

其他

上游式尾矿坝的沉积规律

徐宏达

(冶金部建筑研究总院, 北京 100088)

[关键词] 上游式尾矿坝; 沉积规律; 断面计算

[摘 要] 上游式尾矿坝的设计建造和安全管理中常用到一些基本参数。如初期坝高度、堆积坝外坡比、沉积滩长度、尾矿颗粒沿滩面的分布规律等。目前常用的断面概化方法是勘察和筑坝实验方法, 都有一定的局限性。本文研究了分散排矿条件下常见尾矿的冲填沉积规律, 推荐了一个上游式尾矿坝计算断面的概化方法。

[中图分类号] TU413.6⁺2

[文献标识码] A

[文章编号] 1002-8951(2003)05-0040-04

The law of deposition about upstream tailings dam

XU Hong-da

(Central Research Institute of Building and Construction of MMI, Beijing 100088, China)

Key words: upstream tailings dam; the law of deposition; section calculation

Abstract: Some basic parameters are usually used in the design, construction and safety management of upstream tailings dam, such as the height of initial dam, the slope of fill dam, the length of sediment, and the distribution law of tailings size along the beach face. Now, survey and damming test method is the popular section generalized method, and which are unilateral. In this article the hydraulic deposition law under distributed exhaust for tailings conditions is studied, and a generalized method for calculating section of upstream tailings dam is recommended.

1 概况

上游法尾矿筑坝工艺简单、经济, 是我国广泛使用的方法。这种坝的设计建造和安全管理中常用到一些基本参数。如初期坝高度、堆积坝外坡比、沉积滩长度、坡度, 沉积尾矿颗粒沿滩面的分布规律等, 是分析尾矿库抗洪能力和尾矿坝稳定性的重要依据之一。

这些参数以及取得这些参数的技术路径, 在 ZBJ1-90^[1] 中基本未作规定。进行尾矿坝的稳定性等分析评价, 需要知道典型剖面的构造, 因为坝体构造和材料特性越符合工程实际, 对坝的分析结论

就越准确可信。

目前尾矿坝的安全鉴定和加高扩建, 通常采用钻探和试验的方法确定坝体构造和材料特性。钻孔可以提供准确的柱状图, 钻探描述的精度可以小于 5cm。许多原位测试方法也可以对沉积尾矿进行较为准确的分层。但由于尾矿沉积的随机性, 在根据这些单孔资料形成剖面的过程中必须需要某种推理和简化。钻孔间距越大误差越大, 加密钻孔可减少误差, 但勘察费将大幅度增加。

有的尾矿库在初步设计阶段专门安排室内或现场的筑坝试验。这种办法慎重科学, 但对试料要求高, 造价高。由于无统一报告整编规定, 有的报告只陈述实验结果, 不给出坝的概化断面。在不少设计方案的审查中, 只提供计算分析结果, 难得见到坝体中沉积尾矿的构造图。许多筑坝困难、抗洪能力不足、稳定性差的尾矿坝(库)都与尾矿沉积规律不清

[收稿日期] 2003-07-17

[作者简介] 徐宏达(1950-), 男, 山东滨州人, 高级工程师, 从事尾矿坝技术研究与管理工。

楚,概化分区有误,滩面坡度估计不准有关。当然后期不当的排矿作业,也会恶化坝体的沉积构造。总结研究沉积尾矿颗粒沿滩面的分布规律、推荐稳定计算断面概化的统一方法具有现时意义。

确定上游式尾矿坝的计算断面时,ZBJ1-90要求考虑尾矿的沉积规律,根据颗粒的粗细程度概化分区。规程没有根据原尾矿的粗细给出或推荐典型计算剖面,甚至没给出形成这种剖面的方法。业内设计人员通常根据自己的经验进行概化工作,做法也不尽相同。而且多数经验都建立在常见的、低浓度水力输送的砂、粉砂、粉土类尾矿,输送浓度大于30%或者粘土类尾矿则缺乏经验。新库设计、老库扩建和安全评价均需要统一的方法。

国家经贸委2000年第20号令发布的《尾矿库安全管理规定》要求对尾矿库的抗洪能力和抗滑稳定性进行安全评价,为了使尾矿库安全评价工作落到实处,有必要寻求一种广泛适用、经济合理的方法,确定分析计算所需数据。

本文首先介绍分散排矿条件下冲填尾矿沉积规律,再讨论上游式尾矿坝计算断面概化方法。

2 一般规律

(1)中、细砂类尾矿,这类尾矿颗粒较粗,平均粒径 $0.25 \sim 0.074\text{mm}$,小于 0.019mm 的粒级含量低。当分散排矿流量小于 10L/s 时,由于颗粒组、渗透性大、挟砂能力小,百米滩面的平均坡度可达 $3\% \sim 8\%$ 。滩面太陡的需大流量集中向库内排矿,以保持坝顶和滩面平衡升高。

(2)粉砂、粉土类尾矿,这是最常见的尾矿,平均粒径 $0.074 \sim 0.037\text{mm}$ 。当排放浓度为 $15\% \sim 25\%$ 、支管流量为 $10 \sim 30\text{L/s}$ 时,宏观沉积规律接近,粉土尾矿沉积滩面坡度稍缓,如图1。滩面上形成以排矿口为起点的扇形漫流区,这里的尾矿多为沉砂质。在两扇形区的交界处易形成弯曲主流槽,槽内矿浆流速大、挟砂能力也大,可将沉砂质和推移质送往更远处。进入池心区的矿浆迅速在水中扩散。大于 0.019mm 的颗粒也随之较快沉淀,形成水

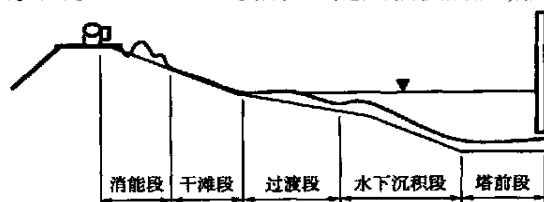


图1 冲积滩面示意图

下陡坡段。悬浮质的颗粒在池心区缓慢沉积,形成矿泥层。这类尾矿在50%左右的浓度,采用支管流 $8 \sim 15\text{L/s}$ 放矿,可形成300余米的沉积滩,坝前50m滩面坡度4%,190m的坡度1.6%,至水边330m的坡度为1.19%。沉积尾矿颗粒随滩面变缓而变细。坝前50m为中、细砂,50~100m为粉砂和粉土,100~200m为粉土和粉质粘土。但是沉积的砂性尾矿中含有原尾矿中的粘颗粒。

(3)粘土类尾矿,一般小于 0.037mm 粒组含量高于60%。我国的铁矿、锡矿、锰矿、铝矿等均有这类尾矿。在分散排矿条件下,支管排出的矿浆流在滩面上形成一个消能坑。矿浆从消能坑携带尾矿向四周流出,由于子坝的阻挡,矿浆流形成以子坝为直线边的扇形冲滩。推移质尾矿沉积在扇形区,悬移质尾矿被矿浆携向远处。有时,矿浆也在两扇形区相交处形成“弯弯小渠”,渠中细流较扇形区水深大、流速大,足以冲刷裹挟粗粒尾矿。但是,由于离开放矿口越远滩面坡度越平缓,流速越来越慢,形成均匀缓慢的泥浆流动。显然,这一段坡度较陡,由推移质尾矿组成,长约30余米,决定于全尾矿的粒度组成。此后,尾矿浆一面在重力下分选一面向前移动,同时,离析出的水以更快的速度流向池心。矿浆浓度增大流速减小,直到停止分选和宏观运动^[2]。根据流槽试验^[3],维持这种缓慢滑移流动的滩面坡度约为0.3%。这类尾矿采用分散放矿的上游法筑坝,通常满足不了规范和20号令关于滩长的规定,需要论证变通。

3 沉积滩坡度

(1)任意排矿长度 L 处的平均坡度 I_L 由下式确定^[4]:

$$I_L = I_{100} (100/L)^\alpha \quad (1)$$

式中: I_L ——任意排矿长度 L 的平均坡度;

I_{100} ——百米滩面的平均坡度,以小数计;

L ——任意滩长,m;

α ——衰减指数, $0.23 \sim 0.38$,可取0.3。

式(1)在双对数坐标中是一条直线,斜率即为衰减指数。当考虑排矿浓度、流量和尾矿粒径时,用式

(2)计算任意排矿长度 L 处的平均坡度 I_L :

$$I_L = (A \times d_p^{1.3} \times p^{\beta p}) / (q^{0.26} \times L^{0.3}) \quad (2)$$

式中: d_p ——加权平均粒径;

p ——矿浆的重量浓度;

q ——支管放矿流量;

A, β_p, β_d ——经验系数, 决定于流量、浓度、粒径等, 按表 1 采用。

表 1 经验系数

粒径 系数 A, β_p, β_d	β_p	$d_p \leq 0.074\text{mm}$		$d_p \geq 0.074\text{mm}$	
		A	β_d	A	β_d
$q \leq 10\text{L/s}$	0.12	4.27	1.3	0.95	0.72
$10\text{L/s} < q \leq 20\text{L/s}$	0.36	7.42	1.3	1.65	0.72
$20\text{L/s} < q \leq 30\text{L/s}$	0.6	10.92	1.3	2.43	0.72

(3) 从泥砂运动力学出发, 用六因素公式(3)归纳实验结果^[5], 假设滩面坡度 I 取决于尾矿比重 G_s 、水的比重 G_w 、加权平均粒径 d_{cp} 或中值粒径 d_{50} 、排矿浓度 C_w 、单宽流量 q 、滩面长度 L 。把筑坝实验所得指数与河床运动研究结果进行比较后, 表明: 采用描述河床运动的指数 $3/4$ 、 $-1/3$ 、 $-1/2$ 是可行的。南芬实验当 $K_3 = 0.3664$ 时, 指数为 0.7481 、 -0.3160 、 -0.4952 。

$$I = K_6 [(G_s - G_w) / G_w]^{1/2} d_{50}^{1/2} C_w^{3/4} q^{-1/3} L^{-1/2} \quad (3)$$

$$I = K_3 C_w^{3/4} q^{-1/3} L^{-1/2} \quad (4)$$

对于一个矿山, 通常矿石性质和选矿流程在一定时期变化不大, 尾矿的比重和粒径变化也很小, 式(3)可以简化为三因素公式(4)。为了与六因素系数 K_6 区别, 把式(3)的系数记为 K_3 。由于多数尾矿是粗砂和粘土粒组含量都不多的均匀材料, 平均粒径 d_{cp} 和中值粒径 d_{50} 非常接近。表 2 中多数为 d_{cp} 。不过对于明显缺乏粗或细粒组的尾矿, d_{cp} 和 d_{50} 差别将加大, 评价其特性应考虑有效粒径等特征粒径指标。

笔者根据室内模型实验和现场实测的 77 个资料筛选出部分资料(见表 2), 按式(3)(4)反算出 K_3 、 K_6 。 K_3 的算术平均值为 0.548 , 偏差 $S_K = 0.256$, $\sigma_K = 0.252$ 。有些尾矿要么颗粒过粗或过细, 要么浓度过大。因此上述经验可用于砂类和粉砂类尾矿分散排矿情况, 根据表 2 实例, 具体适用范围可表述为: 比重 $2.7 \sim 3.16$, 中值粒径 $0.037 \sim 0.27\text{mm}$, 有效粒径 $0.0024 \sim 0.066\text{mm}$, 排矿浓度 $10\% \sim 35\%$, 单宽流量 $0.2 \sim 7.35\text{L/s}$ 。对于含粘粒较多的尾矿和非分散排矿作业情况应慎重使用。

4 尾矿颗粒沿沉积滩长的分布

如前所述, 大多数矿山的尾矿浆排放浓度在

$10\% \sim 25\%$ 。近年来, 有的达到 $35\% \sim 50\%$, 未达到尾矿浆的不分选浓度(砂类 $65\% \sim 70\%$, 粉类 $55\% \sim 60\%$, 粘土类 $35\% \sim 40\%$)。因此, 尾矿浆在滩面上仍然有分选现象, 可描述为: 矿浆流出支管先经过消能坑和一个陡坡(见图 1), 称为消能段。这里沉积的大部分为沉砂质, 是粗化过程。然后由于流动中的重力分选作用和排矿过程中的“漫流”、“弯曲主流”现象, 流速各异, 冲淤不定, 粗化、细化、挟砂各种运动交替发生。滩面上很难形成均匀单一的沉积层(如粗砂、细砂、粉砂等), 即使在同一位置尾矿的粒度组成也不尽相同; 况且, 排矿流量、浓度也非常恒定不变。因此滩面上尾矿颗粒分布是随机的, 只能服从一种统计规律。图 2 是符山铁矿滩面取样的测试结果^[3], 其中前 5 个数据, 用的是三个剖面上多个数据(2~5 个)的平均值, 图中的曲线可用式(5)表示。也有人用滩长 L 的指数函数描述加权平均粒径 D_L 。对于排矿流量大于 20L/s 和小于 20L/s 分别使用式(6)和式(7)。

$$D_{50} = 0.192 - 9.432 \times 10^{-4} \times L \quad (5)$$

$$D_L = 1.386 d_p^{0.9} L^{-0.06} \quad (6)$$

$$D_L = 6.31 d_p^{0.9} L^{-0.45} \quad (7)$$

图 2 D_{50} 沿干滩长度的分布

5 上游法尾矿坝剖面概化的方法

尾矿冲填沉积区通常可划分为干坡段、过渡段和塔前段(见图 1)。根据我国大多数尾矿坝资料, 干坡段由消能漫流段和弯曲主流段组成, 尾矿的平均粒径在 $0.05 \sim 0.1\text{mm}$ 或更粗。过渡段的尾矿中以 $0.02 \sim 0.05\text{mm}$ 为主, 小于 0.02mm 粒组的含量显著增加。这个区段包括入水段和水下陡坡段, 尾矿组成与库内水位控制有关。塔前区段主要是静水条件下沉积的, 以 $0.02 \sim 0.005\text{mm}$ 以及小于 0.005mm 颗粒为主。

按这一模式, 只要选定了分界粒径, 就可使用式(5)(6)(7)中的任一式, 算出分界滩长。从而可沿水平方向做出分界点。从初期坝的内坡址起, 将这些同类点分别连线, 整个沉积尾矿就被分成了粗、中、

表 2 国内上游法筑坝实践以及现场和实验的典型结果

序号	工程名称	Gs	d_p/d_{50}	q L/s	p %	I_{100} %	K_6	K_3	多因素乘积	
			mm						X_3	X_6
1	杨家杖子	2.85	0.14	1.25	28	4.7	2.584	1.315	0.035 7	0.018 2
2	立山	2.80	0.055	0.833	20	1.8	1.799	0.566	0.031 8	0.010 0
3	立山	2.80	0.055	0.833	25	1.8	1.523	0.479	0.035 4	0.011 1
4	五龙	2.66	0.032	0.5	16	0.7	0.953	0.220	0.031 9	0.007 3
5	东鞍山	2.7	0.045	1.765	15	0.97	1.758	0.486	0.019 9	0.005 5
6	东鞍山	2.7	0.045	1.765	18	0.97	1.533	0.424	0.022 9	0.006 3
7	东烧	2.7	0.046	1.765	13	0.73	1.473	0.407	0.017 9	0.005 0
8	南芬	2.86	0.048	5.833	14.5	0.64	1.640	0.490	0.013 1	0.003 9
9	南芬	2.86	0.048	5.833	21.5	0.95	1.872	0.541	0.017 5	0.005 2
10	南芬	2.89	0.048	4.59	35	1.0	1.238	0.365	0.027 4	0.008 2
11	南芬	2.89	0.048	4.1	35	1.04	1.241	0.366	0.028 4	0.008 8
12	南芬	2.89	0.048	2.94	45	1.41	1.216	0.366	0.038 4	0.011 6
13	南芬	2.89	0.048	3.27	45	1.37	1.225	0.369	0.057 0	0.011 1
14	包头	3.52	0.038	1	10	1.36	2.478	0.765	0.017 8	0.005 5
15	包头	3.75	0.029	1.667	6	0.61	2.112	0.597	0.010 2	0.002 9
16	大石河	2.75	0.182	1	16	2	1.401	0.791	0.025 3	0.014 3
17	德兴	2.79	0.07	2	20	1	1.190	0.421	0.014 6	0.008 2
18	德兴	2.79	0.07	3	20	1	1.362	0.482	0.023 7	0.008 4
19	弓长岭	2.7	0.097	5	20	1.3	1.830	0.743	0.017 5	0.007 1
20	弓长岭	2.7	0.097	5	18	1.3	1.980	0.804	0.016 1	0.006 6
21	弓长岭	2.7	0.097	5	20	0.7	3.115	1.265	0.005 5	0.002 2
22	秦王坟	2.95	0.06	1.25	13	1.05	2.049	0.701	0.015 0	0.005 1
23	秦王坟	2.95	0.06	1.67	15	1.05	2.044	0.699	0.015 1	0.005 2
24	天宝山	3.2	0.044	0.125	25	2	1.438	0.448	0.044 7	0.013 9
25	小寺沟	2.58	0.062	0.3	25	1	1.048	0.328	0.030 5	0.009 5
26	小寺沟	2.58	0.062	2	25	1	1.972	0.617	0.016 2	0.005 1
27	尖山	2.84	0.043	0.87	35	2.08	1.551	0.436	0.047 7	0.013 4
28	尖山	2.84	0.043	0.89	40	2.30	1.564	0.440	0.052 3	0.014 7
29	尖山	2.84	0.043	0.685	48	0.79	0.429	0.121	0.040 9	0.039 6
30	符山	3.0	0.165	1	45	1.85	0.587	0.337	0.054 9	0.031 6
31	符山	3.0	0.165	1.25	50	1.6	0.695	0.399	0.008 6	0.005 8
32	符山	3.0	0.0165	1.25	50	4	0.892	0.512	0.008 1	0.004 8
33	矿山村	2.9	0.066	0.3	25	1	0.927	0.328	0.030 5	0.010 8
34	矿山村	2.9	0.066	2	25	1	1.232	0.436	0.022 9	0.008 1
35	援阿项目	3.35	0.092	0.556	6	1.9	1.960	0.912	0.044 7	0.020 8
36	援阿项目	3.35	0.073	0.893	8	1.8	1.753	0.815	0.022 1	0.010 1

细若干区(见图 3)。

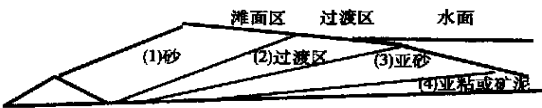


图 3 沉积剖面简化示意图

如果取粗砂、细砂、粉砂、粉土、粉质粘土的特征

粒径作为分界粒径,就可把沉积尾矿分成粗砂、细砂、粉砂、粉土、粉质粘土五个区。考虑到粗砂、细砂的强度差别不大,粉砂、粉土的强度也相差不多,从稳定性分析出发分为三个区即可。

中值粒径 d_{50} 可作为分界指标,根据若干实验结果一般中细砂的 $d_{50} \geq 0.125\text{mm}$; 粉矿 d_{50} 在
(下转第 49 页)

地下室外的压力地下水。如果屋面漏水。还可以对屋面进行翻修,但地下室如果漏水,则几乎没有翻修的可能性,因此地下室防水构造的设计要求需更加谨慎和周密。

为了解决地下水对地下室的压力问题,在国外的许多地下室工程中常采用双层地下室外壁的做法,即地下室作内、外两道墙,两墙之间留出一定空间,并在此作排水沟,地下室底板作架空层,用机械排水将渗入地下室的水排走,这种方法可以解决地下室使用空间不再受到地下压力水的侵扰,但这种做法的一次性投资及长期运转费均较高,且所占地下室空间较大,因此我国并不推荐采用此方法,除非在场地条件限制无法作迎水面外防水的工程中才会采用,如北京王府井百货大楼二期工程的地下室防水即采用了此种做法(王府井百货大楼二期工程与一期旧楼贴建,地下室结构施工为逆做法)。

在一般条件下,处理地下室防水的做法多采用堵截的方法,即在地下室的侧壁和底板外作柔性防水,再加上地下室底板和侧壁采用达到一定抗渗等级的防水混凝土,二者共同作用将地下水阻隔在地下室维护结构之外,笔者在长春一汽大众高层住宅(地下水位只有地表以下1~2m)等许多工程中的地下室均采用了这种构造,取得了很好的效果。

在实际施工过程中,由于地下室底板的外防水施工十分麻烦,耗费的时间较长,施工单位往往不愿

意按图施工,建设单位为将房产早日完工,也希望简化防水做法,二者联盟改变设计。在广东省就出现了大量的地下室外墙作了外防水,而底板则是内防水,这样做的结果往往是因防水混凝土的施工未达到抗渗等级,工程还未投入使用,地下室侧壁及底板已经有了大片的水渍,时间一久就变成了地下“蓄水池”。

底板内防水不能将地下水防住的原因是:外防水时,防水材料之后有几十厘米厚的混凝土作其“后盾”,因而可以抵抗住强大的水压,若防水材料设在内侧,在防水混凝土未达到抗渗要求失去作用时,只有靠薄薄的一层防水材料,它的背后是常压下的大气,则不能抵御强大的水压力。梅县铜箔厂主厂房由于是防腐蚀车间,整个车间的地面及墙壁内侧均采用了防腐蚀构造,地下部分采用了玻璃钢防腐,属于最高级别的内防水,加上设计采用的建筑外柔性防水构造及防水混凝土,从防水的角度来说应该说是万无一失,但由于当地施工单位既未按要求完成外防水构造施工,也未按要求采用足够标号的防水混凝土,因此地下室出现了较严重的漏水现象。地下室的防腐玻璃钢施工质量较好,但未能抵挡巨大的水压力,被渗入的地下水拱起了许多鼓包,且越来越大。为保证车间能够正常使用,只好将玻璃钢全部铲掉,重做柔性防水层、300mm厚的底板、侧壁及防腐层,使甲方及施工单位蒙受了很大的经济损失。

(上接第43页)

0.074mm到0.125mm;粉土 d_{50} 在0.037mm到0.074mm;粘性土 $d_{50} \leq 0.037$ mm。

如果需要在砂性尾矿中添加粘性土夹层,或者需要在粘性土中添加砂性透镜体,模拟冲填尾矿的复杂性,可以用全尾矿各粒组总量平衡的方法予以控制。添加的位置必须考虑排矿作业流程,筑坝工艺,地形地貌条件等因素。由于夹层对稳定性和渗流影响较大,设计中充分考虑夹层和透镜体的作用是慎重的。坝的失稳有可能发生在连续贯通的软弱面,而现在的稳定性计算程序对于复杂断面也能处理。

[参考文献]

- [1] 选矿厂尾矿设施设计规程[M]. 北京:计划出版社, 1991.
- [2] 徐宏达等. 高浓度尾矿堆筑上游法尾矿坝的研究与应用[R]. 冶金建筑研究总院研究报告, 1994, 11.
- [3] 徐宏达. 广东大顶铁矿尾矿坝沉积规律与剖面简化初探[R]. 冶金部建筑研究总院研究报告, 1999, 4.
- [4] 王治平. 尾矿冲填沉积堆坡度的变化规律及其简化计算方法[R]. 冶金部建筑研究总院资料, 1987, 12.
- [5] 王立久等. 南芬选矿厂二期尾矿坝高浓度堆筑实验研究报告[R]. 大连理工大学实验研究报告, 1988, 8.