

文章编号: 1000-7598-(2003) 05-0858-05

某铜矿尾矿砂力学特性研究和稳定性分析

张 超, 杨春和, 孔令伟

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 在揭示某铜矿尾矿坝坝体材料空间分布状态及其力学特性的基础上, 利用自动搜索的电算程序 STED, 分析计算了尾矿坝的整体与局部稳定性, 得出一些结论, 可为治理方案提供科学依据和技术指导。

关 键 词: 尾矿坝; 尾矿砂; 力学特性; 稳定性分析

中图分类号: TU 413

文献标识码: A

Study on mechanical characteristics of tailing dam of a copper mine and stability analysis of tailing dam

ZHANG Chao, YANG Chun-he, KONG Ling-wei

(Key Laboratory of Rock and soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Through revealing spacial distribution and physico-mechanical properties of body materials of a tailing dam of a copper mine, and taking advantage of the automatically-search program STED, the integral and local stability of the tailing dam is analyzed; and the results offer a scientific basis and technical guidance for measures dealing with tailing dams.

Key words: tailing dam; tailing sands; mechanical properties; stability analysis

1 概 况

某铜矿小选厂尾矿库位于铜矿采场东南约 1 km 处, 该尾矿库建在沟谷内, 属于山地地形的尾矿库, 20 世纪 70 年代建成并投产使用。初期主坝长约 82 m, 坝顶标高为 108.7 m, 坝高为 15 m, 平均外坡比 1:2.33, 堆积坝的坝标高为 19.5 m, 平均外坡比 1:3.95, 副坝长约为 46 m。经过 30 多年的堆积, 目前堆积坝的最大标高为 128.5 m, 一般标高为 126 m, 最小标高为 92 m, 堆积体厚度达 36 m。由于各种历史原因, 设计资料已无从查找。从现场勘测情况可知, 汇水面积为 0.16 km², 从坝高和库容情况上知属 IV 级库。该库基岩的岩体完整, 构造简单, 两侧坝肩处尚未发现大的断裂带或破碎带, 坝底没有大的断裂构造和软弱夹层, 坝基稳固。基岩岩体为非可溶性岩石, 透水性差, 不存在溶洞、流沙与暗河。该坝库区受水面积小, 地表水补给来源有限。坝基地层主要为第四系坡积粘土, 主、副坝的初期坝为均质粘土坝, 后期子坝利用尾矿砂采

用上游法堆筑, 尾矿由尾矿管道排放、水力充填在滩面上自行沉积而成。根据勘探结果, 按颗分试验和塑性指数将尾矿砂、土分为 6 类: 尾细砂、尾粉砂、尾亚砂、尾轻亚粘土、尾重亚粘土、尾矿泥。

2 尾矿砂的物理力学特性

2.1 尾矿砂的颗粒分析

尾矿是经磨碎的选矿弃物, 呈粉细砂土状, 是尾矿坝坝体的构筑材料, 其颗粒组成决定坝体的渗透性、抗渗能力、压缩和剪切强度性能, 因而, 也决定坝体的稳定性。从试样的颗粒分析试验曲线可知, 该坝尾矿砂的不均匀系数 C_u 大部分在 1.1~5.0 之间变化, 曲率系数 C_s 大部分在 0.5~2.3 之间变化。首先, 根据颗分结果确定其名称, 然后, 根据取样深度就可得到各地质剖面图。该尾矿库在进行勘探取样时共布置了 4 条勘探线: 主坝 3 条, 副坝 1 条。主坝 3 条勘探线编号为 1-1', 2-2', 3-3', 间距为 35 m。副坝 1 条勘探线编号为 4-4'。其中, 1-1' 地质剖面图如图 1, 其它的剖面图在此不再赘述。

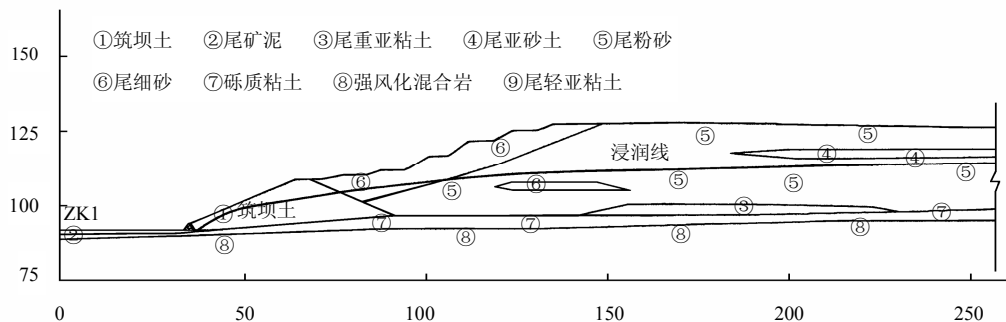


图1 1-1'地质剖面图(单位: m)

Fig. 1 Geological map of profile 1-1' (unit: m)

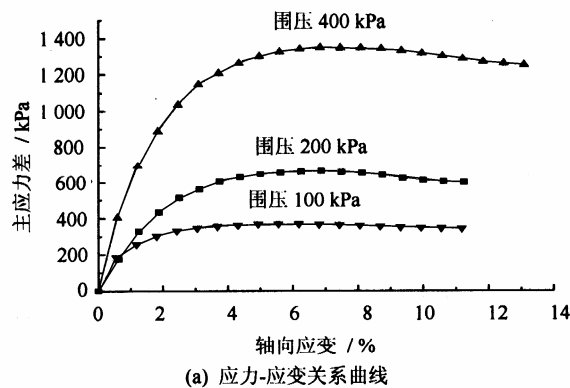
2.2 力学性质

尾矿坝的稳定性分析的可靠程度主要取决于各种土质强度指标的精确程度,因而获得精确的力学性质指标是非常关键的。为了取得可靠的稳定性分析的计算力学参数,进行了直接固结快剪试验和三轴剪切试验,其中,三轴试验的样品为原状圆柱型,直径为39.1 mm,高度为80 mm。先经抽气,而后施加反压力使其饱和后,进行剪切试验。人工制备样是按测定的干密度在压力室的底座上以分层压实法制成为39.1 mm,高度为80 mm的圆柱型试样。首先,采用水头法,再施加反压使其饱和,然后,进行三轴剪切试验。

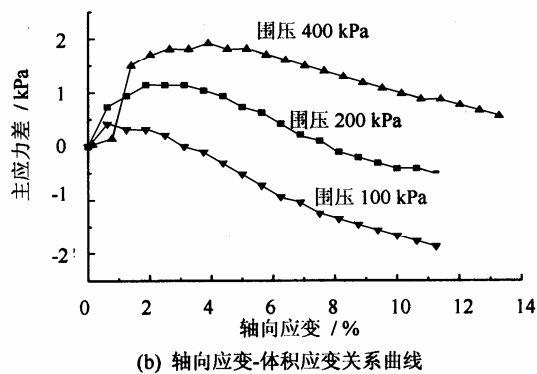
试验类型为固结排水试验和固结不排水试验。

(1) 固结排水剪切试验(CD) 在应变控制式三轴仪上进行排水剪切,剪切速率为0.073 mm/min,当应力-应变关系曲线出现峰值时,继续剪切至5%的轴向应变时停止,或当轴向应变达到15%时停止剪切。图2示出了本次固结排水剪切试验典型的应力-应变关系曲线、轴向应变-体积应变关系曲线和摩尔-库仑强度包线。从图2(a)可看出,该尾矿坝的尾矿砂在排水剪条件下,处于小应变时,剪应力随应变的发展增长较快,尾矿砂颗粒的排列在剪切过程中不断地调整,当应变达到一定值后,剪应力不再增加,可以说明,尾矿砂在固结排水条件下抵抗变形的能力是有限的。从图2(b)可看出,该尾矿砂显示出了一定的剪胀性,而且,剪胀性随着围压增大而增大的趋势。

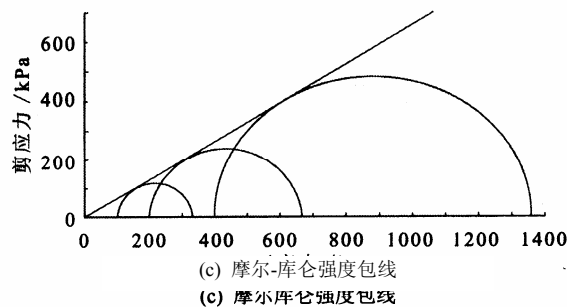
(2) 固结不排水剪切试验(CU) 图3为本次试验典型的应力-应变关系曲线、轴向应变-孔隙水压力关系曲线和摩尔-库仑强度包线。由图可以看到,孔隙水压力在试验初始阶段上升较快,达到极值后趋于平缓并有所下降,应力差随着应变的发展不断上升,当上升到一定程度时,变化趋于平缓。



(a) 应力-应变关系曲线



(b) 轴向应变-体积应变关系曲线



(c) 摩尔-库仑强度包线

(c) 摩尔-库仑强度包线

图2 尾矿砂固结排水剪典型结果

Fig. 2 Typical CD test results of tailing sands

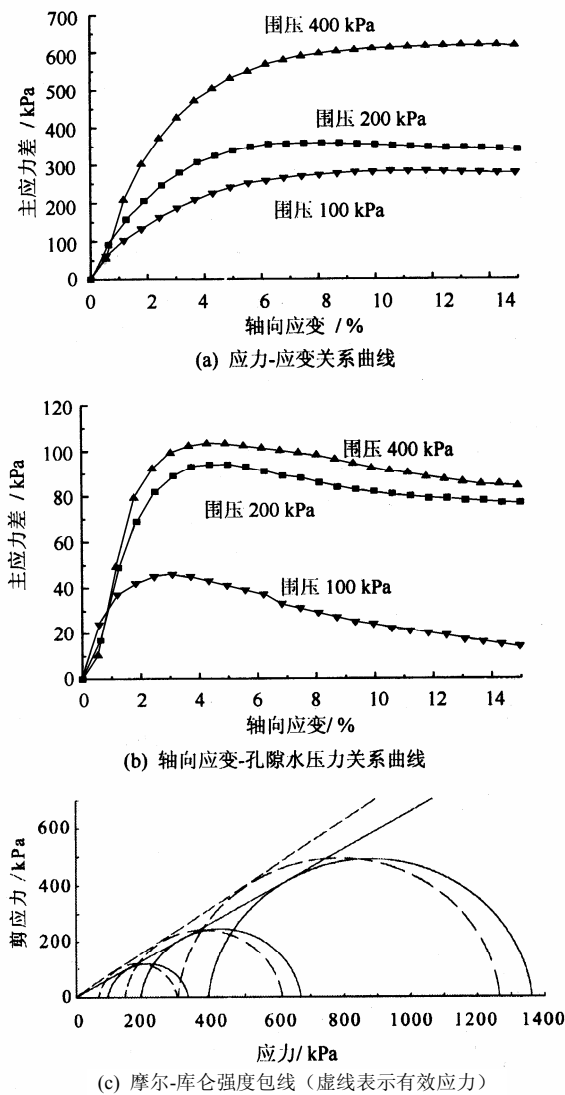


图3 尾矿砂固结不排水剪(CU)典型结果
Fig.3 Typical CU test results of tailing sands

经过大量的试验,得到了尾矿坝坝体材料的物理力学特性,其部分结果见表1。从表1可看出,尾细砂、尾粉砂、尾亚砂、尾轻亚粘土、尾重亚粘土、尾矿泥等几类坝料属松散到稍密状态,内摩擦角中等,且有依次减小的趋势,而它们的粘聚力总

的来说都比较小。筑坝土和坝基土的透水性很小,可看作不透水坝。

3 稳定性分析

该尾矿坝的稳定性分析对4个剖面进行了计算,主坝有3个计算剖面,副坝只有1个计算剖面。本次采用的计算剖面是根据工程地质剖面图加以适当的简化,在1-1'剖面 and 4-4'剖面各去掉了一个小透水体;而2-2'和3-3'剖面则几乎没有简化,基本上反映了坝体的真实情况。该铜矿矿区的地震基本烈度为VI度,由于该尾矿库属于IV级库,且距离居民生活区较远,设计烈度可按VI度考虑。据《水工建筑物抗震设计规范(SL203-97)》^[1]总则中规定,设计烈度为VI度时,可以不进行抗震计算。该尾矿坝稳定性分析采用的土性参数指标见表1。在本次的计算条件中,考虑了正常条件下的实测浸润线位置和在洪水运行条件下根据调洪演算得到的浸润线位置的2种情形,计算分别采用了有效应力法和总应力法。有效应力法适用于长期稳定性分析;总应力法通常用于施工中或竣工后的短期稳定性分析。计算方法选用的是简化Bishop法,该方法考虑了水平条间力的作用,如图4所示。

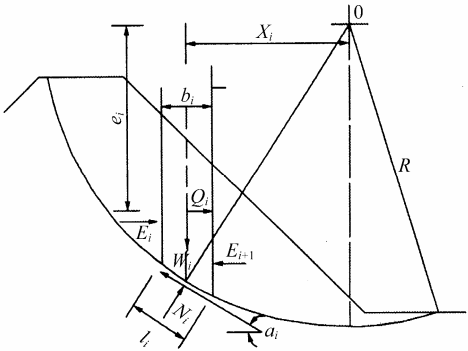


图4 简化毕肖普法示意图
Fig.4 A sketch of simplified Bishop method

表1 尾矿坝坝体材料物理力学性能指标

Table 1 Physico-mechanical properties of materials of tailing dam

土类名称	含水率 ω / %	密度 ρ_g / $g \cdot cm^{-3}$	饱和密度 ρ_{satg} / $g \cdot cm^{-3}$	比重 G_s	孔隙比 e	抗剪强度参数				渗透系数 K_v / $10^{-5} cm \cdot s^{-1}$
						c_{cu} / kPa	φ / (°)	c' / kPa	φ' / (°)	
尾细砂	16.8	2.141	2.419	3.31	0.628	0	28	4.54	35	4.54
尾粉砂	21.3	2.117	2.277	3.12	0.660	0	26	2.06	33	2.06
尾亚砂	23.0	2.058	2.090	3.02	0.857	5	20	1.52	31	1.52
尾轻亚粘土	25.2	2.168	2.173	3.04	0.738	11	17	0.82	28	0.82
尾重亚粘土	26.7	2.079	2.081	3.13	0.968	11	16	0.39	26	0.39
尾矿泥	27.5	2.082	2.084	2.98	0.828	10	16	0.16	26	0.16
筑坝土	35.6	1.961	1.962	2.73	0.798	8	22	0.14	30	0.14
砂质粘土	34.8	1.889	1.889	2.72	0.935	20	20	0.07	28	0.07

注: c , φ 为总应力强度参数, c' , φ' 为有效应力强度参数。

安全系数 F_s 最后的计算公式如下:

$$F_s = \frac{\sum \frac{1}{m_{ai}} [c'_i b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \varphi'_i]}{\sum W_i \sin \alpha_i + \sum Q_i \frac{e_i}{R}} \quad (1)$$

$$m_{ai} = \cos \alpha_i + \frac{\tan \varphi_i \sin \alpha_i}{F_s} \quad (2)$$

式中 F_s 为该滑面的安全系数。 α_i 为土条底部的坡角; h_i 为土条高; b_i 为土条宽; W_i 为土条自重; Q_i 为水平作用力; u_i 为土条底部的孔隙水压力; R 为滑弧的半径; e_i 为土条水平作用力对滑弧圆心的力臂; c'_i 、 φ'_i 分别为土条底部的土体的有效粘聚力和有效内摩擦角;因为,在 m_{ai} 中也含有 F_s , 所以,采用迭代法进行计算,分别搜索计算滑弧在坝坡下部和坝坡上部以及坝体发生整体滑动时的最小安全系数及其所对应的滑弧位置,共计算了 36 组,其计算结果见表 2。

表 2 稳定性分析计算结果
Tab.2 Results of stability analysis

计算方法	浸润线状态	计算剖面	安全系数(滑弧所在位置) F_s		
			坝坡下部	坝坡上部	整体滑动
有效应力法	实测	1-1'	1.43	1.89	1.70
		2-2'	1.45	1.61	1.84
		3-3'	1.55	2.01	1.92
		4-4'	4.84	1.16	4.69
	洪水运行	1-1'	1.05	1.89	1.54
		2-2'	1.06	1.61	1.63
		3-3'	1.14	2.01	1.71
		4-4'	3.34	0.84	3.28
总应力法	实测	1-1'	1.62	2.32	1.82
		2-2'	1.37	2.29	1.89
		3-3'	1.56	2.35	2.03
		4-4'	5.12	1.32	4.86

图 5, 6 是本次稳定性分析计算结果中 1-1' 剖面在正常条件下,用有效应力法和总应力法计算所得的最小安全系数,及其所对应的最危险的滑弧位置,其它情况就不在此一一列举了。

由渗透破坏而引起尾矿坝破坏的现象也比较常见,所以,有必要对该坝进行渗透稳定性分析。进行渗透稳定性分析时,采用通过调洪演算得到洪水运行时的最大洪水水位,在此情况下,根据《选矿厂尾矿设施设计规范》附 3:“上游式尾矿坝渗流计算简法”计算各剖面的浸润线和出逸高程,然后,在小于最大洪水水位的情况下不断地改变水位,试

算在不同水位时的浸润线和出逸高程。其计算方法是:首先,确定化引滩长及化引库水位,假定放矿水覆盖了绝大部分滩面,此时,化引滩长计算公式为

$$L_i = 3.3 L_c^{0.48} \quad (3)$$

式中 L_i 为化引滩长; L_c 为计算条件下的实际滩长。

化引库水位的计算公式为

$$H_i = H + (L_c - L_i) m_0 \quad (4)$$

式中 H_i 为化引库水位; H 为计算条件下实际库水位; m_0 为沉积滩坡度系数。浸润线位置参照《尾矿设施设计参考资料》^[3]中有关章节加以确定。将尾矿坝简化视为坝基不透水的均质坝,当无排渗设施且下游无水时,浸润线方程可表示为

$$y = (h_i^2 - \frac{h_i^2 - a^2}{L - ma} x)^{1/2} \quad (5)$$

式中 a 为出逸点高度。

按下式计算

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{L}{m} - \left[\left(\frac{L}{m} \right)^2 - h_i^2 \right]^{1/2}; \\ L &= L_1 + \Delta L; \\ \Delta L &= m_0 h_i / (2m_0 + 1) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 m 为下游坡度系数; L , L_1 , ΔL 的意义如图 7 所示。

而后验算在各种情况下的浸润线出逸点处水力坡度是否满足渗流稳定性要求。根据《尾矿设施设计参考资料》^[3]知,考虑粘聚力时的临界坡降为

$$J_c = \frac{\gamma_d}{\gamma_0} - (1 - n) + \frac{c}{\gamma_0} \quad (9)$$

式中 J_c 为土的临界渗流坡降; γ_d 为渗流出逸段的土的干重度; γ_0 水的重度; n 为孔隙率; c 为粘聚力。渗流坡降应小于允许渗流坡降 J_y , 按下式计算 J_y :

$$J_y = J_c / F_s \quad (10)$$

式中 F_s 为渗透安全系数。按《尾矿设施设计参考资料》^[3]中的表 2-117 查得,IV 级库的渗透安全系数为 2, 即有 $J_y = 0.5 J_c$, 如果在浸润线的出逸点的水力坡降 $J < J_y$, 则认为满足渗透稳定性的要求,反之则不满足。由计算结果可以知道,在主坝的标高在 111.9 ~ 121.6 m 坡度比较大的这一段,渗流稳定性不满足规范的 $F_s \geq 2$ 要求,有必要进行整修加固处理。

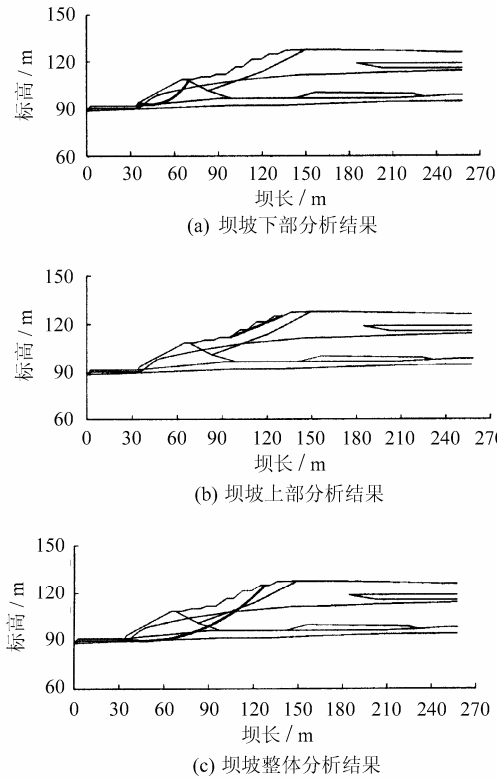


图 5 1-1' 剖面有效应力法稳定性计算分析结果
Fig.5 Calculative stability results of effective stress method for profile 1-1'

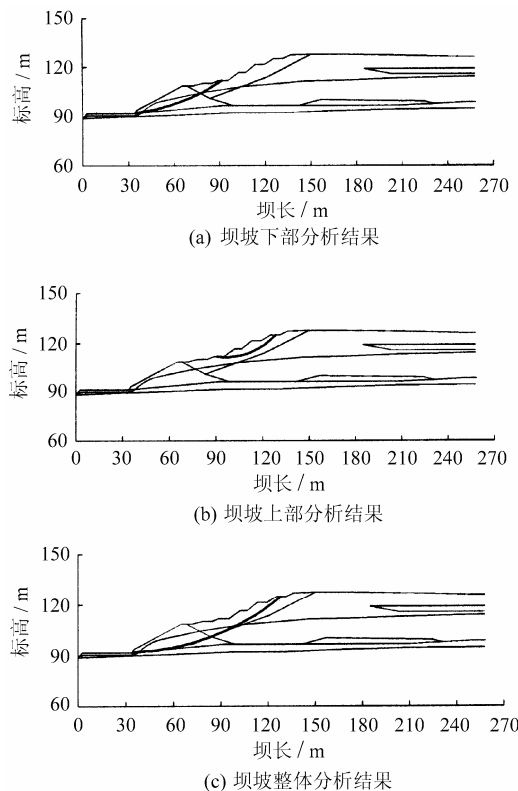


图 6 1-1' 剖面总应力法稳定性计算分析结果
Fig.6 Calculative stability results of effective stress method for profile 1-1'

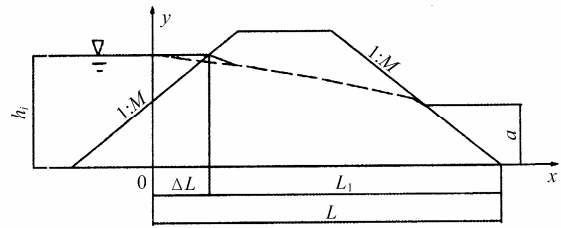


图 7 渗流计算示意图 (单位: m)

Fig.7 A sketch of seepage calculation (unit: m)

4 结语与建议

尾矿坝抗滑稳定性计算^[4]结果表明,在实测浸润线条件下,主、副坝的抗滑稳定安全系数均能满足尾矿坝设计规范的要求。在洪水运行情形下,主坝初期坝的抗滑稳定安全系数接近尾矿坝设计规范要求,安全储备不大。而渗透稳定性分析结果表明,在洪水运行情况下,当主坝浸润线由初期坝坡面出逸时,渗透稳定安全系数未达到 $F_s \geq 2$ 的要求;副坝无出逸点,不会发生渗透破坏。为了保证该尾矿库安全,消除隐患,需对该库进行有针对性的综合治理,建议采取如下措施:

(1) 完善尾矿库的排洪系统,在尾矿坝坡面设置地面排水沟系统,且采取相应的措施改善主副坝坡面的植被情况并加强植被保护;

(2) 在主坝初期坝设置土工布包卵石的纵向排渗盲沟,以防止浸润线逸出坡面,修整尾矿堆积坝坡面,禁止在副坝堆积坝上从事农作物耕种活动;

(3) 为了提高初期坝抗滑稳定性和防止初期坝及坝基上渗流出口出现渗透破坏,建议改扩建初期坝原有排水棱体,并加设一道兼起贴坡反滤和镇压坡脚作用的干砌石挡墙。

参考文献

- [1] SL203-97, 水工建筑物抗震设计规范[S].
- [2] ZBJ1-90, 选矿设计规范[S].
- [3] 尾矿设施设计参考资料编写组. 尾矿设施设计参考资料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987.
- [4] 王武林, 杨春和, 阎金安. 某铅锌矿尾矿坝工程勘察与稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1992, 11(4): 332—344.
- [5] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995.