

某大型上游式尾矿库堆坝研究与应用

Dam Stacking Research and Application of a Large-scale Upstream Tailings Pond

陈琴瑞^{1,2}

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 尾矿库灾害防控技术与装备国家矿山安全监察局重点实验室, 北京 100038)

摘要: 本文通过堆坝试验, 研究了在放矿浓度和流量两个因素作用下尾矿沉积滩形态和颗粒分选特性, 推荐最佳放矿浓度为 30% ~ 34%, 放矿单宽流量为 3.3 L/(s·m)。通过实际运行证明, 在推荐范围内, 尾矿沉积干滩较长, 滩面平整, 沉积坡度适中, 与堆坝试验结果基本吻合。

关键词: 上游式尾矿库; 堆坝试验; 放矿浓度; 放矿流量; 沉积特性; 分选特性

中图分类号: TD926.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)03-0070-06

Abstract: This article studied the tailings sedimentation beach morphology and particle sorting characteristics under the influence of two factors, namely discharge slurry concentration and flow rate, through dam stacking experiment. The recommended optimal slurry concentration is 30% to 34%, and the flow rate per unit width is 3.3 L/m. Through practical operation, it has been verified that within the recommended range, the tailings sedimentation has a relatively long dry beach, a flat beach surface and a moderate slope, which is basically consistent with the results of the dam stacking experiment.

Key words: upstream tailings pond; dam stacking experiment; discharge slurry concentration; flow rate; sedimentation characteristics; particle sorting characteristics

1 前言

尾矿库不仅是矿山不可或缺的生产设施, 更是安全环保工作的重中之重, 尾矿库的安全稳定直接关系到矿山的持续生产与周边环境的生态安全^[1-2]。目前, 我国尚有尾矿库约 5 000 座, 而鉴于上游法筑坝工艺简单、便于管理、成本低、适用性高等特点, 在我国得到了广泛应用^[3-4]。

伴随矿产资源的大规模开发, 以及尾矿库安全环保监管越来越严, 尾矿库选址难度大增, 多位于偏远山区, 离选矿厂距离越来越远。从降低尾矿运输成本考虑, 现多采用厂前浓缩、高浓度尾矿浆输送、坝前加水稀释后排放入库方式^[5-6]。对于上游式尾矿库, 大量工程实践表明, 入库尾矿的分选效果与坝体的稳定息息相关。若尾矿沉积后分选效果不佳, 坝前无法形成排水性能好、强度高的粗颗粒沉积滩, 大量细颗粒集中于坝前, 影响坝体的排水固结和稳定性, 有的工程甚至因排放浓度高导致沉积滩无法

固结, 承载力差, 无法筑子坝^[7]。

国内某大型矿山选矿厂排出尾矿量为 28 000 t/d, 新建尾矿库距选矿厂距离约 10 km, 采用上游法筑坝, 堆坝高度 128 m, 初期坝轴线长 450 m, 最终堆积坝轴线长 2 500 m。尾矿采用厂前浓缩至 55% 高浓度后输送至坝肩, 加水稀释再输送至坝顶进行轮流分散放矿。

当入库尾矿重量浓度超过 35%, 采用冲积法直接上游法筑坝时, 应进行尾矿堆坝试验研究^[8]。本项目选矿厂浓缩后的高浓度尾矿浆需要稀释至多大浓度进行放矿, 粗细颗粒分选效果最佳, 且所加稀释水量小。沉积滩形态如何; 坝前是否有足够的粗尾砂进行筑坝; 如何进行放矿才能使形成的干滩坡度与设计值(约 1%)相符; 分选尾矿的物理力学性质如何, 能否保证坝体稳定。这些问题需要进行堆坝试验研究。

2 影响尾矿沉积特性的因素分析

影响尾矿沉积特性的因素主要包括尾矿粒度、放矿浓度、放矿流量及药剂^[9-12]。

1) 尾矿粒度

尾矿粒度是影响上游式尾矿库能否筑坝和安全稳定最重要的因素, 当全尾矿 $d < 0.074$ mm 颗粒含

[作者简介] 陈琴瑞(1985—), 男, 河北保定人, 硕士研究生, 高级工程师, 从事尾矿处置与浆体管道输送咨询与设计工作。

[基金项目] 国家重点研发计划项目(2023YFC3012204)

[引用格式] 陈琴瑞. 某大型上游式尾矿库堆坝研究与应用[J]. 中国矿山工程, 2025, 54(3): 70-75.

量大于 85% ,或 $d < 0.005$ mm 颗粒含量大于 15% 时,一般很难采用冲积法直接上游法筑坝^[13]。

尾矿堆积坝从坝前至库尾一般包括沉积滩、沉积坡和矿泥区^[14],其中:①粒度 > 0.037 mm 者为沉积砂质,在动水中沉积较快,是形成沉积滩的主要部分;②粒度 $0.037 \sim 0.019$ mm 者为推移质,在动水中沉积较慢,是形成沉积滩的次要部分,是水下沉积坡的主要部分;③粒度 $0.019 \sim 0.005$ mm 者为流动质,在静水中沉积很慢,为矿泥沉积区的主要部分;④粒度 < 0.005 mm 者为悬浮质,在静水中也不容易沉积,形成水中悬浮物。

2) 放矿浓度

当尾矿粒度和流量一定时,放矿浓度越高,粗细颗粒分选效果越差。

3) 放矿流量

当尾矿粒度和放矿浓度一定时,流量越小,尾矿

沉积越快,形成的沉积滩坡度越陡。

4) 药剂

药剂主要为尾矿浓缩所添加的絮凝剂。但大量运行实践表明,经过输送泵及管道的搅动后,细粒级尾矿因絮凝剂所形成的絮团结构会被打散,对尾矿沉积和分选影响很小。

3 试验材料及过程

试验材料为该矿山选矿厂排出的尾矿,其固体密度和粒度组成已定,根据影响尾矿沉积特性的因素,堆坝试验即是研究在放矿浓度和流量两个因素作用下尾矿沉积滩形态(主要包括沉积滩厚度和沉积坡度)和粗细颗粒分选特性。

2.1 尾矿基础参数

该尾矿固体密度为 2.783 t/m^3 ,尾矿浆 pH 值为 $7 \sim 8$,粒度分布见表 1。

表 1 尾矿粒度分布表

粒径/ mm	0.5 ~ 0.25	0.25 ~ 0.096	0.096 ~ 0.07	0.07 ~ 0.051	0.051 ~ 0.037	0.037 ~ 0.0267	0.0267 ~ 0.019	0.019 ~ 0.01	0.01 ~ 0.0053	<0.0053
分选率/%	3.17	18.23	9.4	7.75	8.65	7.43	6.97	13.22	11.37	13.81
累计率/%	100	96.83	78.6	69.2	61.45	52.8	45.37	38.4	25.18	13.81

从表 1 可知,该尾矿 > 0.07 mm 的颗粒含量占 30.8%, $0.07 \sim 0.037$ mm 的颗粒含量占 16.4%, < 0.0053 mm 颗粒含量占 13.81%,整体颗粒分布均匀,从已运行类似粒度的尾矿库来看,该尾矿可以采用上游法进行筑坝。

固体颗粒在固液两相流中沉降,其颗粒沉降速度公式为

$$\omega = \frac{g(\rho_s - \rho)d^2}{18\mu} \quad (1)$$

从式(1)可以看出,固体颗粒沉速 ω 与颗粒粒度 d 、矿浆黏度 μ 、固体密度 ρ_s 、液体密度 ρ 有关。在固体密度和粒度一定下,颗粒沉速主要受尾矿浆黏度影响,黏度越大,颗粒沉速越小;同时当矿浆浓度较高时,细颗粒互相吸引团聚,形成絮网结构,浆体就会产生屈服应力,不仅细颗粒不沉,也可以阻止一定粗颗粒下沉^[15-16]。大量试验研究表明,浆体屈服应力和黏度与浆体浓度呈指数关系变化,因此降低浓度是增加颗粒沉降速度最直接有效的方法。该尾矿浆体不同浓度下的流变参数见表 2。

从表 2 可以看出,当重量浓度小于 38.6% 时,矿浆基本呈牛顿体,没有屈服应力,不形成絮网结

构,且黏度较小,有利于尾矿颗粒的沉降。

表 2 浆体流变特性参数表

重量浓度 C_w /%	屈服应力 τ_B /Pa	黏度/ $\text{mPa}\cdot\text{s}$
20.7	0	4.3
24.7	0	4.8
30.0	0	5.3
34.8	0	6.3
38.6	0.05	7.6

3.2 静态分选沉降试验

静态分选沉降试验的目的就是研究固体颗粒的沉降情况^[17-18],根据颗粒分选效果找出静态沉降时的临界分选浓度,筛选出沉降效果好的浆体浓度,以便在动态条件下进行放矿试验,优化放矿浓度。

静态沉降试验是在 1 000 mL 量筒中进行,一是测定上部浑液面的沉降高度,二是测定底部沉积层厚度。该尾矿浓度 20% ~ 40% 之间的 9 种矿浆的沉降曲线如图 1、图 2 所示。

从图 1 和图 2 可以看出:低浓度矿浆沉降速度快,但由于含砂量少,沉积层厚度增加速度慢;高浓

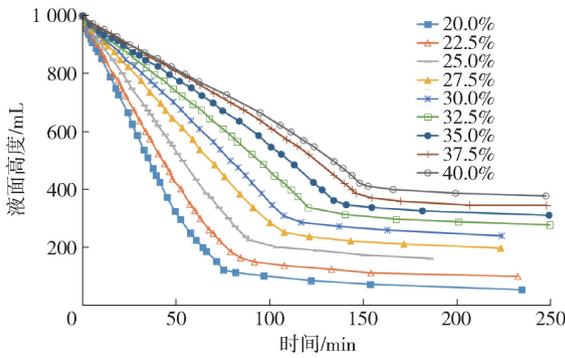


图 1 上部浑液面高度变化曲线

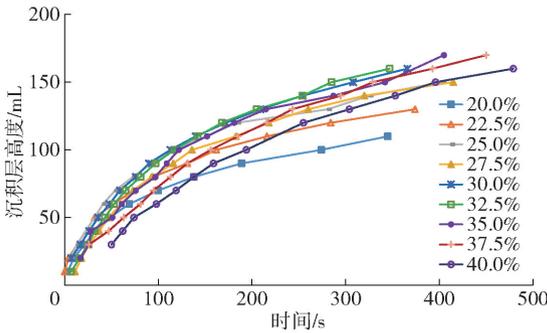


图 2 底部沉积层厚度变化曲线

度矿浆(浓度大于 35%)虽然含砂量足够多,但由于粗细颗粒之间互相干扰减缓了沉降速度,沉积层厚度增加速度也慢,浓度 40% 矿浆分选沉降不明显,基本为临界分选浓度,这也与流变特性参数给出的浓度基本吻合;中间浓度(30%左右)矿浆,浓度相对适中,粗细颗粒互相干扰较小,且具有一定的颗粒含量,从沉降速度、沉积层厚度和分选效果综合来看,沉降效果最好。

3.3 流槽放矿试验研究

流槽放矿试验是研究在不同放矿浓度和流量组合下,沿水流方向尾矿沉积形态及颗粒分选特性,以筛选出最优的放矿浓度和放矿流量,并测定在最优情况下尾矿的抗剪强度指标、干容重等物理力学参数。

由于尾矿坝一般比较长,放矿试验模型为沿放矿水流截取垂直于尾矿坝轴线、宽度很窄的条状剖面来模拟矿浆流动规律与沉降现象。试验装置为 30 cm 宽、40 m 长、自然坡度为 1% 的钢质流槽,在底板上随意钻取小孔,并敷设一层土工布,来模拟尾矿的排渗,加速沉积尾矿的排水固结。

尾矿浆在流动中沉积形态与含砂量 S 、放矿流量 Q 等因素有关。根据静态分选沉降试验,放矿浓度选定为 30%、34%、38%,即每立方米矿浆中含砂量 S 分别为 371 kg/m^3 、 435 kg/m^3 、 502 kg/m^3 ;每种浓度矿浆施放流量分别为 0.6 L/s 、 1.0 L/s 、 1.6 L/s ,则对应的单宽流量分别为 $2 \text{ L/s} \cdot \text{m}$ 、 $3.3 \text{ L/s} \cdot \text{m}$ 、 $5.3 \text{ L/s} \cdot \text{m}$ 。在实际运行中,如果放矿单宽流量与试验推荐值不符,可通过打开或关闭部分放矿口来进行调整。

按每种浓度对应三种单宽流量进行放矿试验,观察矿浆流动状况及沉积滩形态,并测定各相关试验参数。

1) 沉积滩形态及沉积坡度

浓度 30% 矿浆按三种流量放矿后形成的沉积滩形态如图 3 所示。

从图 3 可以看出,当放矿浓度一样时:



图 3 浓度 30% 尾矿浆放矿后形成的沉积滩形态

(1) 矿浆以 $2 \text{ L/s}\cdot\text{m}$ 小流量放矿时,由于流速低,一出放矿口,粗颗粒尾矿很快就沉积下来,大部分都沉积到距放矿口 5 m 范围内,随后含砂量变小,细尾矿也逐渐沉积,基本沉积在 30 m 范围内。前段沉积层厚,沉积坡度大,约 $3\% \sim 5\%$,后段沉积层薄,流槽内甚至出现滩、槽分界现象。

(2) 在以 $5.3 \text{ L/s}\cdot\text{m}$ 大流量放矿时,由于矿浆流速较快,水流把尾矿大量带向流槽下游,粗尾矿流动较远,出现下游沉积层偏厚的现象,整体沉积坡度偏小,不到 1% 。

(3) 在以 $3.3 \text{ L/s}\cdot\text{m}$ 流量放矿时,尾矿沉积滩形态比较好,沿线沉积厚度比较均匀,平均沉积坡度约 1% ,基本与设计值吻合。

同样,浓度 34% 和浓度 38% 矿浆在三种放矿流量放矿后形成的沉积滩形态与浓度 30% 矿浆基本一致。

因此,放矿流量对沉积滩形态和沉积坡度影响较大,结合设计干滩坡度值,建议放矿单宽流量控制在 $3.3 \text{ L/s}\cdot\text{m}$ 。

2) 沉积尾矿粒度组成

尾矿沉积成形后,在距放矿口不同位置取样,采用筛分法测定分选尾矿的颗粒组成。不同放矿浓度、不同流量组合下流槽沿程尾矿大于 0.074 mm 颗粒含量数据汇总见表 3。

表 3 沿程分选尾矿大于 0.074 mm 颗粒含量 %

放矿浓度/%	放矿流量/ $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$	距放矿口距离/m				
		1.2	5	10	20	33
30	2	72	55	17	5	2
	3.3	80	63	42	20	10
	5.3	80	65	40	25	14
34	2	76	46	34	4	1
	3.3	80	64	15	9	3
	5.3	81	69	46	26	14
38	2	81	65	48	15	2
	3.3	75	80	42	12	2
	5.3	81	79	50	48	21

根据表 3,绘制各浓度不同放矿流量下距放矿口不同距离的尾矿颗粒含量曲线,具体如图 4 至图 6 所示;并绘制在放矿流量 $3.3 \text{ L/s}\cdot\text{m}$ 时,不同浓度矿浆距放矿口不同距离的尾矿颗粒含量曲线如图 7 所示。

根据表 3、图 4 ~ 图 7,并结合尾矿沉积滩形态

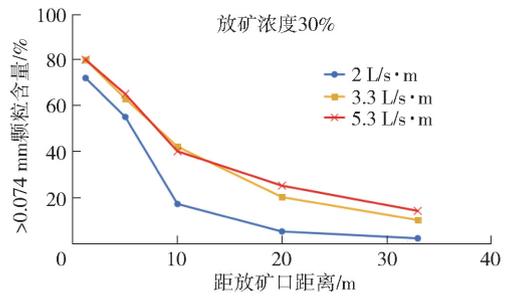


图 4 浓度 30% 矿浆沿程尾矿颗粒含量曲线

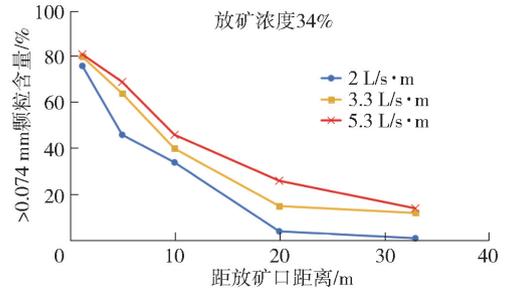


图 5 浓度 34% 矿浆沿程尾矿颗粒含量曲线

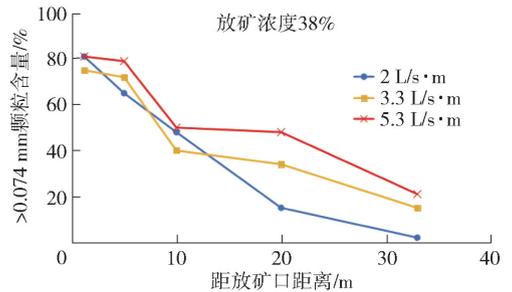


图 6 浓度 38% 矿浆沿程尾矿颗粒含量曲线

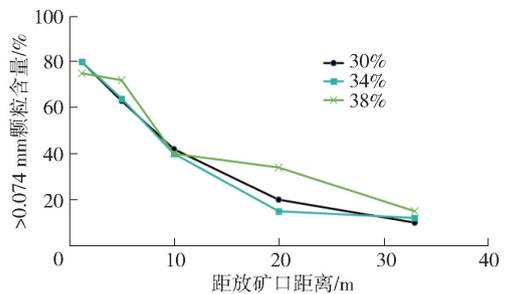


图 7 放矿流量 $3.3 \text{ L/s}\cdot\text{m}$ 时,沿程尾矿颗粒含量曲线

可以看出:

(1) 同浓度下,放矿流量对沉积分选影响比较显著。放矿流量小时,尾矿沉降速度快,粗尾矿在放矿口附近就大量沉积,细尾矿在不远处也逐渐沉积,尾矿流动距离短,沉积范围小,分选效果差;当放矿流量大时,水流强度大,尾矿沉降速度慢,流动距离远,粗尾矿能被带到更远处,并在沿程逐渐沉积,分

选效果较好。

(2) 相同流量下,低浓度矿浆沉降速度快,出放矿口后粗颗粒很快沉积下来,沉积范围适中,分选效果好;而高浓度矿浆沉降速度慢,粗颗粒尾矿被输送更远一些,有部分粗颗粒甚至被送到33 m之外,可能会影响后续堆坝用砂。

(3) 通过粒径级配曲线分析,浓度30%的矿浆沉积效果最好,颗粒分选明显,粒径组成均匀有序;浓度34%的矿浆沉积效果次之,但分选效果仍然较为明显;浓度38%的矿浆虽然也出现了分选沉降现象,但由于浓度较高,放矿过程中将一定比例的粗颗粒尾矿推到下游,将来会影响子坝堆筑用砂。

(4) 综合比较放矿浓度和流量对沉积效果的影响,流量是影响沉积效果的主要因素,浓度为次要影响因素。

从沉积滩形态、沉积坡度及分选尾矿粒度组成,并考虑尾矿库运行安全,建议放矿浓度按30%~

34%设计,放矿单宽流量控制在3.3 L/s·m左右。在此放矿浓度和流量范围内,沉积滩形态好,沿线尾矿沉积层厚度均匀,分选效果好,沉积坡度基本符合设计值。在实际运行过程中,可通过调整单宽放矿流量来调整干滩坡度,以保证尾矿库的安全高效运行。

3) 沉积尾矿物理力学参数

尾矿坝采用上游法填筑,其稳定性与沉积滩分选尾矿的物理力学性质息息相关。而沉积滩尾矿的物理力学性质在设计之初都是根据相关经验和规范选取,后期再通过工程地质勘察来进行复核和调整,由于受放矿浓度和流量等因素的影响,有时会相差很大。

本试验就是在流槽放矿试验的基础上,在尾矿沉积大约48 h,充分排水固结后,沿程取样,测定其物理力学参数,可供设计参考。

不同放矿浓度、不同流量下,沿程分选尾矿的抗剪强度指标见表4。

表4 分选尾矿抗剪强度指标

放矿浓度/%	放矿流量/ L/s·m	抗剪强度指标	距放矿口距离/m			
			1.2	5	10	20
30	2	黏聚力 C/kPa	0	0	2.6	5.2
		内摩擦角 φ/(°)	30.08	30.91	28.52	23.20
	3.3	黏聚力 C/kPa	0	0	0	1.2
		内摩擦角 φ/(°)	31.87	30.78	30.43	27.90
	5.3	黏聚力 C/kPa	0	0	0	0
		内摩擦角 φ/(°)	30.26	31.45	30.85	27.74
34	2 L	黏聚力 C/kPa	0	0	2.2	5.36
		内摩擦角 φ/(°)	31.95	30.75	27.65	24.21
	3.3 L	黏聚力 C/kPa	0	0	0	0
		内摩擦角 φ/(°)	31.59	31.04	29.71	26.75
	5.3 L	黏聚力 C/kPa	0	0	0	0
		内摩擦角 φ/(°)	31.36	33.60	30.39	26.43

从表4可以看出,在试验范围内:

(1) 除细颗粒含量比较大的试样产生黏聚力外,其余基本为0。

(2) 放矿浓度及流量对尾矿的抗剪强度指标均有影响,其中流量是影响抗剪指标的主要因素,浓度为次要影响因素。

(3) 在以2 L/s·m低流量放矿时,由于矿浆流速低,细颗粒很快也沉积下来,因此内摩擦角沿程下降很快;而以流量3.3 L/s·m、5.3 L/s·m放矿时,由于粗颗粒流动较远,内摩擦角沿程下降缓慢均匀,有利于尾矿坝的稳定。

不同放矿浓度、不同流量下,沿程分选尾矿的干

容重见表5。

表5 分选尾矿干容重(t/m³)

放矿浓度/%	放矿流量/ L/s·m	距放矿口距离/m			
		1.2	5	10	20
30	2	1.62	1.51	1.47	1.37
	3.3	1.59	1.49	1.44	1.44
	5.3	1.60	1.57	1.45	1.41
34	2	1.62	1.57	1.51	1.40
	3.3	1.55	1.53	1.56	1.45
	5.3	1.62	1.53	1.56	1.52

从表5可以看出:沉积形成的尾矿干容重随滩长增加逐渐减小,滩面平均干容重约为1.51 t/m³。

4 工程验证

本项目于2024年8月开始运行,尾矿输送及稀释放矿系统运行平稳,稀释后入库浓度约为30.7%,按28000 t/d计算,入库总流量为3053 m³/h。初期坝顶每隔13.2 m设1个放矿支管,共35根,规格为 $\phi 200 \times 11.9$ HDPE管,采用分段分散放矿,每组开17~20根,则入库尾矿单宽流量为3.2~4.2 L/s·m。实际运行入库浓度和单宽流量均在试验推荐数值范围内。

至今尾矿库滩顶尚低于初期坝坝顶,还未进行堆坝,沉积滩面上升均匀,干滩较长,滩面平整,坡度约1%,基本符合堆坝试验结果。后期待尾矿堆坝后,再沿滩面取样测定分选尾矿的粒度组成和抗剪强度指标,以与试验值进行对比。现状滩面实景如图8所示。

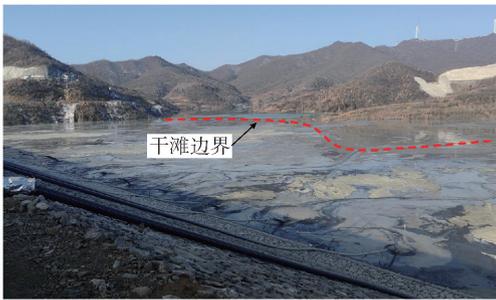


图8 沉积滩面现状实景图

5 结论

(1)降低尾矿浆浓度可以有效降低其屈服应力和黏度,增加固体颗粒沉降速度,利于沉降分选。从矿浆流变参数来看,临界分选浓度约为40%。

(2)沉积层厚度增加速度主要受矿浆浓度影响。矿浆浓度高,沉降速度慢,沉降层厚度增加速度慢;矿浆浓度低,虽然沉降速度快,但由于含砂量少,沉积层厚度增加速度也慢。浓度为30%左右的矿浆,含砂量和沉积速度均适中,沉降效果最优。

(3)流槽放矿试验表明:放矿流量是影响尾矿浆沉积效果的主要因素,浓度为次要影响因素。当放矿浓度一定时,放矿流量大,水流强度大,粗颗粒被推到很远的地方才沉积下来,滩面沉积坡度偏小,也有可能影响后期筑子坝用砂;而放矿流量小,尾矿颗粒在离放矿口不远处便会沉积下来,沉积坡度大,沉积范围小,分选效果差。推荐最优放矿浓度为30%~34%,放矿单宽流量为3.3 L/s·m,其放矿形成的沉积滩形态好,沉积坡度适中,沿程沉积层厚度

均匀,分选效果明显,粒径组成均匀有序。

(4)在推荐放矿浓度范围内,流量是影响分选尾矿抗剪指标的主要因素。以2 L/s·m低流量放矿时,由于细颗粒很快也沉积下来,分选尾矿内摩擦角沿程下降很快;以流量3.3 L/s·m、5.3 L/s·m放矿时,粗颗粒流动较远,尾矿内摩擦角沿程下降缓慢均匀,有利于尾矿坝的稳定。

(5)经工程验证,在以入库浓度为30.7%、放矿单宽流量为3.2~4.2 L/s·m进行放矿时,干滩较长,滩面平整,坡度适中,与堆坝试验结果基本吻合。

[参考文献]

- [1] 张昆仑,常玉光,潘洁,等. 基于MTBNet的唐山尾矿库提取[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2022,41(4):65-71.
- [2] 高峰,周积果. 尾矿库事故影响因素的重要性研究[J]. 中国矿山工程,2020,49(4):67-69,82.
- [3] 田文旗,谢旭阳. 我国尾矿库现状及安全对策的建议[J]. 中国矿山工程,2009,38(6):42-49.
- [4] 岑建,马艳晶. 某尾矿库筑坝方案比较分析[J]. 有色冶金节能,2021(1):67-70.
- [5] 陶武玲. 尾矿库高浓度输送低浓度排放新工艺分析[J]. 中国金属通报,2021(12):228-229.
- [6] 杨盛凯,王洪江,吴爱祥,等. 尾矿高浓度排放技术的发展概况及展望[J]. 中国安全生产科学技术,2010,6(5):28-33.
- [7] 岑建. 尾矿库安全规程解读[M]. 北京:应急管理出版社,2023.
- [8] 林子扬,王卫红,杨宏珺. 尾矿库不同溃坝形式的数值模拟研究[J]. 中国矿山工程,2023,52(6):12-16+21.
- [9] 郭晓霞,陈之祥,邵龙潭,等. 细粒铁尾矿的沉积特性与基本物理力学性质试验研究[J]. 岩土工程学报,2020,42(7):1220-1227.
- [10] 李慧谦. 尾矿库堆坝试验研究及稳定性分析[D]. 重庆:重庆大学,2008.
- [11] 李广治. 基于上游式快速高堆坝工艺及关键力学问题研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
- [12] 周汉民,崔旋,张宇,等. 细粒尾矿快速筑坝新技术及工程应用[J]. 中国安全生产科学技术,18(2):32-35.
- [13] 王绍周等. 粒状物料的浆体管道输送[M]. 北京:海洋出版社,1998.
- [14] 费祥俊. 浆体与粒状物料输送水力学[M]. 北京:清华大学出版社,1994.
- [15] 巫尚蔚,杨春和,张超,等. 尾矿浆沉积室内模拟试验[J]. 工程科学学报,2017,39(10):1485-1492.
- [16] 侯贺子,李翠平,王少勇,等. 尾矿浓密中泥层沉降速度变化及颗粒沉降特性[J]. 中南大学学报(自然科学版),2019,50(6):14-28.
- [17] 钱宁. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社,1983.