

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.08.007

不同排浆浓度下的尾矿沉积规律研究

张 雕¹, 王光进^{1,2}, 莘英铭¹, 董致成¹, 李小双³, 李耀基⁴, 眭素刚⁵

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093; 2. 云南省矿产资源开发与固废资源利用国际技术转移中心, 昆明 650093; 3. 江西理工大学安全工程系, 南昌 330013; 4. 云南磷化集团有限公司, 昆明 650600; 5. 中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司, 昆明 650051)

摘要:排放后的尾矿沉积规律影响尾矿库坝体的稳定性。为研究不同排浆浓度条件下尾矿沉积特性,以云南某尾矿库为研究对象,通过现场试验和室内缩尺的堆坝模型试验,研究了不同排浆浓度下的尾矿沉积规律,分析了单颗尾砂颗粒的临界状态,推导了尾砂颗粒运动—沉积临界速度关系和不同粒径颗粒在干滩上的运移距离公式。研究表明:沉积滩面的坝前位置粗尾砂沉积较多,随着距离坝越远,细粒尾砂沉积越多;在干滩面上尾砂流速与矿浆浓度呈负相关,与尾砂浆体压力呈正相关;较粘稠高浓度尾砂浆体的浓度越大,流动力就越弱,致使沉积形成的坡度越大;排浆浓度的逐渐增大,矿浆沉积长度也随之变长;尾砂颗粒在干滩面的沉积距离与排浆初始速度成正比,与干滩坡度、排浆浓度及颗粒粒径成反比。研究成果可对尾矿库坝体稳定性分析提供一定参考。

关键词:尾矿库;模型试验;排浆浓度;沉积规律

中图分类号:X936;440.25

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2023)08-068-10

Study on the law of tailings deposition under different discharge concentration

ZHANG Diao¹, WANG Guangjin^{1,2}, SHEN Yingming¹, DONG Zhicheng¹, LI Xiaoshuang³,
LI Yaoji⁴, SUI Sugang⁵

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, P. R. China; 2. Yunnan International Technology Transfer Center for Mineral Resources Development and Solid Waste Resource Utilization, Kunming 650093, P. R. China; 3. Department of Safety Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Nanchang 330013, P. R. China; 4. Yunnan Phosphate Group Co., Ltd., Kunming 650600, P. R. China; 5. China Nonferrous Metal Industry Kunming Survey Design Institute Co., Ltd., Kunming 650051, P. R. China)

Abstract: The deposition law of tailings after discharge affects the stability of tailings dam. In order to study the characteristics of tailings deposition under different slurry discharge concentrations, this paper takes a tailings

收稿日期:2023-04-28

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52174114);国家磷资源开发利用工程技术研究中心开放基金(NECP2022-07)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (52174114), and the Open Foundation of the National Engineering Research Center for Phosphorus Resources Development and Utilization (NECP2022-07).

作者简介:张雕(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为地质灾害工程,(E-mail)1066651240@qq.com。

通信作者:王光进,男,教授,博士生导师,主要从事矿山岩土边坡灾害预警研究,(E-mail)wangguangjin2005@163.com。

pond in Yunnan as the research object, and studies the tailings deposition law under different slurry discharge concentrations through field tests and indoor scale dam model tests. The critical state of single tailings particles is analyzed, and the relationship between the movement-deposition critical velocity of tailings particles and the migration distance formula of particles with different particle sizes on dry beaches are derived. The results show that there are more coarse tailings in the front of the dam of the sedimentary beach, and the farther away from the sub-dam, the more fine-grained tailings are deposited. The tailings flow velocity on the dry beach surface is negatively correlated with the slurry concentration and positively correlated with the tailings mortar pressure. The greater the concentration of the viscous high concentration tailings mortar, the weaker the flow force, and the greater the slope formed by the deposition; with the increase of slurry concentration, the deposition length of slurry also increases. The deposition distance of tailings particles on the dry beach surface is proportional to the initial velocity of slurry discharge, and inversely proportional to the dry beach slope, slurry discharge concentration and particle size. The research results can provide some reference for the stability analysis of tailings dam.

Keywords: tailings pond; model test; discharge concentration; deposition law

尾矿库一旦溃坝,将会对人民的生命和财产安全造成巨大威胁,而不同浓度筑坝浆体特性直接影响着尾砂颗粒沉积规律、沉积层倾角以及坝体的沉积结构特征。因此,探索尾矿库不同浓度浆体的沉积规律对尾矿库稳定性影响显得尤为重要。针对尾矿库不同浓度筑坝浆体沉积规律研究,国内外学者通过不同的试验方法开展了大量研究。尹光志等^[1]和敬小非等^[2]通过室内堆坝模型试验对堆坝过程中尾砂沉积规律进行了对比研究;巫尚蔚等^[3]通过显微试验和理论分析,研究了不同沉积距离的尾砂颗粒特征,建立了颗粒粒径与沉积距离的关系,讨论了两种尾矿沉积物的细观结构特征和分层划分依据,分析了尾砂沉积层形态的时空演化规律;史采星等^[4]和李宗楠等^[5]利用高浓度尾矿浆体的流变模型和宾汉模型,测试了不同浓度尾砂浆体的流变参数和推导了管输阻力计算公式;张东明等^[6]通过模型试验研究了上游法高浓缩分级尾砂堆积坝在水力分选作用下粒径的分布规律,得到高浓度尾砂沉积颗粒分布均匀,颗粒分选不明显的结论;唐永俊等^[7]采用试验和理论相结合的分析方法,研究了干滩尾矿粒径和坝体堆积尾矿的淤积特性;赵怀刚等^[8]利用室内筛分试验和恒定水流理论对尾矿颗粒的沉积特性进行分析,概括了尾砂颗粒在干滩面上为“粗化—缓慢细化—细化”的变化过程;Jopony等^[9]针对尾矿颗粒分布规律建立了粒径分布函数表达式;Fitton等^[10]利用流变理论,通过室内高浓度尾砂浆体流动试验得到浆体浓度对尾砂颗粒的流动性和沉积坡度影响;Kwak等^[11]和Henriquez等^[12]先后研究了水力作用下颗粒运动对沉积坡度变化的影响规律;Babaoglu等^[13]采用光滑粒子流体动力学(SPH)与“双黏度”模型模拟尾矿非牛顿流动行为的方法。对数值结果与试验结果进行对比,验证了模型的有效性,二者之间试验结果相似,尾砂颗粒间存在一定的排斥作用。余绍维等^[14]根据某上游法尾矿库堆积坝现场测得水力分选作用下粒径分布规律、沉积滩坡度变化和内部透镜体分布等库体结构;梁冰等^[15]采用自行研制的水力分选粒度分析装置研究了颗粒级配和排浆速度等因素对尾矿沉积规律的影响。上述学者们通过尾矿库筑坝模型试验、理论分析及现场勘察数据研究等方法对尾砂沉积规律进行了大量探索,但对于尾矿浓度变化引起排放流速改变从而导致库内尾砂沉积规律改变的研究还相对较少。

笔者以单颗粒尾砂受力分析为基础,通过研究颗粒受力极限平衡方程,提出尾矿浆体入库过程中固体颗粒状态判据,推导尾砂颗粒在干滩面上的沉积距离公式,并通过模型试验对所提出判据进行验证,探究不同排浆浓度对尾砂沉积规律的影响,对更好地了解尾矿库内部结构及渗流特性具有现实意义。

1 尾砂颗粒的运动特性分析

1.1 尾砂颗粒状态机制分析

如图1所示,尾矿浆从排浆管内流出后由于自身动能在坝前形成以消能坑为起点向尾矿库内呈扇形运动沉积。不同粒径颗粒的沉积距离决定了尾砂在干滩上的粒径效应,粒径较粗的尾矿沉积在坝前较近处,粒

径相对较细的尾砂向库尾运动。先沉积的尾矿也并非静止不动,在尾矿浆冲击力的作用下重新获得动能再次发生运移现象。在浆体的拖拽力、砂粒重力和摩擦阻力作用下,尾矿颗粒的运动状态主要与浆体浓度、流速、粒径大小和干滩坡度有关。由于不同尾矿库尾砂粒径大小和排浆速度不同,很难用尾砂粒径大小对尾砂状态进行判定,只有假定粒径不变的情况下,尾砂颗粒的运动—沉积规律才可以通过流体速度进行判定;当流体运动速度大于某一临界速度时,尾砂颗粒在水动力的作用下克服阻力,呈运动状态;当流体运动速度小于某一临界速度时,尾砂颗粒动力不足以克服阻力,呈沉积状态。



图1 尾矿库放矿堆积图

Fig. 1 Tailings pond drawing accumulation

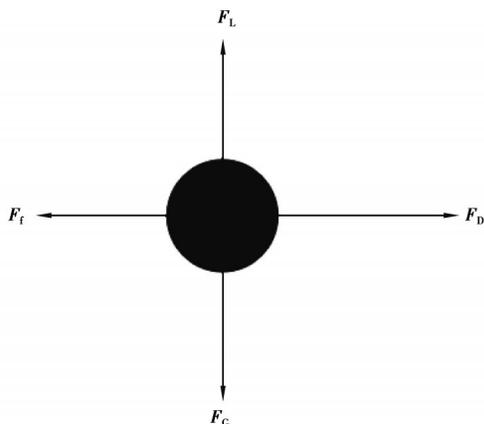


图2 尾矿颗粒受力分析

Fig. 2 Force analysis of tailings particles

1.2 浓度对尾矿颗粒影响分析

假设尾砂颗粒为球状,根据文献[16]对在浆体中运动的尾砂颗粒进行受力分析(如图2所示),考虑运动浆体中颗粒主要受到水流拖拽力、颗粒相互之间的摩擦力、上举力和自身重力作用下平衡,建立力矩平衡方程式:

$$F_f L_f + F_D L_D + F_L L_L = F_G L_G \quad (1)$$

式中: F_f 为摩擦力; F_D 为拖拽力; F_L 为上举力; F_G 为等效重力; L_f 、 L_D 、 L_L 、 L_G 分别为摩擦力臂、拖拽力臂、上举力臂和重力力臂。

令

$$L_D = L_L = L_G = L_f, \quad (2)$$

有

$$F_D = C_D A \frac{\rho v_0^2}{2}, \quad (3)$$

$$F_L = C_L A \frac{\rho v_0^2}{2}, \quad (4)$$

$$F_G = \frac{2(\rho_s - \rho) g r^2}{9\mu}, \quad (5)$$

$$F_f = f(F_G - F_L). \quad (6)$$

式中: v_0 为初始流速; f 、 C_D 、 C_L 为摩擦力、拖拽力、上举力系数; A 为颗粒面积; r 为颗粒半径; F_G 为颗粒等效重力; g 为重力加速度; μ 为流体粘度; ρ_s 、 ρ 分别为颗粒密度和浆体密度。

联立式(1)~(6),得到分离流速

$$v_c = \sqrt{\frac{(1-f)(\rho_s - \rho) g}{9\pi\mu\rho(C_D + C_L - C_L f)}} \quad (7)$$

由上式可以得出,当尾砂浆的粘度越大时,尾砂的分离流速越小。尾砂浆的粘度系数大小由物质种类、浓度、温度等因素决定。尾砂浆浓度越大时浆体的粘度越大,流速越小。设尾砂浆体的流速为 v ,则当 $v > v_c$ 。

时,尾砂颗粒处于运动状态;当 $v < v_c$ 时,尾砂颗粒处于静止状态。

1.3 尾砂沉积距离公式推导

从 1.2 对尾砂颗粒的受力分析可知,尾砂颗粒的分离流速与浆体粘度、颗粒密度、颗粒粒径、干滩坡度等有关。尾砂颗粒在干滩面的流动过程中,由于动能的消耗损失,颗粒的流动速度不断减小,当尾砂颗粒的流动速度小于分离流速时,该粒径的颗粒与水流分离,发生沉积,在干滩面上形成坝前粗库尾细的分布规律。引入矿浆流动的水流恒定总流能量方程^[17-18],并假定:

- 1) 尾矿浆体在干滩面为恒定流,总流流量在流动过程中不发生变化;
- 2) 在矿浆上的质量作用力只有重力;
- 3) 干滩面任意过流断面为渐变流;
- 4) 干滩过流面之间的流量保持不变。

即:

$$h_w = k_0 L v_L^2, \quad (8)$$

$$L_i + \frac{\alpha_1 v_0^2}{2g} = \frac{\alpha_2 v_L^2}{2g} + h_w. \quad (9)$$

式中: i 为干滩坡度; α_1, α_2 为动能修正因数; v_L 为尾砂颗粒到最远沉积距离 L 时的流速; v_0 为初始流速; k_0 为定值参数; L_i 为干滩两端总水头差; h_w 为干滩面之间的总流水头损失。计算可得

$$v_L = \sqrt{\frac{2gLi + \alpha_1 v_0^2}{\alpha_2 + 2gk_0 L}}. \quad (10)$$

联合式(7)和(10),当 $v_c = v_L$ 时粒径为 r_i 的颗粒会发生沉积,则有

$$L_c = \frac{9\pi v_0^3 \mu \rho \alpha_1 (C_D + C_L - C_L f) - g \alpha_2 (1-f) (\rho_s - \rho)}{2g^2 k_0 (1-f) (\rho_s - \rho) - 18\pi g \mu r_i (C_D + C_L - C_L f)}, \quad (11)$$

式中, L_c 为该粒径颗粒的最远沉积距离,可简化为

$$L_c = \frac{Y v_0^2 - X (\gamma_s - \gamma)}{N (\gamma_s - \gamma) - M}. \quad (12)$$

式中: γ_s 为固体颗粒容重; γ 为矿浆容重; M, N, X, Y 均为定值参数。

2 不同浓度尾砂筑坝模型试验

不同浓度尾砂筑坝模型试验是指在实验室条件下,按照实体原型,用不同比例尺(缩小、放大尺寸)模型,对工程中可能出现的问题或现象进行研究。通过堆坝模型试验,可以揭示和分析尾矿坝堆筑过程中颗粒沉积规律和坝体结构特性,以验证理论并解决工程实际问题。因此,采用模型试验模拟本文尾矿库的堆筑过程是比较理想的方法,试验的主要目的是研究不同浓度尾砂在筑坝过程中水平向和竖直向颗粒的沉积规律。

2.1 模型试验材料

试验材料为云南某尾矿库入库铁尾矿。现场勘查结果显示:筑坝尾砂分为尾中砂、尾细砂、尾粉砂和尾粉质粘土 4 种。为获得堆积尾矿物理力学性质,试验前对尾砂取样进行分析,并进行了土工试验及颗粒级配筛分试验,具体各项土工试验结果见表 1。

表 1 室内试验结果统计表
Table 1 Laboratory test results

统计项目	容重 $\gamma_s / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	饱和度 $S_r / \%$	塑性指数 $I / \%$	含水率 $W / \%$
尾中砂	1.99	94.10		12.20
尾细砂	2.02	81.90		14.10
尾粉砂	2.04	95.50	9.63	18.90
尾粉质粘土	1.89	98.61	14.89	23.70

为了满足原型与模型的主要参数相似,确保试验结果的相对可靠性,此模型材料均选用现场尾矿库内尾砂,现场尾砂粒径级配如图 3 所示。

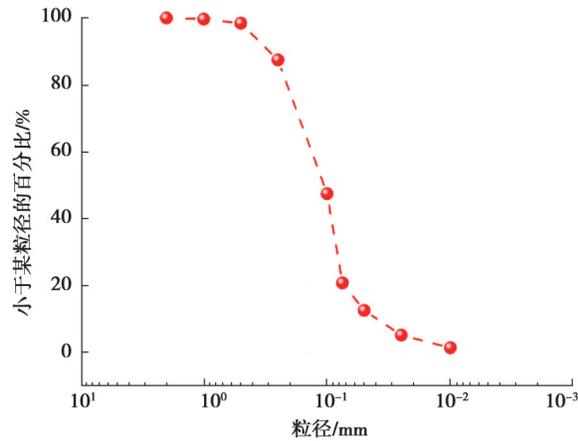


图3 尾砂粒径级配累积曲线

Fig. 3 Accumulation curve of tailings particle size gradation

2.2 模型试验装置

不同浓度尾矿沉积模型试验装置主要由以下几部分组成:试验沟槽、流态监测系统、排渗管、水位监测系统、搅拌系统、压力泵排放系统、沉积试验沟槽等,可以模拟现场尾矿排放的多种工况。为了实现尾矿排浆过程与现场相近,搅拌系统和压力泵排放系统包括3个2 m³的搅拌桶和一台大功率的砂浆压力泵,其整体排放性能与现场实际尾矿库可基本一致;试验沟槽按照真实地形缩尺而造,其长为12 m,宽为10 m,高为4 m,能为尾矿浆体的自由流动提供足够空间。矿浆搅拌机和矿浆压力泵分别控制放矿浓度和流速,试验沟槽底部设置排渗系统和水位监测系统,准确监测尾砂沉积结构的排渗效果。此外,为了实现对尾砂沉积全过程的研究,试验采用高速摄像机、三目相机等对试验全过程进行监测,模型试验装置如图4所示。



图4 模型试验装置

Fig. 4 Model test unit

3 模型试验结果与分析

本次试验中设计了7个不同浓度试验组,分别为20%、25%、30%、35%、40%、45%和50%尾矿浆体(指尾矿浆体中尾砂质量占比),分别从低浓度依次试验,每个浓度试验组沉积时间为24 h(确保每组试验能够沉积足够尾矿满足取样),共7组试验,如表2所示。每组均测量浆体沉积后干滩长度、干滩沉积坡度、干滩纵向含水率及沿程沉积粒径。

表 2 试验方案

Table 2 Experimental scheme

试验组数	尾矿砂浆体中尾矿质量百分比/%	沉积时间/h	浓度划分
1	20	24	低浓度
2	25	24	低浓度
3	30	24	低浓度
4	35	24	低浓度
5	40	24	高浓度
6	45	24	高浓度
7	50	24	高浓度

模型试验观测到的浆体流动特性与实际尾矿库基本一致,采用模型堆坝试验对不同浓度尾砂筑坝沉积规律进行对比模拟研究,展现了不同浓度尾砂在整个堆积过程中的尾砂粒径效应、坡比、含水率以及干滩的长度变化。试验成功地模拟了尾矿库筑坝过程普遍存在的尾砂沉积现象,如图 5 所示。

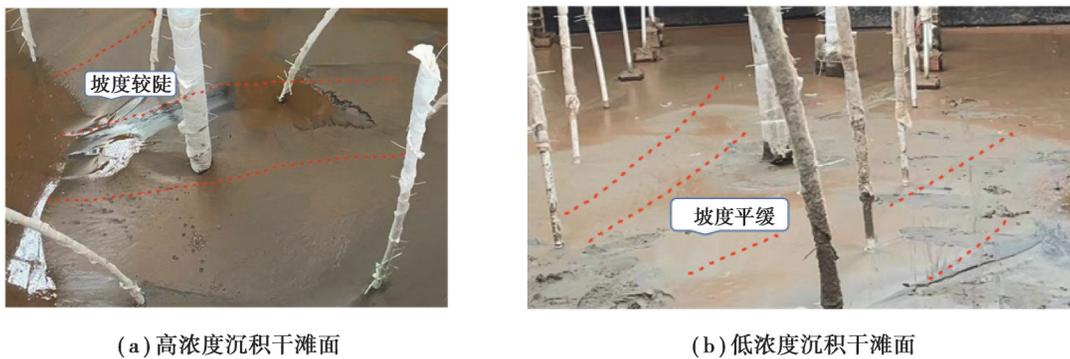


图 5 不同浓度尾砂堆坝形成的干滩面

Fig. 5 Dry beach surface formed by tailing dam with different concentration

3.1 模型水平向沉积规律

尾矿浓度是影响沉积规律的重要因素之一,如图 5 所示。当浓度较小时,矿浆中尾砂颗粒受力水平方向分量小,颗粒在水平方向的运动能力增强,在干滩面沉积的坡度平缓;反之浓度较大时,颗粒的受力水平分量小,使得浆体水平方向运动能力减弱,沉积的干滩坡度较陡。在图 6 中,低浓度矿浆从排浆口流出,在坝前沉积滩表面形成较大消能坑,由于矿浆从管口下泄时对沉积滩具有相对冲击力度,浆体中水流对周围沉积滩会产生冲刷,导致从坝前到库内有纵向冲击沟槽,浆体中的部分尾砂与沉积滩表层尾砂在冲击过程中会发生碰撞导致浆体中部分尾砂颗粒水平流速抵消发生沉积,而原沉积表层尾砂颗粒再次拥有流速发生向库内运移沉积现象。高浓度浆体在管内流动过程中由于粘度大没有很大的冲击力度,不能形成明显消能坑。

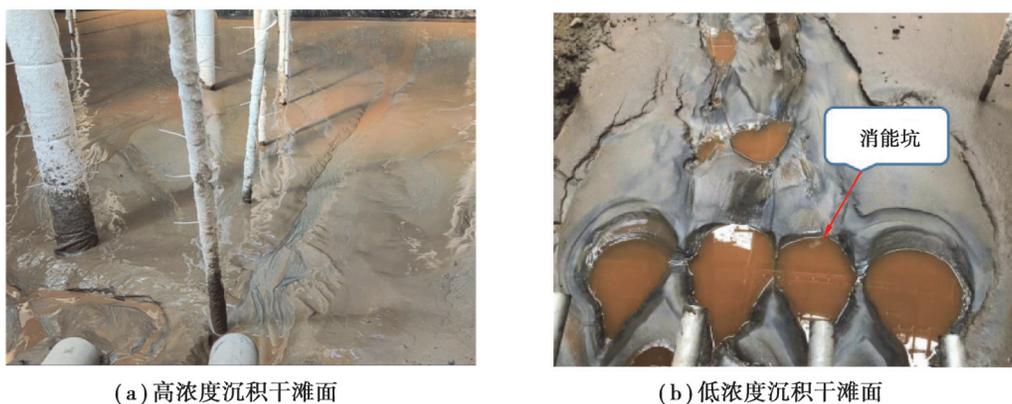


图 6 不同浓度尾砂坝前冲击效果

Fig. 6 Front impact effect of different concentration tailings dam

在每组排浆浓度沉积模型试验中,对放矿结束后尾砂堆积体形态、干滩坡度、干滩面长度和水面长度及不同流距干滩含水率进行测量,由图7~9可以得出,采用不同浓度尾砂浆体筑坝形成的干滩面存在以下几点特性:以子坝为起点,沿干滩往库内方向,随着尾砂浆体浓度增大,浆体在干滩形成的坡度越陡;尾砂浆体浓度逐渐增大,干滩面长度和库尾水面长度呈负相关;筑坝尾砂浆体浓度越低,沿干滩往库内方向,干滩含水率逐渐变大最终趋于平衡;根据含水率变化情况将干滩划分为:渐变区、突变区、稳定区3个区域,排浆浓度对渐变区和突变区含水率影响较大,由于稳定区处于干滩尾部库尾尾矿混合界面含水率几乎不受影响。

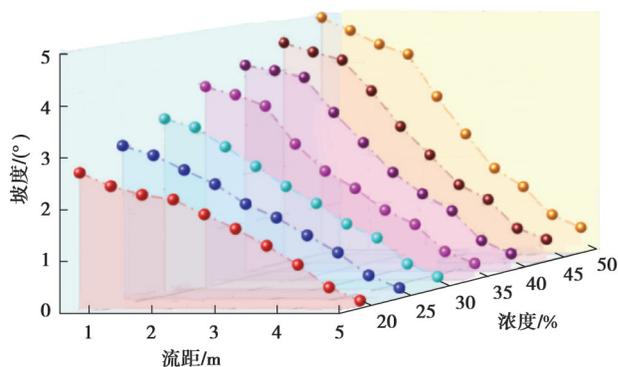


图7 不同浓度浆体形成干滩坡度

Fig. 7 Different concentrations of slurry form dry beach slope

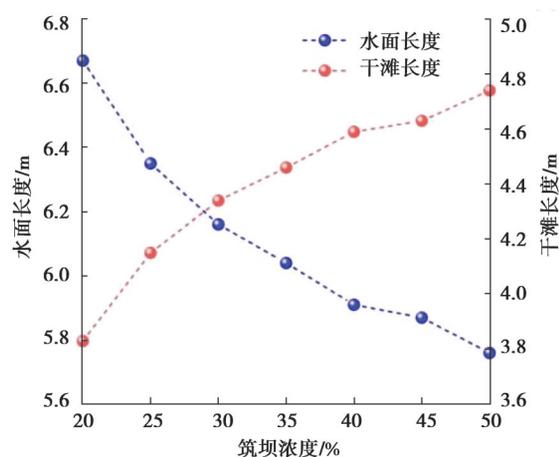


图8 不同浓度干滩面和水面长度变化曲线

Fig. 8 Curve of length of dry beach surface with different concentration

根据试验数据得到7种不同浓度下中值粒径 d_{50} 位置的变化情况,如图10所示:尾矿浓度小分选性好,颗粒由粗到细随距离的变化明显,反之分选不明显。取中值粒径为0.115 mm为研究对象,得到排浆浓度为20%、25%、35%时对应离子坝距离为0.5 m、1.0 m、1.5 m。从图中可以看出排浆浓度低时在干滩表面沉积平均粒径曲线平缓,这是因为排浆浓度低时尾砂颗粒受到的上举浮力和浆体对颗粒的冲击力大,导致尾砂颗粒在干滩表面分布均匀。与之相反排浆浓度高,部分粗粒尾砂没有足够的拖拽力使其向库内运移,只有细粒尾砂在库内沉积。根据沉积分布情况可得:不同排浆浓度尾砂沉积沿子坝往库尾方向,在干滩面沉积的尾砂颗粒平均粒径逐渐变小,总体上呈现坝前粗库尾细的沉积规律。

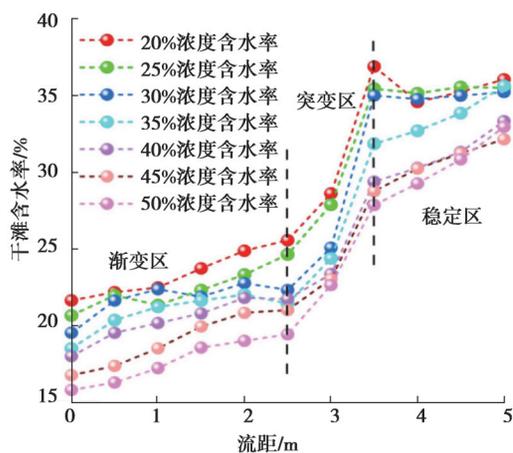


图9 不同流距干滩含水率

Fig. 9 Dry beach moisture content at different flow distances

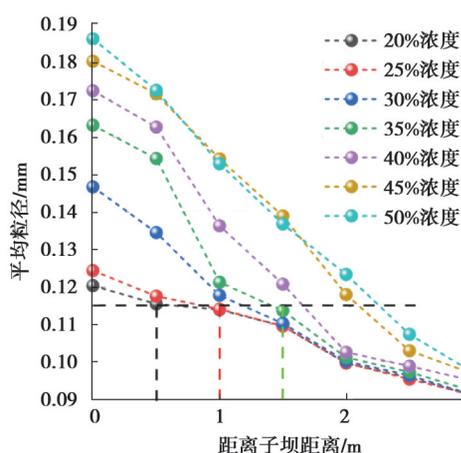


图10 不同浓度尾砂平均粒径沿干滩面的变化规律曲线

Fig. 10 Variation of average particle size of tailings with different concentrations along the dry beach surface

3.2 模型竖直向沉积规律

尾砂颗粒在竖直向的沉积特性对于滩面固结强度和尾矿库的稳定性评价有着重要的指导意义。图 11 为坝体不同浓度筑坝的竖直剖面沉积图,从图中能够清晰观察到尾砂沉积后有明显的分层现象,其原因是在往上筑坝过程中,当排浆管中浆体流完后干滩面上的浆体在流动过程中粗粒尾矿受自身重力和流体阻力影响在沉积滩上就地沉积,而由于浮力作用尾矿泥后沉积并附着在沉积滩表面,自身拥有黏滞性的尾矿泥黏结在沉积滩面,产生较大的摩擦阻力,很难被冲刷重新启动,每次排浆管的重新启动都会有新的尾砂浆在原干滩沉积层上发生新一轮沉积,如此重复交错的沉积使尾砂沉积在竖直向上出现交错层理的沉积结构,产生明显的分层现象^[19]。

不同范围颗粒粒径在不同深度的含量变化趋势如图 12 所示。从图 12 可以看出宏观上随钻孔深度增加粗颗粒减少而细颗粒增加,竖直剖面尾砂颗粒平均粒径随高度的增加逐渐减小,呈现上粗下细的规律。同时随着钻孔深度增加颗粒粒径出现交错变化,粗细相间的交错夹层现象。导致这种现象主要原因是在排浆过程中每次排浆结束后在表面都会沉积一层较细颗粒,经过这样很多次重复沉积在竖直向上就会出现交错层理的沉积结构。

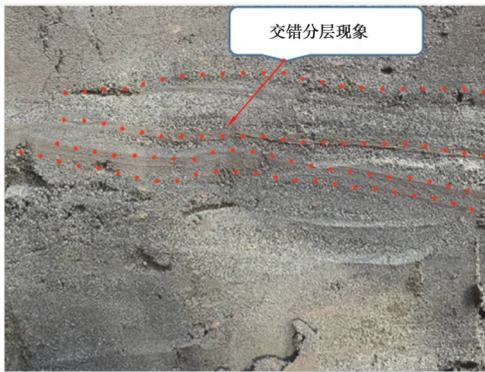


图 11 不同浓度尾矿筑坝剖面图

Fig. 11 Profile of tailings dam construction with different concentrations

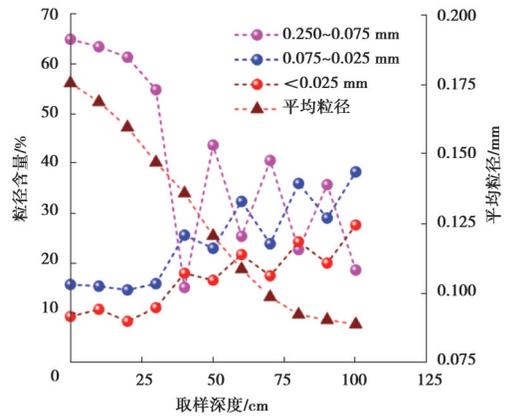


图 12 不同粒径在不同深度的含量变化趋势

Fig. 12 The content variation trend of different particle sizes at different depths

4 现场工程实测

4.1 测量方法

干滩面尾砂颗粒分布规律测量通过现场取样,并用激光颗粒分析仪进行粒径分析。本次测量从子坝开始沿干滩面往库区内选 4 个典型放矿支管进行纵向取样,每条纵向取样线长约 45 m,每个尾砂样间隔 1.5 m,纵向共取样 120 个。在距离坝前 30 m 处进行横向取样,取样的起始点涵盖 4 个放矿支管,横向取样采取每隔 3 m 进行,横向共取样 35 个尾矿试样,如图 13 所示。



图 13 尾矿库干滩面取样

Fig. 13 Tailing pond dry beach surface sampling

4.2 测量结果及其分析

堆积尾砂沉积规律受尾矿性质、粒度、矿浆浓度和排放形式控制。根据勘察结果和各项控制因素的分析及对室内土工试验的统计分析,对堆积尾砂的沉积规律认识如下。

1) 堆积尾砂水平面上坝前粗、库尾细的特点

当尾矿浆液由坝顶向库尾流动时,根据水动力规律,随着浆液的流动,水力梯度逐渐消散,浆液所能携带尾矿的能力逐渐降低,从而尾矿逐渐按照颗粒由粗到细依次沉淀下来,从而在干滩面上,形成了坝前粗库尾细的沉积特点。根据本次勘察结果,对位于同一高程面土试样的平均粒径 d_{50} 进行统计分析,并绘制成平均粒径 d_{50} 的变化曲线,从图14的变化曲线可以看出尾砂堆积大致具有坝前粗库尾细特点。

2) 堆积尾矿竖直向上具有上粗下细的特点

当尾矿浆由坝顶向库内流动时,随着水力梯度的消散,每层平面上尾矿逐渐按照颗粒由粗到细沉淀下来,随着堆积坝的升高,坝顶不断向上游推移,对于每一固定的纵断面来说,其浆液流动的里程在逐段减小,浆液经过该断面时所能携带的尾矿颗粒的粒径在逐渐增大。因此,随坝体加高,子坝向上游的推移,该断面上即呈现出上粗下细的沉积特性。根据现场勘察成果,选取部分钻孔分别对其不同深度的土试样的平均粒径 d_{50} 进行统计分析,并绘制成平均粒径 d_{50} 的变化曲线,从图15的变化曲线可以看出尾矿堆积大致具有上粗下细的趋势特点。

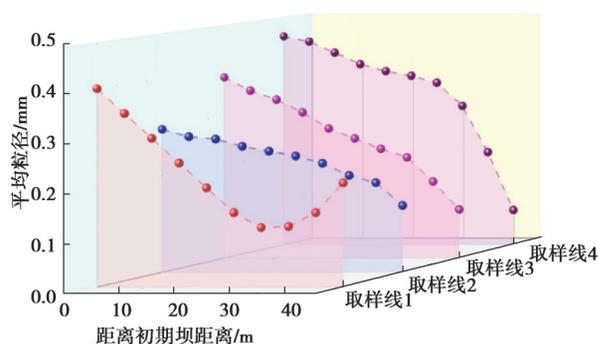


图14 四条取样线平均粒径变化曲线

Fig. 14 Average particle size change curve of four sampling lines

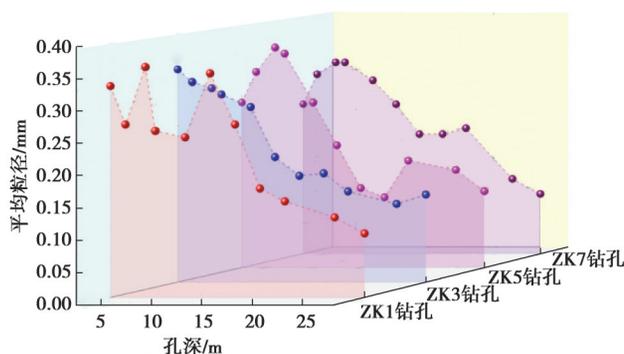


图15 不同钻孔土试样平均粒径 d_{50} 随孔深变化曲线

Fig. 15 The average particle size d_{50} of different drilled soil samples varies with hole depth

5 结论

1) 不同排浆浓度尾砂流动沉积过程中,干滩面的沉积尾砂在纵向上表现为前粗后细的特点,而在竖向上具有上粗下细的沉积特性,高浓度尾砂在筑坝过程中由于浓度较高自身拥有的粘滞性较大与沉积滩面之间产生较大摩擦阻力,很难被冲刷重新启动,从而出现明显的分层现象,且低浓度尾砂矿浆排放沉积的交错夹层结构现象更为显著。

2) 不同排浆浓度尾砂流动沉积过程中,高浓度尾矿矿浆形成的干滩面坡度明显大于低浓度矿浆形成的干滩面坡度,高浓度矿浆排放形成的坡度一般在2.00%~3.50%,而低浓度尾砂矿浆排放形成的坡度较平缓,为0.15%~2.00%。

3) 不同排浆浓度尾砂流动沉积过程中,不同浓度尾砂沉积粒径总体表现为排浆浓度越小粒径沿沉积距离变化越明显,分选性越好,干滩面长度越短,高浓度筑坝干滩面长度较长,尾水面较短。

4) 分析了单颗尾砂颗粒的临界状态,推导了尾砂颗粒运动—沉积临界速度关系和不同粒径颗粒在干滩面上的运移距离公式。推导出不同浓度尾砂筑坝在干滩面的运移距离,尾矿颗粒在干滩面上的沉积位置与排浆的初始流速成正比,和干滩坡度、排浆浓度及颗粒粒径等成反比。

参考文献

- [1] 尹光志, 敬小非, 魏作安, 等. 粗、细尾砂筑坝渗流特性模型试验及现场实测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 3710-3718.

- Yin G Z, Jing X F, Wei Z A, et al. Study of model test of seepage characteristics and field measurement of coarse and fine tailings dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 3710-3718. (in Chinese)
- [2] 敬小非, 尹光志, 魏作安, 等. 模型试验与数值模拟对尾矿坝稳定性综合预测[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2009, 32(3): 308-313.
- Jing X F, Yin G Z, Wei Z A, et al. Model test and numerical simulation of tailing dam safety forecasting[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2009, 32(3): 308-313. (in Chinese)
- [3] 巫尚蔚, 杨春和, 张超, 等. 干滩表层沉积尾矿的细观几何特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(4): 768-777.
- Wu S W, Yang C H, Zhang C, et al. Microscopic geometric characteristics of surface sedimentary tailings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(4): 768-777. (in Chinese)
- [4] 史采星, 郭利杰, 杨超, 等. 某铜镍矿尾矿流变参数测试及管道输送阻力计算[J]. 中国矿业, 2018, 27(B10): 138-141.
- Shi C X, Guo L J, Yang C, et al. Experimental study of the rheological parameters of a copper nickel mine tailings and calculation of resistance in pipeline transportation[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(B10): 138-141. (in Chinese)
- [5] 李宗楠, 郭利杰, 余斌, 等. 基于宾汉姆体的高浓度尾砂浆剪切变稀规律研究[J]. 黄金科学技术, 2017, 25(4): 33-38.
- Li Z N, Guo L J, Yu B, et al. Shearing thinning behavior of high concentration slurry based on Bingham model[J]. Gold Science and Technology, 2017, 25(4): 33-38. (in Chinese)
- [6] 张东明, 郑彬彬, 尹光志, 等. 高浓缩分级尾矿上游法堆坝及模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 1832-1838, 1867.
- Zhang D M, Zheng B B, Yin G Z, et al. Model tests on upstream dam-building method using concentrated and classified tailings[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(7): 1832-1838, 1867. (in Chinese)
- [7] 唐永俊, 王光进, 许志发, 等. 尾矿库干滩尾矿粒径的淤积特性研究[J]. 泥沙研究, 2018, 43(3): 50-56.
- Tang Y J, Wang G J, Xu Z F, et al. Study on deposition characteristics of tailings particle size in dry beach of tailings pond[J]. Journal of Sediment Research, 2018, 43(3): 50-56. (in Chinese)
- [8] 赵怀刚, 王光进, 许志发, 等. 多因素影响下尾矿库坝体沉积特性的试验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(5): 95-101.
- Zhao H G, Wang G J, Xu Z F, et al. Experimental study on deposition characteristics of tailings dam body influenced by multiple factors[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(5): 95-101. (in Chinese)
- [9] Jopony M, Usup G, Mohamed M. Particle size distribution of copper mine tailings from lohan ranau Sabah and its relationship with heavy metal content[J]. Pertanika, 1987, 10(1): 37-40.
- [10] Fitton T G, Bhattacharya S N, Chryst A G. Three-dimensional modeling of tailings beach shape[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2008, 23(1): 31-44.
- [11] Kwak M, James D F, Klein K A. Flow behaviour of tailings paste for surface disposal[J]. International Journal of Mineral Processing, 2005, 77(3): 139-153.
- [12] Henriquez J, Simms P. Dynamic imaging and modelling of multilayer deposition of gold paste tailings[J]. Minerals Engineering, 2009, 22(2): 128-139.
- [13] Babaoglu Y, Simms P H. Simulating deposition of high density tailings using smoothed particle hydrodynamics[J]. Korea-Australia Rheology Journal, 2017, 29(3): 229-237.
- [14] 余绍维, 孙华, 王兆昌, 等. 上游法尾矿坝堆积尾矿的沉积规律与尾矿堆积坝管理的相关关系[J]. 中国新技术新产品, 2013(6): 175-177.
- Yu S W, Sun H, Wang Z C, et al. Correlation between the deposition law of tailings accumulated in upstream tailings dam and the management of tailings accumulation dam[J]. China New Technologies and New Products, 2013(6): 175-177. (in Chinese)
- [15] 梁冰, 吕志强, 金佳旭, 等. 排浆速度对尾矿沉积影响的模型试验研究[J]. 实验力学, 2017, 32(6): 880-887.
- Liang B, Lv Z Q, Jin J X, et al. Model experimental study of effect of slurry draining speed on tailings deposition[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(6): 880-887. (in Chinese)
- [16] Huang S H, Li W, Cheng L J. On equation of discrete solid particles' motion in arbitrary flow field and its properties[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2000, 21(3): 297-310.
- [17] 郑艳娜, 朱永英. 水力学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2017.
- Zheng Y N, Zhu Y Y. Hydraulics[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2017. (in Chinese)
- [18] 严导淦. 流体力学中的总流伯努利方程[J]. 物理与工程, 2014, 24(4): 47-53.
- Yan D G. The total flow Bernoulli equation in fluid mechanics[J]. Physics and Engineering, 2014, 24(4): 47-53. (in Chinese)
- [19] 李芳芳, 薛琨, 白春华. 竖直振动颗粒床对流机制的颗粒尺度实验研究[J]. 实验力学, 2013, 28(3): 290-298.
- Li F F, Xue K, Bai C H. Experimental study of particle size in convection mechanism of vertically vibrated particle bed[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(3): 290-298. (in Chinese)

(编辑 吕建斌)