某尾矿坝渗透和抗滑稳定性分析

张　超,杨春和

(中国科学院武汉岩土力学研究所,湖北 武汉　430071)

摘要:结合某尾矿坝的钻探资料,并利用大量土工实验所得到的各种尾矿坝坝体材料的物理力学性质的试验数据,揭示了该尾矿坝坝体材料空间分布状态及其力学特性.使用简化渗流计算方法确定坝体内浸润线的位置,并分析了尾矿坝的渗透稳定性.在渗透计算得出各种工况下浸润线位置的基础上,用极限平衡法和自动搜索计算程序 SLIDE 对该尾矿坝的抗滑稳定性进行了计算分析,得到了在 100 种不同坝体高程和不同运行情况下尾矿坝可能发生整体滑动与局部滑动时的抗滑稳定性安全系数.根据渗透稳定性和抗滑稳定性的计算分析结果,对尾矿坝的治理提出了一些建议.

关键词:尾矿坝;渗透稳定性;抗滑稳定性;浸润线

中图分类号:TV649　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1006-7647(2005)S1-0039-04

尾矿库扩容与新建一座尾矿库相比,从工程造价角度考虑还是非常经济的.我国不少中小型矿山在生产服务后期,尾矿库的改扩建都是在原尾矿库基础上加高扩容,利用和改建原有的排洪、排渗设施,延长了尾矿库的生产服务年限,取得了较好的经济效益和社会效益.但尾矿库坝不安全或失事,其破坏程度往往是灾难性的,不但造成矿山停产,也给当地的工农业生产带来灾害[1],因此必须从技术上论证尾矿库扩容的可行性,其中,尾矿坝加高之后的抗滑和渗透稳定性如何是能否扩容的关键.

某铜矿尾矿库 1965 年是按照选厂日处理 2 000 t 矿石,日排出尾矿 1 158 t 进行设计的.初期坝为均质土坝,坝顶高程 84.43 m,坝底高程 69.00 m,最大坝高 15.43 m;坝前、后坡坡比均为 1∶2.5,坝顶宽 3 m,坝轴线长 94 m;坝后坡高程 71.50 m 处,设有堆石排水棱体,最大高度 3 m,顶宽 1 m.设计用尾砂堆筑子坝,堆积子坝坡比为 1∶5,最终堆积高程为 120.00 m,有效库容 320 万 m^3.该尾矿库目前坝顶高程为 118.00 m,坝高 49 m,库容约为 300 万 m^3,根据坝高和库容可知该坝属Ⅳ级库.如果该坝继续使用并加高,当坝体高程达到 129.00 m 时,该库的等级将提升到Ⅲ级.由于尾砂面已接近最终设计高程 120.00 m,为确保矿山继续生产,尾矿库的扩容工作已经迫在眉睫.如果能将最终高程增加至 135.00 m,则可增加库容 230 万 m^3,可延长该尾矿库的使用年限 23 年,若最终堆积高程增至 130.00 m,则该库可继续使用 18 年,可见该尾矿扩容的经济效益还是相当可观的.

从现场勘测情况看,初期坝为均质土坝,筑坝土料为含碎石的亚黏土,碎石一般为强风化千枚岩,该筑坝土料较为松散,固结较差,其干密度平均值为 1.46 g/cm^3,说明初期坝填筑不够密实,会对初期坝抗滑稳定性和渗透稳定性带来不利影响.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.按颗分试验结果和塑性指数将尾矿砂、土分为六类:尾细砂、尾粉砂、尾亚砂、尾轻亚黏、尾矿泥(包括尾重亚黏和尾矿泥)等.对这些材料分别作了三轴固结不排水试验,为该尾矿坝的稳定性分析提供了可靠的依据.

1　尾砂物理力学特性

1.1　尾砂颗粒分析

尾矿是经磨碎的选矿弃物,成粉细砂土状,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、压缩变形和剪切强度性能,因而也决定坝体的稳定性.由大量的颗粒分析试验可知,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,一小部分大于 10,曲率系数 C_s 大部分在 0.5 ~ 2.5 之间变化.根据试样的颗粒分析结果可以确定其名称,然后根据取样深度就可以得到各个剖面的地质剖面图.该尾矿库在进行勘探取样时在主坝上一共设

作者简介:张超(1966—),男,湖北咸宁人,博士研究生,从事边坡、尾矿稳定性及土动力学研究.

计并布置了 3 条勘探线，其编号分别为 1—1，2—2，3—3，间距为 60 m.

1.2 尾砂力学性质

尾矿坝稳定性分析的可靠程度主要取决于各土质强度指标的准确程度，获得准确的力学性质指标是非常关键的. 为取得可靠的稳定性分析计算参数，进行了大量的直剪试验和固结不排水的三轴试验，三轴试验有 31 组共计 93 件试样. 三轴试验试样为直径 39.1 mm，高度为 80 mm 的圆柱形试样，三轴剪切试验在应变控制式三轴仪上进行，剪切速率为 0.055 mm/min.

经过大量的试验，得到了尾矿坝坝体材料的物理力学特性，其结果见表 1. 从表 1 可以看出从尾细砂、尾粉砂、尾亚砂、尾轻亚黏到尾矿泥，内摩擦角和渗透系数都有依次减小的趋势，且水平渗透系数约为垂直渗透系数的 4 倍，而它们的黏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.

2 渗透稳定性分析

本次分析分别考虑在现有坝顶高程条件下正常使用、洪水运行和排渗系统失效全饱和情况下的渗透稳定性，以及在假定的 125.00 m，130.00 m，135.00 m 坝顶高程条件下的正常使用和洪水运行情况下的渗透稳定性.

在正常使用情况下根据 ZBJ1-90《选矿厂尾矿设施设计规范》中“上游式尾矿坝渗流计算简法”计算剖面的浸润线及其出逸高程. 其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

$$L_i = 3.3 L_c^{0.48} \tag{1}$$

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

$$H_i = H + \frac{L_c - L_i}{m_0} \tag{2}$$

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（亦即沉积滩坡度为 $1:m_0$）. 浸润线位置参照文献[2]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

$$y = \left(h_i^2 - \frac{h_i^2 - a^2}{L - ma} x \right)^{1/2} \tag{3}$$

其中：

$$a = \frac{L}{m} - \left[\left(\frac{L}{m} \right)^2 - h_i^2 \right]^{1/2} \tag{4}$$

$$L = L_1 + \Delta L \tag{5}$$

$$\Delta L = m_0 h_i / (2m_0 + 1) \tag{6}$$

式中：a 为出逸点高度；m 为下游坡度系数；L，L_1，ΔL 的意义如图 1 所示.

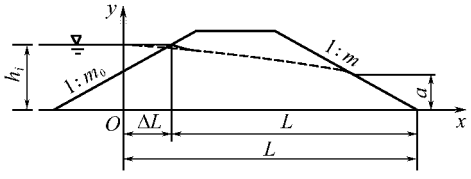

图 1 渗流计算示意图

然后在各种情况下的浸润线出逸点处验算其水力坡度是否满足渗流稳定性要求. 根据文献[2]知考虑黏聚力时的临界坡降为

$$J_c = \frac{\gamma_d}{\gamma_0} - (1 - n) + \frac{c}{\gamma_0} \tag{7}$$

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容重；γ_0 为水的容重；n 为孔隙率；c 为黏聚力. 渗流坡降应小于允许渗流坡降 J_y，J_y 按式(8)计算：

$$J_y = \frac{J_c}{F_s} \tag{8}$$

式中：F_s 为渗透安全系数，据文献[2]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.

根据上述方法计算尾矿坝正常运行状态下的浸润线方程如下：

$$y = \sqrt{2\,181 - 5.733x} \tag{9}$$

其中 $x = 0$ 的点表示浸润线和沉积滩的交点. 根据计算得到的浸润线可以找到出逸点，在该点进行渗

表 1 尾矿坝坝体材料物理力学性能指标

土 类	含水量 w/%	密度 ρ/(g·cm^{-3})	饱和密度 ρ_{sat}/(g·cm^{-3})	比重	孔隙比	抗剪强度参数				渗透系数/(10^{-5}cm·s^{-1})	
						总应力强度参数		有效应力强度参数		水平	垂直
						c_{cu}/kPa	φ_{cu}/(°)	c'/kPa	φ'/(°)		
尾细砂	17.6	2.151	2.263	3.23	0.766	0	28	0	35	16.34	4.34
尾粉砂	21.2	2.128	2.197	3.14	0.788	0	26	0	32	7.26	1.86
尾亚砂	23.1	2.065	2.120	3.01	0.794	5	20	3	29	5.32	1.54
尾轻亚黏	24.9	2.175	2.176	3.08	0.769	11	17	8	27	3.46	0.86
尾矿泥	27.3	2.084	2.061	2.84	0.735	10	16	4	24	0.64	0.15
筑坝土	35.2	1.961	1.964	2.76	1.012	8	22	5	30	0.17	0.16
坝基土	34.5	1.889	1.980	2.74	1.021	20	20	5	30	0.08	0.08

透稳定性分析.最后计算结果表明118.00 m高程洪水运行时和模拟坝高加高后的水位和洪水运行条件下,出逸点均在初期坝且其渗透稳定性均不能满足要求,因此有必要采取有效的工程措施降低初期坝的浸润线高度.

3 抗滑稳定性分析

该尾矿库扩容稳定性分析在尾矿坝主坝3个剖面上均进行,共考虑了3种运行情况,一是尾矿库处于正常工作状态,采用实测的浸润线位置;二是在洪水运行条件下,按百年一遇考虑,采用计算的浸润线位置;三是排渗系统失效的情况下.从《中国地震烈度区划图(1990)》查得铜矿矿区为地震基本烈度小于Ⅵ度地区,而该尾矿库属Ⅳ级库,扩容后是Ⅲ级库,且距离居民生活区较远,设计烈度可按Ⅵ度考虑.据SL203—97《水工建筑物抗震设计规范》总则的规定,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.

采用有效应力法对该尾矿坝稳定性进行分析,计算方法选用了简化毕肖普法(Bishop法)和瑞典法(又称Fellenius法)[3,4],分析结果表明两种计算方法在该尾矿坝稳定性分析中结果有一定差异,搜索的圆弧位置和所求相应的最小安全系数差别不大.用简化的毕肖普法和瑞典法分别计算分析该尾矿坝的整体和局部稳定性,共进行了100种计算方案的分析工作,瑞典法的计算结果如表2,简化毕肖普法的计算结果与瑞典法相差不大,限于篇幅,不再列出.

图2为剖面1—1相应的最小安全系数与滑弧面位置计算分析结果.从计算结果可知,3个剖面初期坝安全系数差异很大,这是由于初期坝坝基横切断面是漏斗形导致初期坝在各剖面厚度不均的地层差异所决定的.而堆积坝各剖面安全系数相对差异较小.

表2 瑞典法稳定性分析计算结果

计算剖面	坝顶高程/m	运行情况	安全系数	
			滑弧在初期坝	滑弧在堆积坝
1—1	118.00	正常运行	1.096	1.783
		洪水运行	0.866	1.684
		排渗失效	0.757	1.478
	125.00	正常运行	0.861	1.612
		洪水运行	0.832	1.558
	130.00	正常运行	0.830	1.424
		洪水运行	0.805	1.407
	135.00	正常运行	0.821	1.277
		洪水运行	0.794	1.260
2—2	118.00	正常运行	2.500	2.479
		洪水运行	2.59	2.308
	125.00	正常运行	2.406	2.077
		洪水运行	2.269	2.025
	130.00	正常运行	2.256	1.840
		洪水运行	2.135	1.763
	135.00	正常运行	2.170	1.717
		洪水运行	2.08	1.707
3—3	118.00	正常运行	1.211	2.172
		洪水运行	0.963	1.793
	125.00	正常运行	1.053	1.659
		洪水运行	0.910	1.612
	130.00	正常运行	0.913	1.450
		洪水运行	0.875	1.416
	135.00	正常运行	0.877	1.414
		洪水运行	0.864	1.331

4 结论与建议

稳定性计算分析结果表明,尾矿坝中初期坝部分的抗滑稳定性对浸润线的埋深特别敏感,初期坝在洪水运行和扩容加高以后的抗滑稳定性均不能满足要求,堆积坝如按1:5的坡度继续堆高基本不会出现问题,而尾矿库扩容和坝体加高之后,如不采取

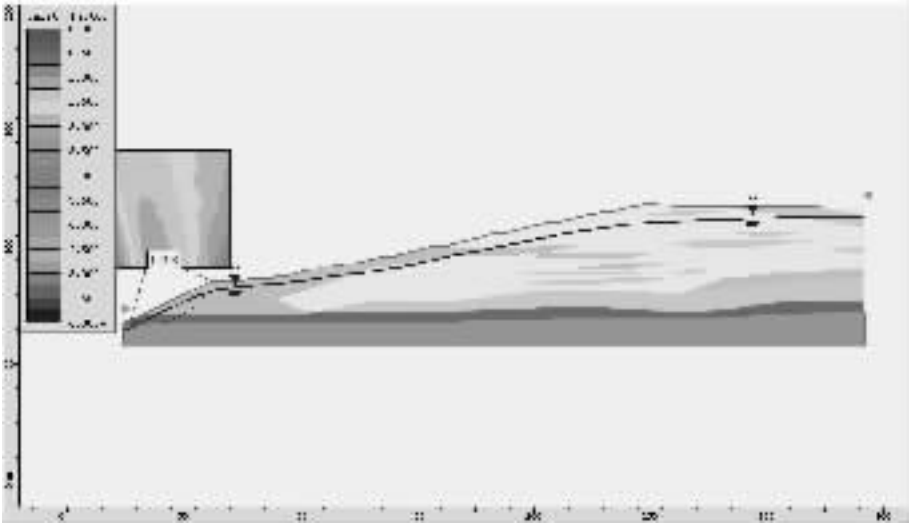

图2 1—1剖面稳定性计算分析结果示意图

有效措施，坝体浸润线将必然会随着坝体的增高而有明显的抬升，因此该尾矿库扩容工程可行性的关键就是要采取有效措施控制坝体浸润线的位置，使坝体在加高的过程中浸润线不会出现明显的抬升. 渗透稳定性分析结果表明坝体加高前后的初期坝的渗透稳定性均不满足要求，所以该尾矿库在考虑扩容之前应该对坝体进行综合治理，以确保浸润线的位置在坝体不断加高的过程中能得到有效的控制. 针对该尾矿坝的问题提出如下建议：①在堆积坝靠近初期坝处开挖一定深度设置排渗系统，降低浸润线以防止其在坝面逸出，同时也可增加初期坝的抗滑稳定性；②为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，建议在初期坝原有排水棱体处加设一道兼起贴坡反滤和镇压坡脚作用的干砌石挡墙；③建立完善的尾矿库监测系统，包括坝体垂直及水平变形监测、浸润线观测，加强尾矿坝坝坡面植被保护，防止被雨水冲刷.

参考文献：

[1] 汪云满，宋月明，徐志宏. 上游法尾矿坝加高扩容的加固处理措施[J]. 矿业快报，2002(9)：13-15.

[2] 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.

[3] 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，1995，239-256.

[4] 张超，杨春和，孔令伟. 某铜矿尾砂力学特性研究和稳定性分析[J]. 岩土力学，2003，24(5)：858-862.

(收稿日期：2004-09-22　编辑：熊水斌)

(上接第 38 页)

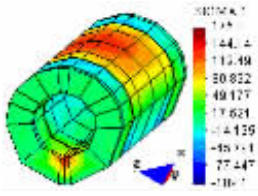

图 6　铰轴第一主应力

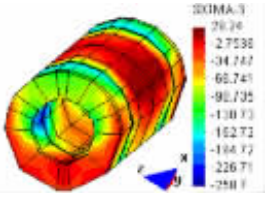

图 7　铰轴第三主应力

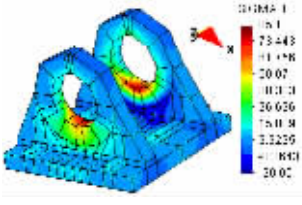

图 8　固定铰座第一主应力

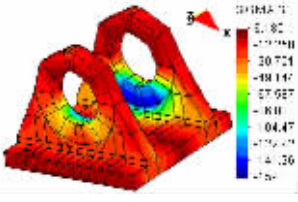

图 9　固定铰座第三主应力

表 1　支铰应力计算成果　　MPa

部　位	第一主应力	第三主应力
活动铰链	56.1	24.8
铰　　轴	175.8	258.7
固定铰座	85.1	159.8

4　结　论

将闸门和支臂及支铰作为整体考虑，在铰轴与活动铰链和固定铰链连接处采用薄层接触单元模拟其间只传递法向压力的特性，由此计算得到正常工作荷载作用下支铰各部件的应力分布是合理的，支铰各部件应力最大值为 258.7 MPa，小于规范所规定的容许应力值，说明在正常工作荷载作用下支铰各部件均能满足强度要求.

参考文献：

[1] 李同春，温召旺. 拱坝应力分析中的有限元内力法[J]. 水力发电工程学报，2002(4)：19-24.

[2] 卜小明，龙驭球. 一种薄板弯曲问题的四边形位移单元[J]. 力学学报，1991，23(1)：53-59.

[3] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 第二版. 北京：中国水利水电出版社，1998.

(收稿日期：2004-09-20　编辑：熊水斌)

·简讯·

中国工程院院士钱正英在河海大学作学术报告

2005 年 10 月 26 日下午，全国政协原副主席、中国工程院院士钱正英为为河海大学师生作了题为《人与河流和谐发展》的学术报告. 报告内容包括河流自身的发展规律、人类活动和河流演变的相互影响、我国河流的状况和问题、必须正确处理人与河流的关系 4 部分. 钱正英院士从河流的形成和发展、河流的自然功能、河流的基本特征阐释了河流自身的发展规律. 她指出，河流是一个巨大的系统，具有较强的抵御干扰能力，但如果干扰超过它的自我调节和自我修复能力，其自然功能也将不可逆转地逐渐退化，最终将影响甚至威胁人的生存和发展. 我国河流开发的历史久远，新中国成立以来，为适应社会经济的快速发展，以空前未有的速度和规模开发利用和改造河流. 对河流的大规模开发利用，也带来不少问题，主要表现为水质严重污染、下游河湖干涸、洪灾威胁依然严重、近海海域的生态系统退化，这些问题已经直接影响人民的生活和生产，并将危及社会经济的可持续发展. 正确处理人与河流的关系，需要研究并处理好总体要求和区别对待、合理配置水资源、保证河流的生态和环境需水、在规划设计和水利管理的各个层面上落实河流的生态和环境用水等问题.

(本刊编辑部供稿)