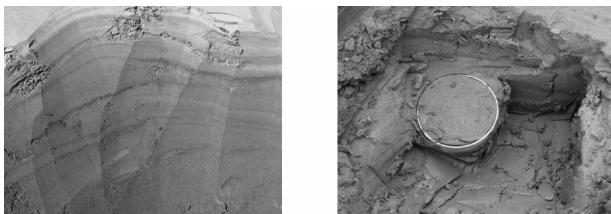


图1 尾矿坝体中的粗细分层结构

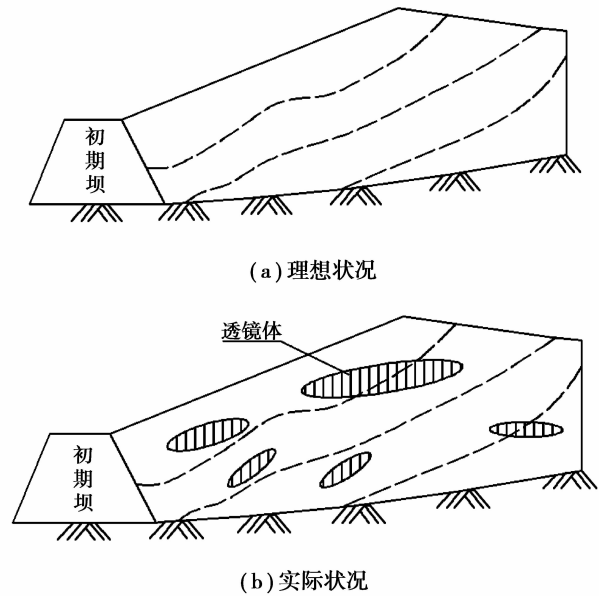


图2 尾矿堆积坝剖面示意图

1 试验测试

1.1 尾矿样与试件制备

试验使用的尾矿来自云南铜业公司下属的铜厂铜尾矿,将全尾矿进行分级处理,分别获得粗粒和细粒尾矿,尾矿颗粒组成见表1,物理性质见表2,颗粒分布曲线见图3。

表1 尾矿的颗粒分布

全尾矿样	颗粒级配/mm						d_{50}/mm	C_u	C_c
	1.0~ <0.25	0.25~ <0.125	0.125~ <0.074	0.074~ <0.018	0.018~ <0.005	≤ 0.005			
粗粒尾矿	11.92%	46.91%	25.06%	15.30%	0.81%	0	0.142 30	2.80	1.09
细粒尾矿	1.06%	4.37%	9.68%	58.72%	21.29%	4.88%	0.034 58	5.19	1.28

表2 尾矿的主要物理性质指标

尾矿样	比重 G_s	干密度(湿密度) $/(g \cdot \text{cm}^{-3})$	含水率 /%	塑限 $W_p/\%$	液限 $W_L/\%$	塑性指数 I_p	孔隙比 e	孔隙率 $n/\%$
粗粒尾矿	3.55	1.68(1.98)	18	18.8	24.9	6.1	0.985	49.6
细粒尾矿	3.48	1.68(1.98)	18	19.7	27.6	7.9	0.834	45.5

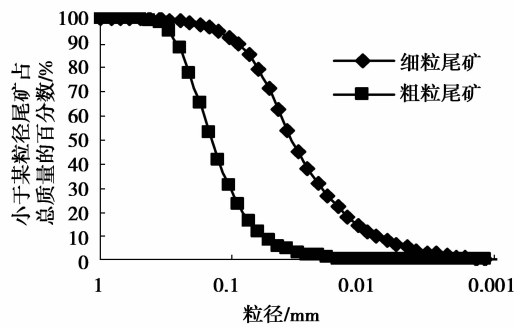


图3 尾矿的颗粒分布

按照土工试验规程^[16],采用重锤击实法,参照表2的密度制作试样。粗、细粒尾矿单一结构体试件如图4(a)所示;在2层结构试件中,以细粒尾矿作下层,粗粒尾矿作上层,上层厚度分别考虑4种情况进行试件的制作(如图4(b));在3层结构试件中,中间夹层分别考虑了粗粒和细粒2种,夹层厚度分别按照4种情况考虑,3层结构试件如图4(c)和图4(d)所示。

粗、细粒尾矿和分层结构3种直接剪切试验试件均制备2组(图4(e)),每组4个试件,其中一组放入饱和器饱和,以便进行饱水快剪试验。

1.2 试验测试

根据尾矿坝堆积过程,尾矿粗细颗粒分层结构体的三轴剪切试验按照不固结不排水(UU)和固结不排水(CU)2种条件考虑,围压分别为:100,200,300 kPa,剪切速率为0.032 mm/min;尾矿粗细颗粒分层结构体分层接触面采用直接剪切试验,按照饱和和天然2种条件考虑,施加的竖向压力分别为100,200,300,400 kPa,试验剪切速率为0.8 mm/min。

2 试验结果及分析

2.1 单一粗细粒尾矿抗剪强度参数对比

单一粗细颗粒尾矿的抗剪强度参数试验结果见表3。从表中可以看出,不固结不排水状态下,粗粒尾矿的内聚力明显小于细粒尾矿的值,两者相差17.28 kPa,而粗粒尾矿的内摩擦角比细粒尾矿的值略大,两者相差 1.91° 。固结不排水状态与不固结不排水的结果相同,粗粒尾矿的内聚力和有效内聚力均小于细粒尾矿的值,其中,两者有效内聚力相差6.66 kPa,而粗粒尾矿的内摩擦角和有效内摩擦角均大于细粒尾矿的值。这些规律与其他学者获得到的基本相同^[17-18]。

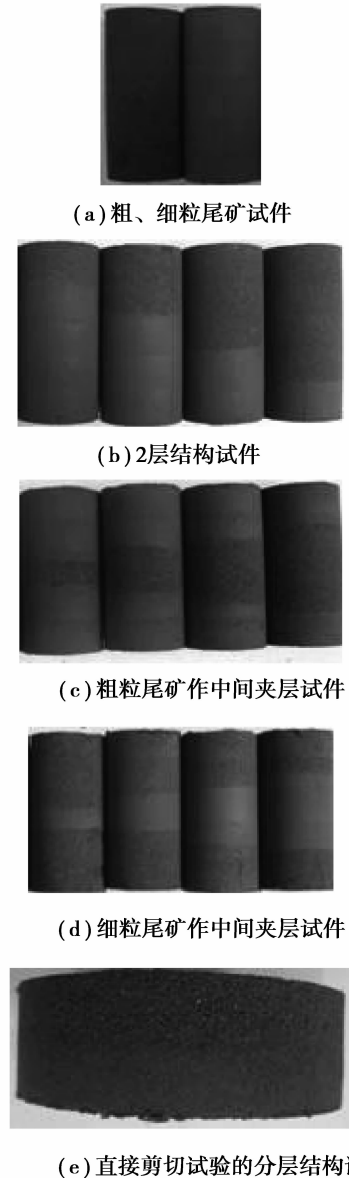


图4 用作剪切试验的尾矿试样

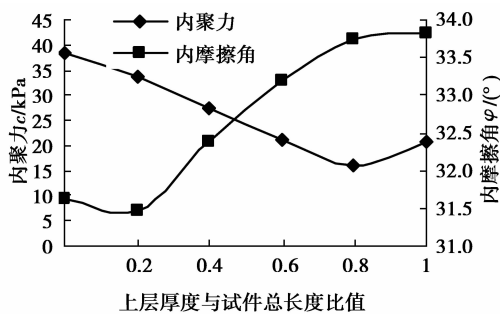
表3 粗、细粒尾矿的主要抗剪强度参数

试件	UU 试验		CU 试验			
	$c/$ kPa	$\varphi/(\circ)$	$c/$ kPa	$c'/$ kPa	$\varphi/(\circ)$	$\varphi'/(\circ)$
粗粒尾矿	20.90	33.53	22.60	13.11	35.17	37.14
细粒尾矿	38.18	31.62	24.87	19.77	32.24	33.68

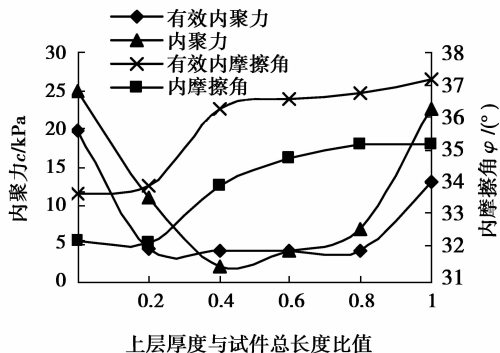
2.2 粗细2层结构体抗剪强度特性

2层结构试件以细粒尾矿作下层、粗粒尾矿为上层,上层厚度分别为1.6,3.2,4.8,6.4 cm,即上层厚度与试件总长度比值分别为0.2,0.4,0.6,0.8,单一细粒尾矿试件比值为0,单一粗粒尾矿试件比值为1。试验结果显示:不固结不排水情况下(如图5(a)),试样的内聚力为15.95~33.81 kPa,且随着

粗粒尾矿层厚度的增加呈线性递减;内摩擦角为 $31.48^{\circ} \sim 33.73^{\circ}$,且随着粗粒尾矿层厚度的增加呈线性递增。固结不排水情况下(如图 5(b)),内聚力为 $1.99 \sim 10.92$ kPa,与粗粒尾矿层厚度的变化关系不大,有效内聚力为 $4.25 \sim 4.0$ kPa,随着粗粒尾矿层厚度的增加而略微减小,其变化量仅为 0.25 kPa。2 层结构体的内聚力和有效内聚力均比单一粗粒尾矿或细粒尾矿的值小,如图 5(b),曲线呈 U 型;内摩擦角为 $32.2^{\circ} \sim 35.16^{\circ}$,有效内摩擦角为 $33.95^{\circ} \sim 36.77^{\circ}$,内摩擦角和有效内摩擦角变化规律相近,即:粗粒尾矿层厚度为 1.6 cm 时,其值接近单一细粒尾矿,而粗粒尾矿层厚度大于 3.2 cm 时,其值接近单一粗粒尾矿,且均随着粗粒尾矿层厚度的增加而增大,在粗粒尾矿层厚度为 3.2 cm 时出现一个转折点,在此之前,内摩擦角和有效内摩擦角均随着粗粒尾矿层厚度的增加而急剧增大,随后趋于平缓,说明粗粒尾矿层厚度与试件总长度比值在 $0.2 \sim 0.4$ 时对内摩擦角和有效内摩擦角的影响较为敏感。不固结不排水和固结不排水 2 种情况下的规律大致相同,细粒尾矿层厚度影响结构体的内聚力,而粗粒尾矿层厚度影响结构体的内摩擦角。



(a) UU 试验



(b) CU 试验

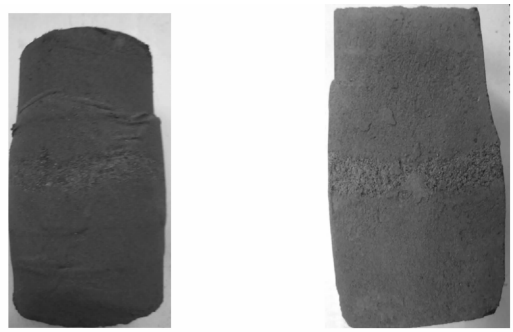
图 5 2 层结构体强度参数与粗粒尾矿层厚度关系曲线

2.3 3 层结构体抗剪强度特性

3 层结构分别考虑了以粗粒尾矿和细粒尾矿作夹层 2 种情况,夹层厚度分别为 $1.0, 2.0, 3.0,$

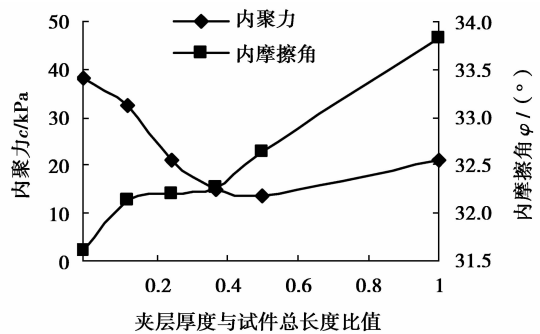
4.0 cm,与试件总长度比值分别为 $1/8, 1/4, 3/8, 1/2$ (夹层厚度与试件总长度比值为 0 时,粗粒尾矿作夹层试件表述单一细粒尾矿试件,细粒尾矿作夹层试件表述为单一粗粒尾矿试件;比值为 1 时,粗粒尾矿作夹层试件表述单一粗粒尾矿试件,细粒尾矿作夹层试件表述为单一细粒尾矿试件)共计 8 组试验。试验后的试件见图 6,试验结果及分析如下:

1) 粗粒尾矿作夹层。不固结不排水三轴剪切试验结果如图 7(a),结构体的内聚力为 $13.45 \sim 32.34$ kPa,随着夹层厚度的增加逐渐减小,但夹层

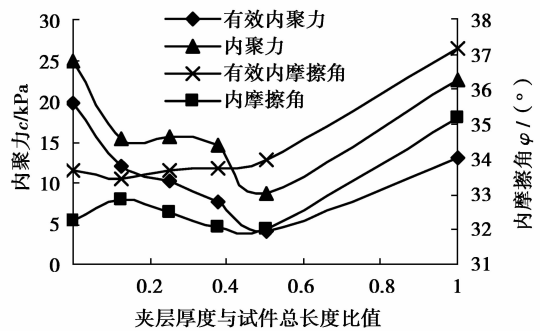


(a) 分层结构体试件剪切变形 (b) 分层结构体试件试验后剖面图

图 6 三轴试验后的尾矿试件



(a) UU 试验



(b) CU 试验

图 7 粗粒尾矿作中间层 3 层结构体强度参数与夹层厚度关系曲线

厚度大于 3.0 cm 时这种增加的趋势变缓,3 层结构体的内聚力均小于单一细粒尾矿的值,夹层厚度为 3.0,4.0 cm 时结构体的内聚力小于单一粗粒尾矿的值;内摩擦角为 32.14°~32.65°,随着夹层厚度的改变,变化规律不明显,分层结构体的内摩擦角均大于单一细粒尾矿而小于单一粗粒尾矿的值。固结不排水三轴剪切试验结果如图 7(b),其内聚力为 8.82~15.74 kPa,变化不大,有效内聚力为 4.02~12.12 kPa,随着夹层厚度的增加而减小,分层结构体的内聚力和有效内聚力均小于单一粗粒尾矿和单一细粒尾矿的值,曲线呈 U 型;内摩擦角为 32.03°~32.85°,随着夹层厚度的增加略微减小,有效内摩擦角为 33.46°~33.97°,随着夹层厚度的增加略微增大。不固结不排水和固结不排水三轴剪切试验得到 3 层结构的结果基本相同,内聚力随着夹层厚度的增加而显著减小,内摩擦角变化规律不明显。

2) 细粒尾矿作夹层。不固结不排水三轴剪切试验结果如图 8(a),内聚力在 15.09~15.82 kPa,无明显变化,但显著小于单一细粒尾矿的值;内摩擦角为 32.1°~33.34°,随着夹层厚度的增加呈线性减小,且均大于单一细粒尾矿的值。固结不排水三轴

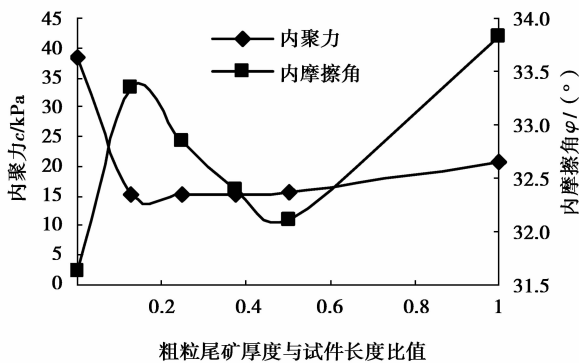
剪切试验结果如图 8(b),分层结构体的内聚力为 1.98~9.23 kPa,随着夹层厚度的增加而逐渐减小,有效内聚力为 3.32~4.41 kPa,变化不明显,曲线呈 U 型;分层结构体的内摩擦角为 34.28°~35°,有效内摩擦角为 35.67°~36.91°,内摩擦角和有效内摩擦角变化规律相同,随着夹层厚度的增加略微减小,均明显大于单一细粒尾矿的值,且略小于单一粗粒尾矿的值。不固结不排水和固结不排水三轴剪切试验得到的结果基本相同,分层结构体的内聚力与夹层厚度关系不大,内摩擦角随着夹层厚度的增加而减小。

2.4 直接剪切试验结果及分析

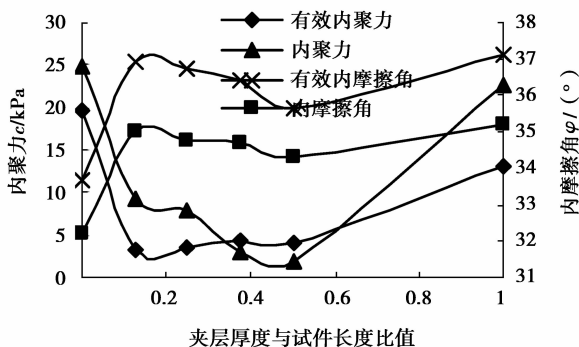
直接剪切试验采用饱水快剪和直接快剪 2 种方法,剪切后的试样情况见图 9,试验结果见表 4。结果显示:2 种剪切情况下,分层结构体的内聚力和内摩擦角均小于单一粗粒尾矿和细粒尾矿的值;分层结构体表现出相对较弱的抗剪特性。



图 9 直接剪切试验后的试件



(a) UU 试验



(b) CU 试验

图 8 细粒尾矿作中间层 3 层结构体尾矿强度参数与夹层厚度关系曲线

表 4 直接剪切试验强度参数

试验方法	粗粒尾矿		细粒尾矿		分层结构	
	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
饱水快剪	4.95	31.7	9.70	30.0	3.10	28.2
直接快剪	6.30	32.4	12.15	29.6	3.75	29.1

3 结 论

通过室内土工试验,研究了由粗、细粒尾矿组成的、不同厚度的分层结构体抗剪强度特性。获得了以下几点结论:

- 1) 单一粗粒或细颗粒尾矿情况下,粗粒尾矿的内聚力小于细粒尾矿的值,粗粒尾矿的内摩擦角大于细粒尾矿的值。
- 2) 粗细 2 层结构体的内聚力随着粗粒尾矿层厚度的增加而减小,内摩擦角随着粗粒尾矿层厚度的增加而增大。
- 3) 粗细 3 层结构体情况下,粗粒尾矿作夹层时,内聚力随着夹层厚度的增加显著减小,内摩擦角变化不大;以细粒尾矿作夹层时,分层结构体的内聚力与夹层厚度变化关系不显著,内摩擦角随着夹层

厚度的增加而减小。

4) 直接剪切试验情况下,2层结构体的强度均比单一粗粒尾矿和细粒尾矿的值低。

5) 由于分层结构体表现出相对较弱的力学性质,在进行尾矿坝的安全评价时,应该特别注意坝体中分层结构体或透镜体的分布状况。

参考文献:

- [1] SCHWARTZ M O, SCHIPPERS A, HAHN L. Hydrochemical models of the sulphidic tailings dumps at Matchless (Namibia) and Selebi-Phikwe (Botswana)[J]. *Environmental Geology*, 2006, 49 (4): 504-510.
- [2] MORENO L, NERETNIEKS I. Long-term environmental impact of tailings deposits [J]. *Hydrometallurgy*, 2006, 83(1/4): 176-183.
- [3] BHATTACHARYA A, ROUTH A J, GUNNAR J, et al. Environmental assessment of abandoned mine tailings in Adak, Västerbotten district (northern Sweden)[J]. *Applied Geochemistry*, 2006, 21(10): 1760-1780.
- [4] RICO M, BENITO G, SALGUEIRO A R, et al. Reported tailings dam failures: A review of the European incidents in the worldwide context [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 152 (2): 846-852.
- [5] NIEKERK H J V, VILJOEN M J. Causes and consequences of the merriespruit and other tailings-dam failures[J]. *Land Degradation & Development*, 2005, 16(2): 201-212.
- [6] 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.
- [7] 敬小非, 尹光志, 魏作安, 等. 模型试验与数值模拟对尾矿坝稳定性综合预测[J]. *重庆大学学报*, 2009, 32(3): 308-313.
JING XIAO-FEI, YIN GUANG-ZHI, WEI ZUO-AN, et al. Model test and numerical simulation of tailing dam safety forecasting [J]. *Journal of Chongqing University*, 2009, 32(3): 308-313.
- [8] 王涛, 侯克鹏, 郭振世, 等. 层次分析法(AHP)在尾矿库安全运行分析中的应用[J]. *岩土力学*, 2009, 29(增刊): 680-686.
WANG TAO, HOU KE-PENG, GUO ZHEN-SHI, et al. Application of analytic hierarchy process to tailings pond safety operation analysis[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 29(suppl): 680-686.
- [9] WEI Z A, YIN G Z, LI G Z, et al. Reinforced terraced fields method for fine tailings disposal [J]. *Minerals Engineering*, 2009, 22(12): 1053-1059.
- [10] WU J, WU Y Q, LU J, et al. Field investigations and laboratory simulation of clogging in Lixi tailings dam of Jinduicheng, China [J]. *Environ Geol*, 2007, 53(2): 387-397.
- [11] 李作章, 徐日升, 穆鲁生, 等. 尾矿库安全技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 1996.
- [12] 袁晓铭, 孙锐. 饱和砂土透镜体液化对建筑物地震反应的影响[J]. *地震工程与工程振动*, 2000, 20(1): 69-74.
YUAN XIAO-MING, SUN RUI. Effect of liquefaction seismic of lenticular saturated sand zone on response of buildings[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2000, 20(1): 69-74.
- [13] JIANG W D. Fractal character of lenticles and its influence on sediment state in tailings dam [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2005, 12(6): 753-756.
- [14] LO R C, KLOHN E J, FINN W D L. Stability of hydraulic sandfill tailings dams [J]. *Geotechnical Special Publication*, 1988, 21: 549-572.
- [15] 李夕兵, 蒋卫东, 贺怀建. 尾矿堆积坝透镜体分布状态研究[J]. *岩土力学*, 2004, 25(6): 947-949.
LI XI-BING, JIANG WEI-DONG, HE HUAI-JIAN. Study on distributing state of lenticle in tailings fill dam [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25 (6): 947-949.
- [16] 袁聚云. 土工试验与原理[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003.
- [17] 尹光志, 杨作亚, 魏作安, 等. 羊拉铜矿尾矿料的物理力学性质[J]. *重庆大学学报: 自然科学版*, 2007, 30(9): 117-122.
YIN GUANG-ZHI, YANG ZUO-YA, WEI ZUO-AN. Physical and mechanical properties of Yang La-copper's tailing [J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2007, 30(9): 117-122.
- [18] 王崇淦, 张家生. 某尾矿料的物理力学性质试验研究[J]. *矿冶工程*, 2005, 25(2): 19-22.
WANG CHONG-GAN, ZHANG JIA-SHENG. Experimental study on physical and mechanical properties of tailings [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2005, 25(2): 19-22.

(编辑 郑洁)