

doi: 10.11857/j.issn.1674-5124.2018040027



尾矿砂物理力学性能测试及坝体稳定性分析

辛保泉^{1,2}, 万露¹, 赵海燕³, 谭钦文²

(1. 中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院, 山东 青岛 266101; 2. 西南科技大学, 四川 绵阳 621010;
3. 中石油辽河油田供水公司, 辽宁 盘锦 124010)

摘要: 为测试某上游式尾矿库内尾矿砂的物理力学性能, 并论证坝体当前稳定性, 通过室内土工试验和 BI-90 Plus 型激光粒度分析仪对原状尾矿砂进行全面测试与分析, 得到尾矿砂 13 项基本物理性质指标和 4 项力学性质指标, 同时计算 3 种工况下的坝体稳定性安全系数。研究表明: 铜尾矿为细粒尾矿, 渗透性差、可塑性强且膨胀性和收缩性显著, 粒径大小及其含量近似呈 Gauss 分布; 细粒尾矿含量越高, 黏聚力越强, 而内摩擦角和渗透系数越小, 且差异达数倍至数十倍, 分析认为这可能与尾矿颗粒中黏粒含量有关; 3 种工况下计算出的最小安全系数均明显大于规范要求值, 表明其稳定性较好; 按照尾矿颗粒级配和物理力学特性科学、合理的放矿, 对坝体稳定性至关重要。试验结果可为研究尾矿砂的工程力学特性和坝体稳定性提供详实的数据支撑。

关键词: 尾矿砂; 物理力学性能; 稳定性分析; 土工试验; 安全系数; 极限平衡法

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2019)06-0035-07

Physical and mechanical properties test of tailing sand and stability analysis for tailings dam

XIN Baoquan^{1,2}, WAN Lu¹, ZHAO Haiyan³, TAN Qinwen²

(1. SINOPEC Research Institute of Safety Engineering, Qingdao 266101, China;
2. Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;
3. CNPC Liaohe Oilfield Water Supply Company, Panjin 124010, China)

Abstract: It is to test the physical and mechanical properties of the tailings in an upstream tailings pond and to demonstrate the current stability of the dam. Through the indoor soil test and the BI-90Plus laser particle size analyzer, the original tailings were thoroughly tested and analyzed. Thirteen basic physical property indexes and four mechanical property indexes of tailings sand were obtained. At the same time, the safety coefficient of dam stability under three conditions was calculated. The results show that copper tailings are fine tailings with poor permeability, strong plasticity, and significant swelling and shrinkage. The particle size and its content approximate Gauss distribution. As the content of fine tailings increases, the cohesion tends to be stronger, whereas the internal friction angle and the permeability coefficient seems to decrease gradually. The difference reached several times to dozens of times. This may be related to the amount of clay in the tailings. The minimum safety factor calculated under the three conditions is obviously greater than the specification require-

收稿日期: 2018-04-08; 收到修改稿日期: 2018-05-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51404200); 四川省科技创新苗子工程资助项目(2017016)

通信作者: 辛保泉 (1990-), 男, 山东安丘市人, 硕士, 主要从事定量风险评估及抗爆减灾技术研究。

ments, indicating that the stability is better. According to the science of grading and physical and mechanical properties of the tailings, and reasonable ore discharge, it is crucial to the stability of the dam body. The test results provide detailed data support for studying the engineering mechanical properties of tailings and the stability of the dam.

Keywords: tailings sand; physical and mechanical properties; stability analysis; soil test; safety factor; limit equilibrium method

0 引言

尾矿坝的稳定可靠对尾矿库安全至关重要。一般而言,排放后经过分层碾压而成的尾矿砂是构筑上游式尾矿坝的主要材料,确定其基本物理力学性质是研究坝体稳定性的基础^[1]。以四川某铜矿尾矿库为研究对象,该尾矿库初期坝高 20 m,设计堆坝高 85 m,总库容 $1\,128.32 \times 10^4 \text{ m}^3$,地震设防烈度为 8 度,目前已使用了 12 年,总坝高堆至约 50 m。由于目前该尾矿库已堆至接近 1/2 最终设计总坝高,加之尾矿库当前工程地质条件欠佳,根据 GB50863-2013《尾矿设施设计规范》要求^[2],需对尾矿坝做全面论证,以验证最终坝体的稳定性并确定后期的处理措施。

在该尾矿库的早期勘察和设计报告中给出的部分尾矿参数是早期基于原尾矿初始状态的。要准确计算和评估坝体稳定性,首先应对当前用于筑坝尾矿的物理力学性质进行全面测试。尾矿砂具有异于普通砂土材料的特性,全面分析其物理力学性能,对尾矿库设计、坝体稳定性计算和防灾措施的制定具有一定参考价值。

1 尾矿粒度测试及级配分析

尾矿的颗粒组成和级配情况是综合反映尾矿特性的重要指标^[3-4]。试样的选取位置通常为库前、库中和库尾,本文根据放矿后尾砂的自然沉积规律,并充分考虑到用于上游式筑坝的尾矿料多来源于库前的实际条件,试样均取自库前 5 个不同的位置,然后分析其矿物成分和颗粒组成。

1.1 矿物成分

铜尾矿主要含有方解石、角闪石、黄铜矿、石英、磁铁矿石等,属于硅铝酸盐型尾矿。对尾矿砂进行 XRF 分析,得到试样的矿物组成,见表 1。

可以看出,尾矿中含有的矿物成分种类较多,且 CaO、MgO 和 K_2O 等化学性质不稳定的矿物成分含量较高,易被氧化分解或劣化,进而影响抗剪强度和渗透系数。

1.2 尾矿颗粒级配

尾矿颗粒级配特征以粒径的大小分布关系曲线表示。该曲线以粒径的对数为横坐标(对数坐标),以小于某粒径的颗粒质量累计百分含量(自然坐标)为纵坐标。通过颗粒级配曲线可以较好地了解尾矿的颗粒组成情况^[5]。为了准确分析尾矿砂各粒组的大小组成情况,突出数据的重复性,确保整个测试体系的温度恒定,避免交叉污染,试验选用美国布鲁克海文 90 Plus 型激光粒度分析仪,分析尾矿砂的各粒组含量^[6]。

该激光粒度分析仪是一种快速、便捷的纳米粒度分析测试仪器,检测器为 PMT,散射角为 15° 和 90° ,精度为 1%。取适量尾矿砂,按照仪器使用要求配置 3 mL 样品共 5 组(分别为 A~E),进行测试和分析。尾矿粒径的大小分布情况如图 1 所示,小于某粒径的尾矿颗粒含量(即累计含量)分布结果如图 2 所示。5 组尾矿砂的主要粒径参数见表 2。

图 1 表明,各组粒径分别关于其平均值呈对称分布,类似于一条“钟型”曲线,即符合 Gauss 分布关系。

表 1 尾矿矿物成分

成分	含量/%	成分	含量/%	成分	含量/%
SiO_2	47.9	MgO	2.25	F	0.35
Fe_2O_3	14.75	K_2O	2.07	MnO	0.28
Al_2O_3	13.3	TiO_2	1.75	Cl	0.21
CaO	7.33	P_2O_5	1.1	CuO	0.19

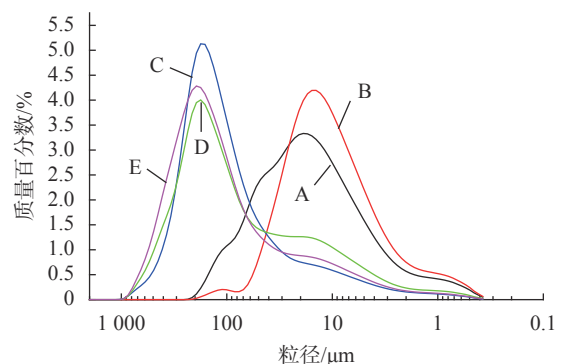


图 1 尾矿粒径分布曲线

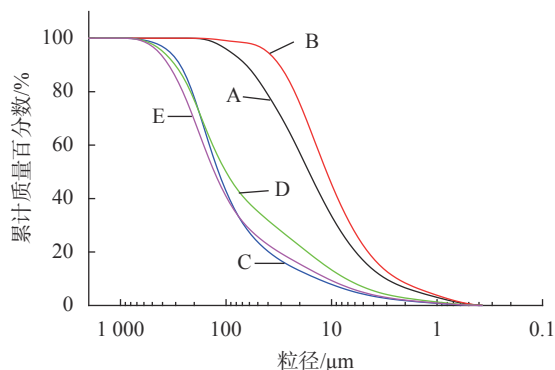


图2 不同粒组的尾矿颗粒级配曲线

5组试样的 d_{50} 均小于0.5 mm,且粒径大于0.25 mm的颗粒质量百分数均不超过50%,表明该尾矿砂颗粒较细。A、B组粒径在0.074 mm以上的尾矿颗粒质量未超过总质量的50%,且塑性指数位于10~17

之间,根据规范^[2]中的原尾矿命名规则,A、B组总体分类属于黏性尾矿中的尾粉质黏土;而C、D、E组粒径在0.074 mm以上的颗粒质量超过了总质量的50%,且不大于85%,属于砂性尾矿中的尾粉砂。

分析图2可知,A组尾矿试样颗粒大小很不均匀,B组曲线近似于倒S型,且粒径跨度不大,表示尾矿试样颗粒分布较为均匀,C、D、E组曲线形状相似,粒径跨度较大,颗粒很不均匀。

由表2可知,B组试样的有效粒径 d_{10} 最小,表明该组尾矿砂的透水性最低,土的可塑性最强且膨胀性和收缩性最为显著。经测试,B组黏粒含量约8.4%,在5%~15%范围内,适合进行土工试验。尾矿的级配特征,可用不均匀系数 $C_u(d_{60}/d_{10})$ 和曲率系数 $C_c(d_{30}^2/(d_{60}d_{10}))$ 表征,计算结果如表3所示。

表2 尾矿颗粒分析试验结果

样品	有效粒径 $d_{10}/\mu\text{m}$	等效粒径 $d_{30}/\mu\text{m}$	中值粒径 $d_{50}/\mu\text{m}$	控制粒径 $d_{60}/\mu\text{m}$	平均粒径 μm	表面粒径S.D./ μm	体积粒径C.V./%
A组	3.348 1	8.940 27	17.989 4	21.967 5	29.429 8	32.548 8	110.598
B组	2.606 65	6.453 05	12.244 7	14.256 0	16.881 5	18.451 6	109.301
C组	14.939 8	69.598 1	129.406	145.973	150.485	125.184	83.186 8
D组	8.002 88	36.014 2	109.808	133.502	144.651	144.541	99.9235
E组	11.913 9	69.107 2	141.602	164.965	174.722	154.489	88.420 2

表3 尾矿级配特征定量计算结果

系数	A组	B组	C组	D组	E组
C_u	6.561	5.469	9.771	16.682	13.845
C_c	1.087	1.121	2.221	1.214	2.430

在尾矿库工程实际中,一般认为 $C_u \geq 5$ 且 $1 \leq C_c \leq 3$ 的土粒径分布不均匀,较大的粒径间的孔隙可由较小的土粒填充,属于级配良好的土。从表3知,5组尾矿砂级配均为良好,连续级配分布均匀。此外,从尾粉质黏土(A、B组)到尾粉砂(C、D、E组),尾矿砂颗粒的 d_{10} 和 d_{50} 都明显增大,表明其砂粒(粒径在0.075~2 mm的土颗粒)含量在增加,或者黏粒含量明显减少。

综上所述,B组尾矿砂颗粒平均粒径最小,黏粒含量最高,颗粒级配较好。由于细粒尾矿砂渗透性差,不利于坝体稳定,且级配较好的尾矿砂含有的各组粒径更为丰富,因此主要选择危险性相对更大、粒径更具代表性的B组尾矿砂(尾粉质黏土)为试验材料进行研究。

2 尾矿砂基本物理性质测试

表征尾矿砂物理特性和状态的指标主要有3个

基本指标、4个液塑性指标和6个其他换算性指标。基本指标有含水率(w)、密度(ρ)和颗粒比重(G_s)。针对不同指标,根据土工试验规程,分别选取大量尾矿坝原状砂样和扰动砂样进行相应测试。

液塑性指标包括液限(w_L)、塑限(w_p)、塑性指数(I_p)和液性指数(I_L)。试验根据FG-III型光电式液塑限联合测定仪法,圆锥质量76 g,锥角30°。测试时取250 g原状尾矿砂试样,全部过0.5 mm(35目)筛,并取200 g试样分成3份,用纯水调制成3种不同含水率的土膏,静置12 h后进行试验。对3种不同含水率的尾矿砂试样进行试验,3个点的圆锥入渗深度分别控制在3~4 mm、7~9 mm、15~17 mm。以含水率为横坐标,锥入深度为纵坐标,在双对数坐标系中绘制关系曲线,结果如图3所示。

由图可知,该尾矿的液限 w_L 为26.7 mm,塑限 w_p 为16.1 mm,则相应的塑性指数为: $I_p = w_L - w_p = 10.6$,在10~17之间,因此该试样属于尾粉质黏土;液性指数为: $I_L = (w - w_p) / (w_L - w_p) = 0.47$,位于0.25~0.75范围,属于可塑状态。

此外,其他物理性质换算性指标有:孔隙比

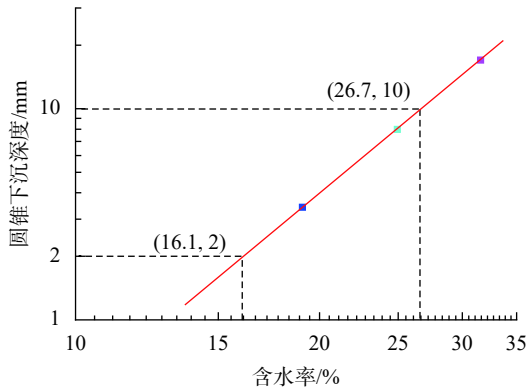


图3 圆锥下沉深度与含水率关系曲线

(e)、孔隙率(n)、干密度(ρ_d)、饱和度(S_r)、饱和密度(ρ_{sat})、有效密度(ρ')等。指标汇总见表4。

表4 尾矿基本物理性质指标试验成果

指标	单位	数值	指标	单位	数值
w	%	21.04	e	-	0.77
S_r	%	75.14	n	-	0.44
ρ_{sat}	g/cm^3	1.98	w_L	%	26.7
ρ	g/cm^3	1.88	w_p	%	16.1
ρ_d	g/cm^3	1.55	I_p	-	10.6
ρ'	g/cm^3	0.98	I_L	-	0.47
G_s	-	2.75			

3 尾矿基本力学特性测试与分析

3.1 抗剪强度特性

土体抗剪强度是决定尾矿坝稳定性的关键因素,根据Mohr—Coulomb强度理论,黏聚力和内摩擦角是影响坝体抗剪强度的主要指标^[7]。

1) 试验方法选择

土的抗剪强度取决于有效应力,而不是总应力,因此抗剪强度计算方法选用有效应力法^[8];该尾矿的塑性指数 I_p 大于10,属于黏性土;天然状态下,饱和度小于80%,选用直剪仪或三轴仪测试抗剪强度。正常运行的尾矿坝会在自重作用下会逐渐完成排水固结,试验方法宜选用排水固结法;对于这种含黏粒较多的细粒尾矿来说,直剪仪和三轴仪的抗剪强度试验结果差别较小,而直剪仪由于其结构简单、操作方便,同时也适合试样的制备和排水,是目前测试土样抗剪强度最直接的方法^[9]。

根据现场排水条件的不同,直剪试验分为快剪(Q)、固结快剪(CQ)和慢剪(S)3种,其中慢剪(S)法允许试样在垂直压力下排水固结,然后快速施加

水平剪应力让试样破坏。

2) 试验过程及内容

试验采用南京土壤仪器厂的EDJ-1型等应变直剪仪。按土工试验方法标准和规程中的要求,用内径6.18 cm、高2 cm的环刀分别制备4组尾粉质黏土试样,分别在100, 200, 300, 400 kPa压力下分级施压,记录垂直变形读数。待试样固结稳定(每小时垂直变形读数变化不超过0.005 mm)后,启动秒表以0.02 mm/min的速率剪切,直至测力计读数稳定或有显著后退,则表示试样已剪损。计算公式:

$$\tau_s = \frac{CR}{A_s} \times 10 \quad (1)$$

式中: τ_s ——剪应力, kPa;

C ——测力计率定系数, N/0.01 mm;

R ——测力计读数, 0.01 mm;

A_s ——试样面积, cm^2 。

3) 试验结果及分析

不同饱和度状态下,剪应力与剪切位移关系曲线,如图4所示。

取图4中每条曲线的峰值点作为抗剪强度 τ , τ 与垂直压力 p 的关系曲线,见图5。线性拟合结果显示,拟合度 r^2 分别达到了0.999 9和1,拟合效果较好,试验数据准确度较高。图中直线的倾角即为尾矿试样的内摩擦角 φ_s ,直线在纵坐标轴上的截距为黏聚力 c_s 。

为了对比分析不同细度尾矿砂的强度参数变化情况,按照上述试验方法和步骤,可进一步求得尾粉砂和尾细砂的黏聚力和内摩擦角,见表5。

结果表明,尾矿细粒含量越高,内摩擦角越小,而黏聚力越强,这与尾矿颗粒中黏粒含量的多少有关^[10]。黏粒含量高(粒径小),则颗粒间的结构联结越强,黏聚力越大;而黏粒含量高的尾矿砂颗粒表面更为平整,即颗粒间摩擦力小,内摩擦角更小。

3.2 渗透特性

尾矿试样材料(尾粉质黏土)属于细粒土(粘质土和粉质土)范围,因此采用变水头法进行渗透试验。试验仪器选用南-TST55型渗透仪,外形尺寸: $\varphi 118$ mm(管嘴除外),高度约155 mm;试样尺寸: $\varphi 61.8$ mm,高40 mm,断面积 30 cm^2 。根据土工试验规程的要求分别对尾粉质黏土、尾粉砂和尾细砂进行测试,每类尾矿砂测试6次,在测得的结果中选取4个允许差值以内的数值,取其平均值作为该孔隙比时的渗透系数,结果见表6。

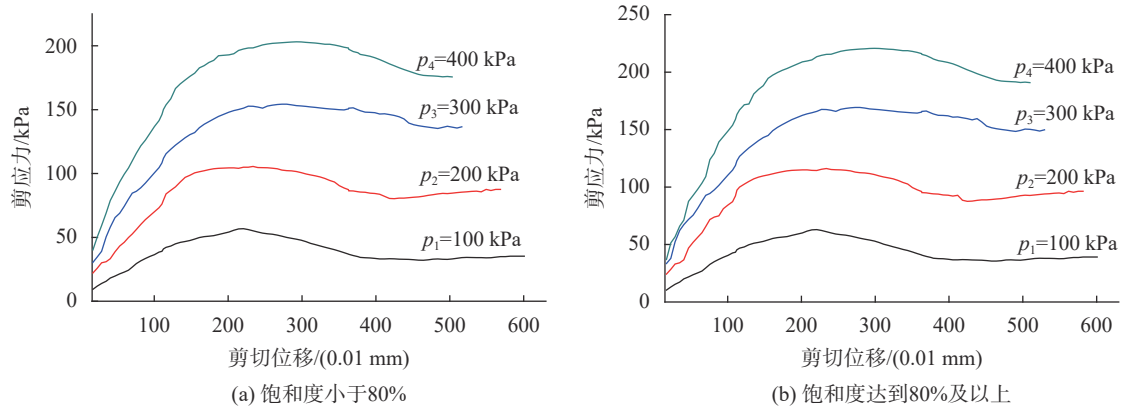


图 4 不同饱和状态下剪应力与剪切位移关系曲线

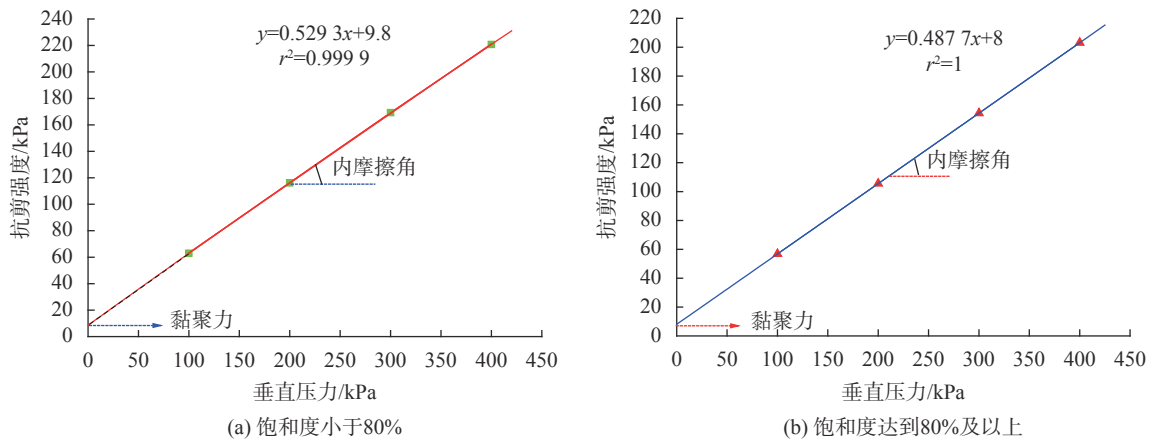


图 5 不同饱和度下抗剪强度与垂直压力关系

表 5 尾矿砂抗剪强度指标试验结果

材料名称	饱和度小于80%		饱和度达到80%及以上	
	c_s/kPa	$\varphi_s/(^\circ)$	c_s/kPa	$\varphi_s/(^\circ)$
粉黏土	9.8	29.0	8.0	27.0
尾粉砂	9.1	31.0	7.2	29.0
尾细砂	7.84	34.0	6.0	32.0

表 6 尾矿渗透系数

材料名称	渗透系数/ $(10^{-4} \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1})$				
	A	B	C	D	平均值
尾粉质黏土	1.15	1.05	1.25	1.3	1.19
尾粉砂	3.5	3.75	3.6	3.7	3.64
尾细砂	13.5	12.0	12.5	12.1	12.5

由表可知, 尾砂细粒含量越高, 渗透系数越小, 且差异较抗剪强度参数大得多, 达数倍至数十倍。

4 尾矿坝稳定性计算和分析

4.1 模型建立

根据试验结果, 借助 Slide 软件, 直观、准确地

建立尾矿坝仿真模型, 计算尾矿坝稳定性。根据垂直条块极限平衡法, 采用自动搜索最危险滑动面的方法确定给定边坡的临界滑动面^[11]。考虑该尾矿坝边坡实际工况, 对模型做出如下设定: 边坡失效后的整体滑动方向在模型上表现为自右向左, 材料和支持的最大数量均为 20 个, 条块数量 25 条, 计算精度 0.005, 最大迭代次数 50 次, 条块间的作用力函数为半正弦波形。

根据工程地质勘查结果, 将尾矿坝 AutoCAD 纵剖面图同比例导入 Slide 后建模。实际地层并不规则、均匀, 但考虑到该尾矿坝分层压实效果较好, 且剖面轴线长度都在数百米以上, 因此忽略其“尺寸效应”, 参照库区地层钻探成果, 将尾矿坝底层及其边界进行概化分层。坝基各层材料参数见表 7。

初期坝属于工程边坡, 坝体材料为坚硬的干砌块石(特坚石), c 、 φ 值最大; 强风化玄武岩属于次坚石, 岩结构破坏较大, 岩性劣化显著^[11], c 、 φ 值比中风化玄武岩(坚石)更小。

4.2 计算结果及分析

根据简化毕肖普法和瑞典圆弧法, 分别计算正

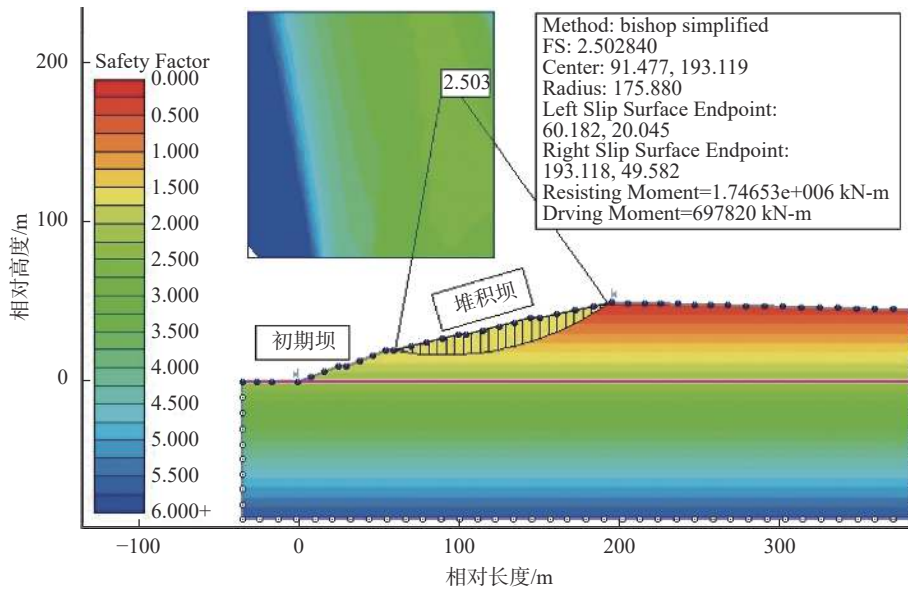
表7 坝基材料参数值

材料名称	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	$\rho_d/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$\rho_{sat}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	渗透系数/ $(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
初期坝	480	36.0	20.1	28.5	5×10^{-2}
中风化玄武岩	36.0	34.0	23.2	23.8	5×10^{-7}
强风化玄武岩	30.0	28.0	19.0	19.3	5×10^{-7}

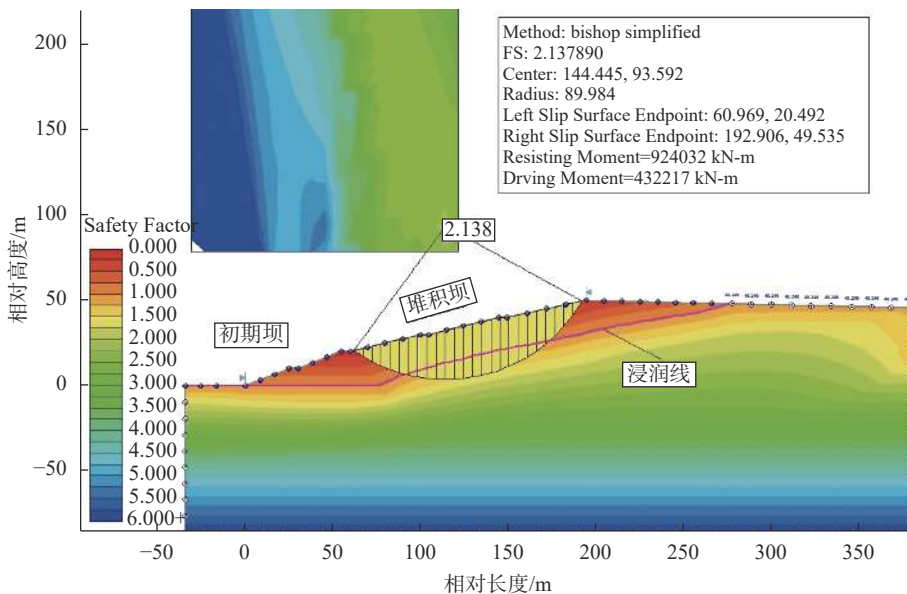
常运行(干燥无降水)、洪水运行、特殊运行(暴雨和地震共同作用)时的稳定性。其中,地震荷载考虑破坏性更大的水平荷载,根据尾矿库所处地区地震烈度和设计分组以及规范要求^[2],确定地震荷载为 $0.2g$ 。以简化毕肖普法为例,计算结果见图6。

表8为坝体稳定性计算结果,两种计算方法分

别计算出的3种工况下的尾矿坝最小安全系数,均明显大于规范要求值^[2],表明坝体当前稳定性较好。仅在洪水运行工况下,最小安全系数有所降低,在有地震作用时的特殊运行条件下,最小安全系数较正常运行时分别降低了38.4%和51.04%,表明地震荷载对坝体稳定性影响大,应重视坝体的抗



(a) 正常运行工况



(b) 洪水运行工况

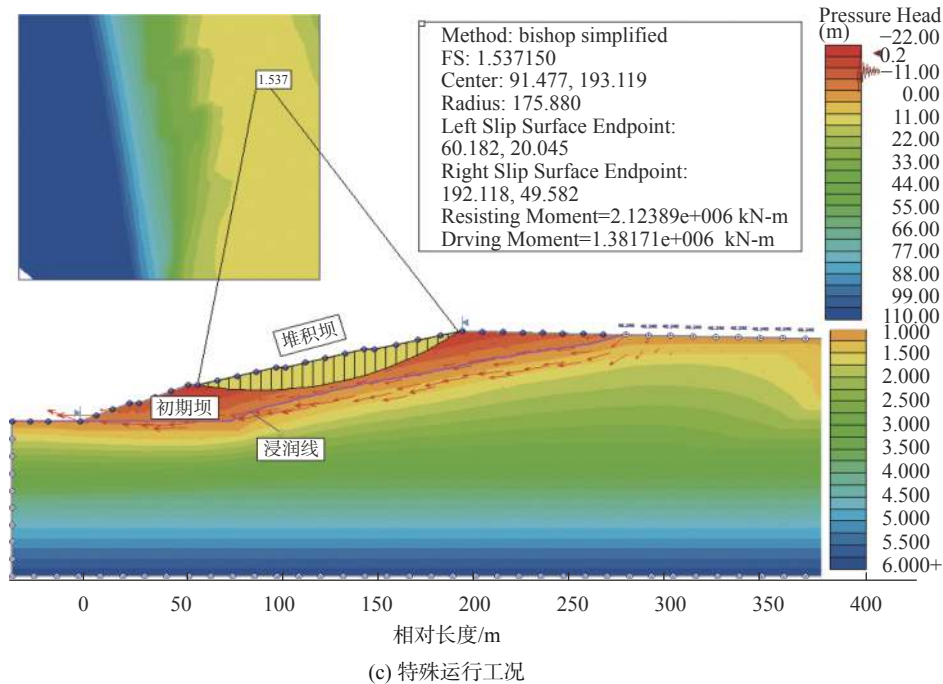


图 6 简化毕肖普法稳定性计算结果

表 8 坝体稳定性计算结果

计算方法	工况	最小安全系数	
		计算结果	规范要求
简化毕肖普法	正常运行	2.50	1.35
	洪水运行	2.14	1.25
	特殊运行	1.54	1.15
瑞典圆弧法	正常运行	2.41	1.25
	洪水运行	1.81	1.15
	特殊运行	1.18	1.05

震、抗液化能力。

5 结束语

通过室内土工试验全面测试和分析了某铜矿尾矿砂的物理力学性能, 并采用数值模拟方法计算了该尾矿坝 3 种运行工况下的稳定性, 主要结论如下:

1) 铜尾矿砂多为细粒尾矿, 渗透性差, 粒径大小及其含量近似呈 Gauss 分布关系。尾矿砂级配均为良好, 连续级配分布均匀, 表明其抗地震液化性能较好, 有利于坝体的长期稳定。

2) 尾矿颗粒分析结果和抗剪强度试验结果均表明, 在本次试验范围内, 尾矿砂细粒含量越高 (或粒径越小), 则黏聚力越强, 而内摩擦角和渗透系数越小。因此, 按照尾矿砂粗、细颗粒级配关系进行科学、合理的放矿对坝体稳定性至关重要。

3) 极限平衡法可有效计算尾矿坝稳定性, 该尾矿坝最小安全系数均明显大于规范要求值, 且留有一定的安全储备, 表明当前坝体稳定性较好。

参考文献

- 胡亚东, 巨能攀, 何朝阳, 等. 某尾矿坝渗流场数值模拟及坝体稳定性分析 [J]. 人民黄河, 2015, 37(8): 111-114, 118.
- 尾矿设施设计规范: GB 50863-2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- 吕淑然, 赵学龙. 尾矿库坝外排土压坡对其稳定性影响的数值分析 [J]. 中国矿业, 2014, 23(5): 113-115, 129.
- LEÃO T P. Particle size distribution of Oxisols in Brazil [J]. Geoderma Regional, 2016, 7(2): 216-222.
- 姚志雄, 周健, 张刚, 等. 颗粒级配对管涌发展的影响试验研究 [J]. 水利学报, 2016, 47(2): 200-208.
- DESISTO S L, JAMIESON H E, PARSONS M B. Subsurface variations in arsenic mineralogy and geochemistry following long-term weathering of gold mine tailings [J]. Applied Geochemistry, 2016, 73: 81-97.
- 郑海君, 李洋, 蔡国军, 等. 温度循环条件下粉土质砂的物理力学特征研究 [J]. 中国测试, 2016, 42(2): 15-18.
- 杨凯, 吕淑然, 张媛媛. 尾矿坝中尾砂的强度特性试验研究 [J]. 金属矿山, 2014(2): 166-170.
- DIRGĖLIENĖ N, ŠARŪNAS S, GRIGUSEVIČIUS A. Experimental and numerical analysis of direct shear test [J]. Procedia Engineering, 2017, 172: 218-225.
- 蔡建. 原状土的抗剪强度研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 1965-1971.
- 辛保泉, 谭钦文. 局部高陡边坡对排土场整体稳定性的响应规律 [J]. 矿业研究与开发, 2016, 36(9): 41-45.

(编辑: 商丹丹)