

DOI: 10.11779/CJGE202208012

# 细粒级尾矿上游法筑坝放矿参数优选试验研究

段志杰<sup>1</sup>, 李全明<sup>\*2</sup>, 赵学义<sup>3</sup>, 于玉贞<sup>1</sup>, 师海<sup>4</sup>

(1. 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室(清华大学), 北京 100084; 2. 北方工业大学, 北京 100144;

3. 国家能源集团, 北京 100034; 4. 北京交通大学, 北京 100044)

**摘要:** 细粒尾矿上游法筑坝, 由于颗粒细, 且在浓缩过程中需添加絮凝剂, 放矿后尾矿难以水力分选, 无法形成干滩, 导致坝体稳定性较差, 难以筑坝。针对细粒尾矿放矿参数优选的问题, 以中国某铅锌尾矿为例, 基于尾矿沉积机理, 对矿浆进行沉积及流变试验, 初步筛选出临界分选浓度为 28%; 且在 55 m 长的沉积模型槽内进行筑坝模型试验, 分析放矿浓度、流量对尾矿流动沉积、淤积坡度及沉积尾矿物理力学性质的影响。利用模型试验优选的放矿参数在实际尾矿坝上进行放矿堆坝, 取得了良好效果, 验证了室内模型试验的有效性。提出的利用一维沉降与流变测试相结合初步确定矿浆分选浓度, 并利用大型沉积模型槽进行堆坝模拟试验以进一步确定最优放矿参数的方法, 对于细粒尾矿上游法筑坝具有工程实用价值。

**关键词:** 细粒级尾矿; 上游法放矿; 分选浓度; 沉积滩

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)08-1474-09

**作者简介:** 段志杰(1995—), 男, 博士研究生, 主要从事尾矿坝和高土石坝方面的研究工作。E-mail: duanzj17@tsinghua.org.cn。

## Experimental study on optimization of ore-drawing parameters for fine-grained tailings dams constructed by upstream method

DUAN Zhi-jie<sup>1</sup>, LI Quan-ming<sup>2</sup>, ZHAO Xue-yi<sup>3</sup>, YU Yu-zhen<sup>1</sup>, SHI Hai<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. North China University of Technology, Beijing 100144, China; 3. National Energy Group, Beijing 100034, China; 4. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Due to the fine particle composition of tailings and the addition of flocculant in the concentration process, the hydraulic sorting is weakened during the flow and deposition of tailings slurry, and dry beach can not be formed, resulting in lower stability of upstream-method tailings dams. The problem of optimizing the ore-drawing parameters of fine-grained tailings is studied based on the example of a lead-zinc tailings dam in China. Based on the sedimentation mechanism of tailings, the sedimentation and rheological characteristics of slurry are tested. The critical separation concentration of tailings slurry is preliminarily selected as 28%. Then, the upstream-method model tests are carried out in the 55 m-long horizontal sedimentary model flume to analyze the effects of slurry concentration and discharge rate on the tailings sediment sorting, the deposited beach slope and the physical and mechanical properties of the tailings. The drawing parameters optimized by the model tests are applied to the actual tailings dam, and good results are achieved, which fully verifies the effectiveness of the laboratory model tests. The method for preliminary determination of the critical slurry concentration by one-dimensional settlement and rheological property tests and model tests of a large sedimentation model flume is proposed to further determine the optimal drawing parameters, which has important engineering practical value for the optimization of drawing technology of fine-grained tailings dams by upstream-method.

**Key words:** fine tailings; tailings dam by upstream-method; separation concentration; deposited beach

## 0 引言

尾矿坝是金属非金属矿山三大生产设施之一, 也是该领域的重大危险源之一。截至 2011 年, 中国有上万座尾矿坝, 其中四等以上的大型尾矿坝三千余座<sup>[1]</sup>。近年来, 中国对各类尾矿坝的治理工作卓有成效, 根

据应急部减灾中心的最新数据, 到 2021 年底, 全国尾

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51874260); “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0804602)

**收稿日期:** 2021-09-05

**\*通信作者** (E-mail: 454968053@qq.com)

矿库的数量降至 6731 座。尾矿坝的建造方法包括上游法、下游法及中线法。其中上游法筑坝相对于下游法和中线法简单方便、造价低, 在中国被广泛应用。但上游法筑坝也存在干滩长度不够, 浸润线偏高, 坝体稳定性差等问题<sup>[2-3]</sup>。Martin<sup>[4]</sup>对美国 4 座尾矿坝进行的岩土工程勘察表明, 干滩的长度与坡度是决定尾矿坝稳定性的重要因素。《尾矿堆积坝岩土工程技术规范》中明确指出, 尾矿坝的淤积干滩坡度不应小于 1%<sup>[5]</sup>。由于尾矿沉积过程复杂, 沉积体结构变异大, 当前对尾矿坝沉积尚未形成统一的规律性认识, 难以指导实际尾矿坝工程的放矿筑坝。

针对尾矿放矿形成的干滩形态和坝体结构, 学者们大多采用物理模型试验的方式开展研究。Pettibone 等<sup>[6]</sup>最早开展尾矿坝的室内堆坝模型试验研究, 将尾矿浆排入特制的 5 m 长的模型槽内。许多学者研究了一维条件下尾矿浆体的沉积固结特性<sup>[6-11]</sup>。尹光志等<sup>[12]</sup>基于相似比尺的模型试验, 研究了不同粒度成分尾矿的坝体渗透性及干滩面坡度。梁冰等<sup>[13]</sup>设计了水力分选粒度分析装置, 并利用该装置研究了不同放矿速度下尾矿浆的沉积特征。已有的尾矿模型试验, 由于模型装置尺寸有限, 往往难以完全满足尾矿浆排放过程中的泥沙冲淤相似条件, 与实际沉积过程存在一定的偏差。

本文以中国某铅锌矿尾矿坝为工程背景, 该铅锌矿选矿厂尾矿的产率为 82.5%, 尾矿产量为 2000 t/d。该选矿厂的选矿工艺具有两大特征: ①为了提高铅、锌精矿的回收率, 磨矿较细, 尾矿颗粒的粒度级配曲线如图 1 所示; ②为了矿区回水添加絮凝剂浓缩至 40% 输送至尾矿坝。正因如此, 该铅锌矿的尾矿矿浆与其他矿浆相比, 在同浓度条件下黏度偏大。

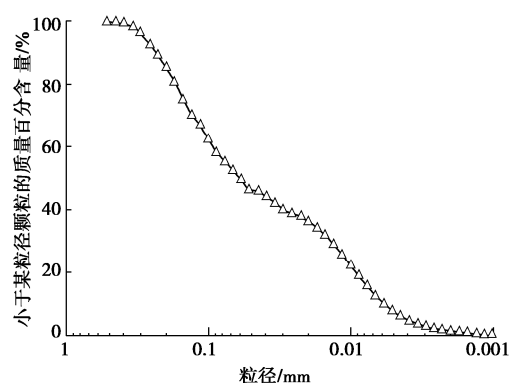


图 1 全尾矿颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of total tailings

该尾矿坝采用上游法放矿筑坝, 放矿的矿浆浓度为 40%。由于选矿厂排放的尾矿颗粒较细, 放矿浓度偏高, 尾矿在坝前放矿后, 粗、细颗粒难以分选, 尾

砂固结慢, 子坝坝前难以形成由粗颗粒组成的干滩, 如图 2 所示。



图 2 尾矿坝放矿现场照片

Fig. 2 Photo of ore-drawing in a tailings dam

本文基于细粒尾矿沉积机理, 提出了上游法尾矿坝放矿参数优选设计方法。结合一维沉降试验和流变特性试验结果, 通过半工业模型试验, 模拟尾矿浆浓度和流量这两大主要的放矿控制性参数对尾矿沉积的影响, 分析放矿过程中矿浆流动沉积的特征, 实现分选沉降, 从而在子坝前形成一定长度的干滩, 提高坝体稳定性。

## 1 细粒尾矿浆沉积机理分析

为了实现矿浆在放矿过程中形成粗颗粒干滩, 颗粒分选沉降是关键。颗粒在固、液两相流中沉降, 其颗粒沉速采用 Stokes 公式描述:

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

从式 (1) 可以看出, 颗粒沉速受尾矿颗粒的直径  $d$ 、矿浆的黏度  $\mu$ 、固体颗粒及液体的密度  $\rho_s$ 、 $\rho$  和重力加速度  $g$  等因素影响。对于一定尾矿物料, 粒径组成一定 (即粒径  $d$ ,  $\rho_s$  密度不变), 要想增加颗粒沉降速度, 一种方式是增大重力加速度  $g$ , 目前通常采用旋流器分级, 另一种方式为降低流体的黏度。

降低流体黏度的方法有: 降低浓度、升温或加药剂等。由于固、液两相流的浓度直接影响液体的黏度, 根据大量试验研究结果, 矿浆的黏度与浓度呈指数关系变化 ( $\mu = f(C_w^n)$ )<sup>[14-15]</sup>。因此, 通过降低矿浆浓度来降低矿浆黏度是增加颗粒沉降速度最经济实用的方法。

本文首先通过沉降筒试验来观测不同浓度的矿浆沉降特性。静态沉降试验在高 45 cm, 内径 6 cm, 体积为 1000 mL 的沉降筒中进行, 共配置了 10%~32%

共 12 种浓度, 首先将沉降筒的矿浆搅拌均匀, 同时观察尾矿浆的沉降过程, 如图 3 所示。

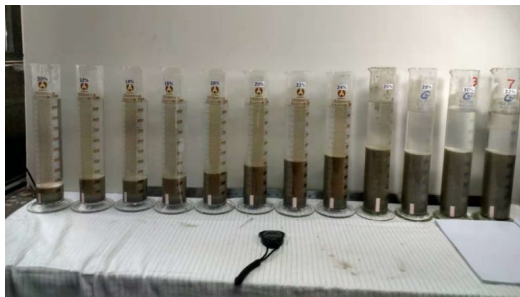


图 3 尾矿浆一维静水沉降试验

Fig. 3 One-dimensional deposition tests on slurry in static water

沉降柱试验是研究泥沙沉降固结的重要方法, 国内外学者已开展大量试验和理论研究<sup>[16]</sup>。Fitch<sup>[17]</sup>将泥浆的沉降过程分为澄清区、沉降区和压密区。粗颗粒率先沉积形成土骨架, 并发生固结作用, 形成压密区; 而细颗粒在水中沉降速度相对较小, 且黏粒形成絮凝结构进一步减小颗粒的沉降速度, 絮凝结构相互连接混合形成固相结构体的弱固结区域, 即沉降区。本次试验过程中观察到了同样的现象, 即上层为澄清区, 下层为沉降和压密区, 各分区之间存在明显的分界面, 如图 4 所示。根据图 4 中不同浓度下尾矿浆沉积分选界面, 随着浓度升高, 浆体的分选沉积效应逐渐减弱, 其中当浓度达到 30% 时, 沉降筒下部颜色较深的粗粒尾矿悬浮在浆体中难以下沉, 无法观察到粗细颗粒的分选现象。图 5 为沉降筒底部压密区厚度的变化曲线, 在沉降的初始阶段, 压密区的上升速度与浓度成反比。综合图 4, 5, 当浓度小于 28% 时矿浆呈典型的分选沉降, 浓度到 30% 时虽然存在澄清区与沉降区的固-液分界面, 但难以区分沉降区与压密区的分选分界面。28% 浓度时分选沉降现象不甚明显, 据此可确定, 针对该颗粒级配的尾矿, 28% 浓度为静水沉降下的临界分选浓度。

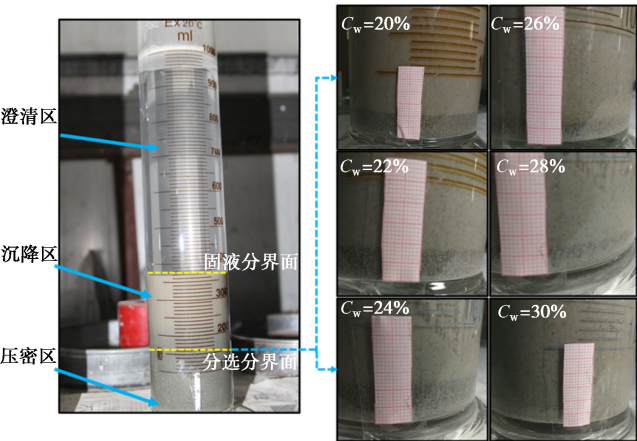


图 4 不同浓度尾矿浆分选沉积分界面

Fig. 4 Separation interfaces under different concentrations

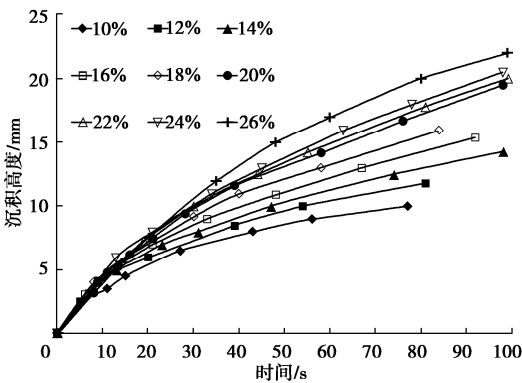


图 5 尾矿浆沉积高度随时间变化

Fig. 5 Deposition heights of tailings slurry

沉降试验结果表明, 矿浆的沉降特性与其浓度密切相关, 浓度越低, 不仅上层浑液面沉降速度越快, 而且下层分选沉降效果也越显著。当浓度小于 28% 时矿浆呈典型的分选沉降, 在 28% 浓度时分选沉降现象不甚明显, 浓度到 30% 时难以区分下层的分选沉降。

此外, 对该尾矿浆采用黏度计测量了不同浓度矿浆的黏度。试验中浆体温度为 20℃, 测量结果如表 1 所示。流变特性测试的最低浓度为 28%, 屈服应力很小, 为 0.044 Pa, 进一步降低浓度, 屈服应力更小, 甚至接近于零。根据不同浓度的流变参数可知, 浓度大于 28% 基本为宾汉体, 浆体具有一定的屈服应力, 可以形成絮凝团聚结构, 不利于分选沉降; 而当浓度小于 28% 时, 尾矿浆呈牛顿体, 有利于颗粒沉降特别是粗颗粒先沉, 细颗粒后沉的分选沉降。这从矿浆流变特性也解释了 28% 浓度是分选沉降的问题。据此可确定, 针对该颗粒级配的尾矿浆, 28% 浓度为静水沉降下的临界分选浓度。

表 1 尾矿浆流变参数表 (T=20℃)

Table 1 Rheological parameters of tailing slurry (T=20℃)			
矿浆密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )	浓度 C <sub>w</sub> /%	流变参数	
		刚度系数 η <sub>M</sub> /(MPa·S)	屈服应力 τ <sub>B</sub> /Pa
1315.3	37	8.6	0.290
1282.5	34	7.3	0.129
1221.6	28	6.4	0.044

2 上游法筑坝模型试验设计

虽然静水沉降试验已找出临界分选沉降浓度为 28%, 实际尾矿库放矿并不是简单的静态沉降。尾矿颗粒在动水环境下, 由于水流紊动作用, 颗粒沉降过程更复杂。水流的紊动作用对尾矿颗粒沉降具有加速及延缓沉降的双重作用: ①水流紊动状态下颗粒比静态时受到一个上举力, 不容易沉降; ②由于矿浆紊动会破坏矿浆絮团、絮网结构, 造成矿浆黏度特别是屈服应力 τ<sub>0</sub> 减小, 加速颗粒沉降速度<sup>[15]</sup>, 所以有必要进



行放矿筑坝模型试验,以观测放矿时尾矿颗粒沉降淤积过程,同时要求模拟在水流集中时可能发生的局部冲刷。因此,模型试验要求同时满足水流运动相似和泥沙冲淤相似两个基本准则。

对于含砂水流的模型试验,需按照相似比尺设计试验,为了满足水流相似和泥沙冲淤相似,在地形地貌按比例缩小时,也要对尾矿颗粒的粒径进行缩小。然而颗粒粒径减小后,尾矿浆容易形成半胶体型悬移液<sup>[12]</sup>,此时颗粒与颗粒之间的黏结力将远远大于自身重力,在整个两相流体系中起主要作用,使得模型中尾矿的冲淤作用与原型尾矿相差甚远。正是由于模型试验的相似比难以同时满足,当前尾矿坝的放矿沉积试验大多抓住研究的主要因素,放宽对相似比尺的限制<sup>[12-13, 18-19]</sup>,即仍采用现场尾矿砂进行堆坝模型试验。在部分堆坝模型试验研究中,由于模型尺寸及放矿流量按照相似比尺进行了缩尺,然而颗粒性质如粒径、重度未考虑相似比问题,造成颗粒的起动流速过大,放矿过程中泥沙以淤积作用为主,大多在放矿口附近即迅速沉积,难以在水流挟沙力作用下冲刷搬运,造成模型试验测量得到的尾矿干滩坡度过大,远大于现场实际尾矿坝<sup>[18-19]</sup>。针对尾矿堆坝模型试验存在的相似比难以满足的根本性问题,本试验研究提出进行1:1原型试验,采用原型尾矿砂。然而考虑到试验场地及试验材料的限制,除非进行现场放矿,在试验室内很难进行整体模型试验。

在对尾矿坝放矿的冲淤规律研究后发现,尾矿浆的流动淤积在平面可进行分解:①主要沿放矿水流流动方向(即垂直坝轴线方向)沉积,由于沿放矿水流方向的淤积是决定干滩长度的主要因素,在此方向可取一窄条进行一维水砂淤积试验;②随着放矿尾矿砂的淤积,放矿水流在坝轴方向具有水平向的游荡型摆动。因此,可设计两个水槽分别进行放矿试验,研究尾矿砂的淤积规律,特别是沿放矿水流方向的模型试验;放矿水流的左右摆动试验其次,采用两个方向组合试验,以模拟尾矿浆的原型流动。

为此,分别设计了一维窄水槽及二维宽试验水槽,水槽尺寸分别为 $0.3\text{ m}\times 55\text{ m}$ , $2\text{ m}\times 20\text{ m}$ ,其中对于一维沉积模型窄槽,设置水槽坡度为1%,试验装置如图6所示。试验采用原型砂,模型率为1,相当原型试验。在窄长水槽内,水槽宽度远小于实际尾矿坝内任意两放矿管间距,因此,为保证模拟放矿水流强度与实际一致,模型的放矿流量按尾矿坝放矿时单宽流量 $Q$ 控制施放。

考虑到实际尾矿干料的日排放量为2000 t/d,若采用20%~28%浓度放矿,则实际尾矿坝内单宽流量

最大为 $4.2\text{ L/s}\cdot\text{m}$ ,最小单宽流量为 $1.88\text{ L/s}\cdot\text{m}$ ,按上述单宽流量在30 cm宽的水槽内,可按1.6,1.0,0.6 L/s排放进行试验。

根据前文进行的尾矿浆静水沉降试验得到的临界分选浓度28%,将试验组放矿浓度设置为20%,26%,30%,此时原矿浆对应的密度分别为1148.8,1202.5,1241.2  $\text{kg/m}^3$ 。每个试验工况完成后,沉积槽内的尾矿充分拌匀后运至搅拌罐内,加水配置成相应浓度的矿浆,便于下个工况使用。试验过程中全尾矿浆内的尾矿颗粒级配始终保持一致,其特征粒径为 $d_{50}=0.06\text{ mm}$ , $d_{10}=0.0058\text{ mm}$ 。



图6 模型试验装置图

Fig. 6 Diagram of deposition model flumes

### 3 筑坝模型试验结果分析

#### 3.1 尾矿浆流动沉积特征分析

通过多种工况下的放矿试验得到了受矿浆浓度、流量影响下的淤积坡度和颗粒分布的变化特征。矿浆从放矿口排出后,尾矿砂迅速淤积,之后随矿浆中尾矿的淤积,水流含砂量减少,且颗粒变细,在流槽下游段淤积量也逐渐减少。因此,流槽前段尾矿淤积厚,比降大,随后淤积减少,淤积比降也小,淤积量及淤积坡度沿程变化,即前段淤积比降3%~5%,甚至更大,后段淤积比降逐渐减小到1.5%左右,如图7所示。

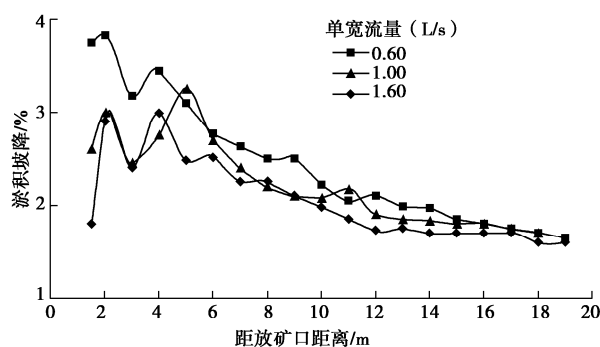


图7 30%浓度时淤积坡降沿程分布

Fig. 7 Distribution of siltation slope along path ( $C_w=30\%$ )

根据图 7，尾矿淤积坡度沿程逐渐变化，本文采用流槽内前 20 m 范围内的整体淤积坡度来对比分析放矿参数对淤积坡度的影响。不同放矿浓度、流量下尾矿整体淤积坡度如表 2 所示。整体来看，尾矿坝淤积坡度变化受流量影响较明显，随放矿流量增大而逐渐减小。就流量影响，在 1.6 L/s 大流量放矿时，矿浆流速较快，水流将大量尾矿砂带向流槽下游，尾矿在上游与下游都淤积，造成淤积比降较小；相反，小流量 0.6 L/s 放矿时，由于槽内水深较小，流速低，尾矿粗颗粒一出放矿口，很快就沉淀淤积下来，大部分尾矿砂都淤积到距放矿口 6 m 以内，淤积比降大。放矿流量较大时，流速快，粗泥沙不容易淤积，则淤积比降偏小；相反，放矿流量小，粗砂一出放矿口则淤积，在流槽后段淤积较少，造成淤积比降偏大，因此流量对淤积比降影响比较明显。

表 2 尾矿沉积模型试验淤积坡度

Table 2 Siltation slopes in deposition model tests			
试验 序号	矿浆浓度 $C_w/\%$	放矿流量 $Q/(\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$	淤积比降 $J/(20\text{ m})$
1	20	0.60	0.020
2		1.00	0.016
3		1.60	0.014
4	26	0.60	0.019
5		1.00	0.017
6		1.60	0.016
7	30	0.60	0.019
8		1.00	0.017
9		1.60	0.015

在每个工况下的放矿试验结束后，在流槽内距放矿口不同位置处取样进行了的颗粒级配分析，得到了沿程颗粒级配曲线分布特征。图 8 为相同放矿流量下 3 种矿浆浓度所对应的颗粒分选情况，尾矿颗粒呈现较好的分选效果，即靠近放矿口处颗粒粗，离放矿远处颗粒粒度偏细，而且离放矿口越远，颗粒越细。本文得到的尾矿沉积规律与已有研究结果一致<sup>[21-22]</sup>。

放矿时，不同浓度的矿浆均发生分选淤积，但分选程度有所差异。相同流量条件下，20%浓度放矿时，尾矿级配曲线分离程度较高，表明其水力分选良好。30%浓度矿浆在一维静态沉降试验中并不分选，然而在设有 1%坡度的水槽中仍发生分选，但分选效果较低浓度时有所减弱。对比图 8 中距放矿口 10 m 处的颗粒级配曲线（图中绿线），30%浓度下  $d<0.1\text{ mm}$  的尾矿含量相比于 20%浓度时增加了 21%，细粒含量显著增加，干滩长度大大缩短。综合来看，为了获得更好的分选沉积效果，应控制放矿浓度在 30%以下，若

回水条件允许，控制放矿浓度在 26%以下时分选效果更佳。

对比静态一维沉降筒试验结果与流槽内的放矿沉积模型试验结果可知，尾矿浆流动沉积过程中，在水流紊动作用下，矿浆的絮凝结构容易被破坏，其黏度也会相应下降，反而会促进粗颗粒的分选沉积。上述分析表明仅靠静态沉积试验无法探究流动尾矿浆的沉积特性，应采用与实际放矿沉积条件更相近的二维沉积模型槽进行模拟分析。

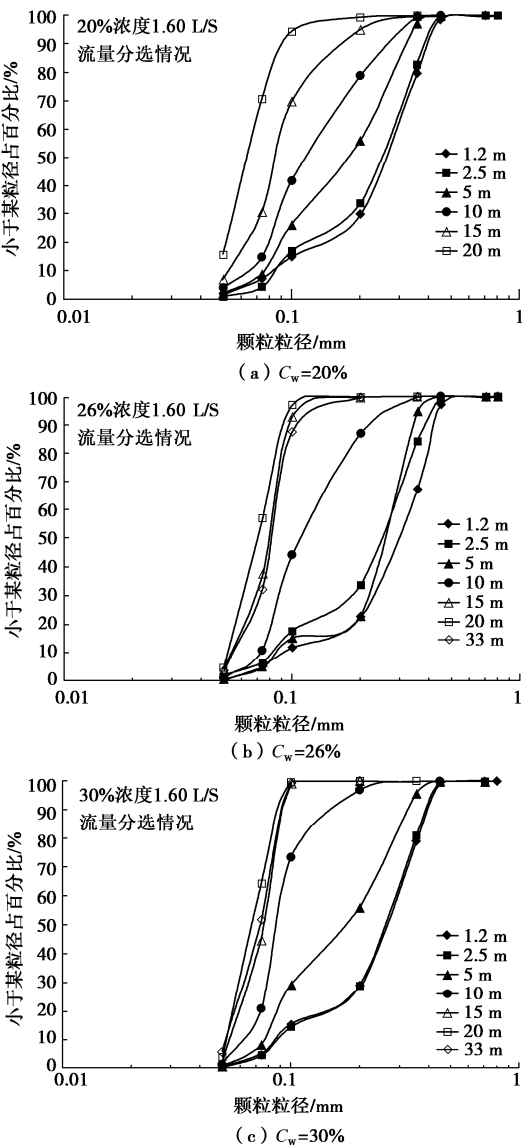


图 8 不同放矿浓度沉积尾矿级配曲线 ( $Q=1.6\text{ L/s}$ )  
Fig. 8 Sediment-size distribution curves at different concentrations ( $Q=1.6\text{ L/s}$ )

为了研究尾矿上游法堆坝挟砂水流的摆动淤积，在  $2\text{ m}\times 20\text{ m}$  的大水槽内也进行了放矿试验，矿浆浓度为 26%，流量根据实际尾矿坝上的单宽流量  $Q=1.6\text{ L/s}$  施放。由于矿浆在流槽内运动时有足够的空间自

由度, 模型试验观测的矿浆流动与现场尾矿库中矿浆流动特征基本一致。在放矿沉积的过程中, 尾矿库内时时处于冲淤的动态平衡。基床受紊态流动的浆体侵蚀作用, 形成冲沟, 冲沟边界呈曲折形态, 并频繁发生分叉和交汇, 如图 9 所示。由于冲沟处的水动力条件紊乱, 该处冲淤交替迅速, 冲沟的出现为库内夹层的产生提供了条件。矿浆归槽后左右摆动, 摆动幅度可达 2 m。冲沟的游荡摆动使淤积比降变小, 实测淤积比降为 0.89%~0.98%, 此时流槽内的干滩长度达 12 m。值得指出的是, 在 2 m 宽的流槽内放矿时, 由于尾矿料有限, 流槽内尾矿可能并未达到最终的稳定淤积坡度, 造成宽槽内实测的淤积坡度相对较小。

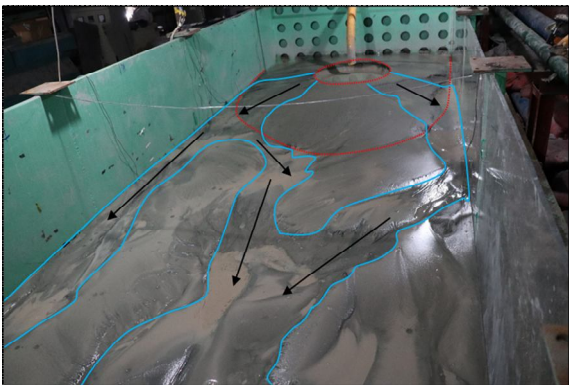


图 9 200 cm 宽水槽内沉积干滩形态

Fig. 9 Deposition morphology in flume with a length of 200 cm

3.2 尾矿沉积物物理力学性质

在堆坝试验的基础上, 不同浓度和单宽流量放矿后, 沿尾矿沉积滩不同距离 (0, 5, 10, 15, 20 m) 处取原状尾砂开展物理力学特性试验, 其中原状样的含水率和干密度如表 3 所示。沉积尾矿的含水率为 19.6%~28.9%, 相对较低, 且与放矿口距离越大, 含

水率整体上增大, 这是由于放矿口附近的颗粒较粗, 渗透系数较大, 由于流槽底部设置了一定坡度和排渗土工布, 排渗条件相对较好。而距离放矿口 20 m 左右处颗粒明显变细, 固结排渗速度均大大减慢。干密度与含水率沿程则呈现相反的变化趋势, 放矿口附近干密度较大, 可达 1.70 g/cm<sup>3</sup>, 然而随着与放矿口距离增大, 干密度逐渐减小。

通过对环刀取出的原状尾矿进行慢剪试验 (围压分别为 50, 100, 200 kPa), 得到沉积尾矿抗剪强度指标的沿程分布情况。在本次模型试验所进行的各放矿浓度和流量下, 沉积物的黏聚力基本为 0, 内摩擦角平均为 35°。其内摩擦角  $\varphi$  随放矿浓度和流量的变化规律如图 10 所示。流槽内沉积物的内摩擦角分布近似呈先减小后增加的趋势, 在 10 m 附近, 抗剪强度较小。这是由于尾矿料在颗粒搬运沉积后, 粗颗粒大多在放矿口附近沉积, 细颗粒被搬运至 15 m 以后。由于干密度沿程逐渐减小, 且粒径越细, 尾矿颗粒的内摩擦角较低, 所以在 0~10 m 范围内土层的内摩擦角逐渐减小, 然而在 10 m 以后随着细颗粒增加, 细粒尾矿由于结合水的作用将形成一定的黏聚力, 细粒含量升高黏聚力也会增大<sup>[20]</sup>, 故 10~20 m 处尾矿抗剪强度会有一定升高。

放矿流量及矿浆浓度均对沉积物的抗剪强度有较大影响, 且流量、浓度这两个因素对矿浆强度的影响存在耦合效应。在低浓度下 (如 20%), 流量越小抗剪强度越大, 在高浓度下 (如 30%), 流量越大, 反而形成更好的分选效果, 造成干滩处的抗剪强度偏大。

实际尾矿库中尾矿的强度指标在筑坝过程中逐渐演化。尾矿材料随着固结过程密度和孔隙比的变化, 其强度和渗透性的变化也是始终存在的。由于尾矿坝

表 3 沉积尾矿 (原状) 含水率及干密度

Table 3 Water contents and dry densities of tailings sediment

试验 序号	试验工况		与放矿口距离/m									
	$C_w/\%$	$Q/(\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$	0		5		10		15		20	
			$w/\%$	$\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$w/\%$	$\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$w/\%$	$\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$w/\%$	$\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$w/\%$	$\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
1	20	0.60	20.8	1.70	25.3	1.61	25.1	1.57	—	—	28.4	1.49
2	20	1.00	20.6	1.66	25.7	1.59	28.4	1.56	—	—	28.9	1.56
3	20	1.60	21.0	1.68	22.8	1.65	26.0	1.52	—	—	24.1	1.58
4	26	0.60	19.6	1.74	23.9	1.66	25.6	1.62	—	—	28.1	1.52
5	26	1.00	21.7	1.70	25.1	1.56	23.4	1.65	—	—	23.3	1.61
6	26	1.60	24.1	1.64	24.6	1.63	22.7	1.64	—	—	28.2	1.51
7	30	0.60	26.9	1.59	23.2	1.66	23.9	1.56	25.6	1.49	—	—
8	30	1.00	21.7	1.61	24.2	1.63	27.6	1.50	26.0	1.62	—	—
9	30	1.30	21.5	1.70	25.0	1.66	25.6	1.59	—	—	27.6	1.63

注:  $C_w$  为放矿浓度,  $Q$  为排放的单宽流量,  $w$  为含水率,  $\rho_d$  为尾矿的干密度。



不断堆坝，下部沉积的尾矿在后堆积的尾矿上覆荷载作用下，不断发生固结，其强度和渗透性的变化对于坝体稳定性也具有重要的影响。

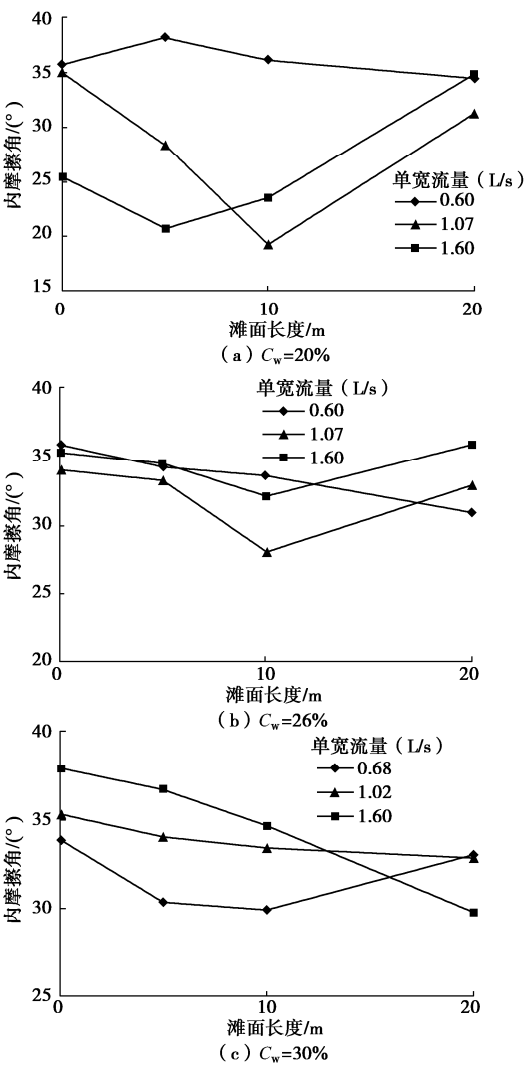


图 10 沉积尾矿内摩擦角沿程分布特征

Fig. 10 Distribution characteristics of internal friction angle of sedimentary tailings

4 实际尾矿坝堆坝验证

根据尾矿坝放矿模型试验优选的放矿参数，在实际尾矿库内进行工业应用，由于泵送至尾矿坝处的矿浆浓度为 40%，采用稀释装置将高浓度矿浆稀释至 20%~30%，进行现场放矿堆坝试验。现场泵送系统的排放流量不稳定，在 1.00~1.88 L/s·m。

现场观测表明，矿浆浓度为 30%时，尾矿基本不分选，坝前地势平坦，坡降较小。当矿浆稀释至 20%~26%时，尾矿分选较好，原本平整的滩面，通过 2 d 放矿形成长度达 25~30 m 的干滩，见图 11。实测的干滩淤积坡度约为 2%，略大于室内模型试验结果。在现场于淤积滩上取样进行了颗粒分析，如图 12 所

示，20 m 范围内粗细颗粒分选效果较好。

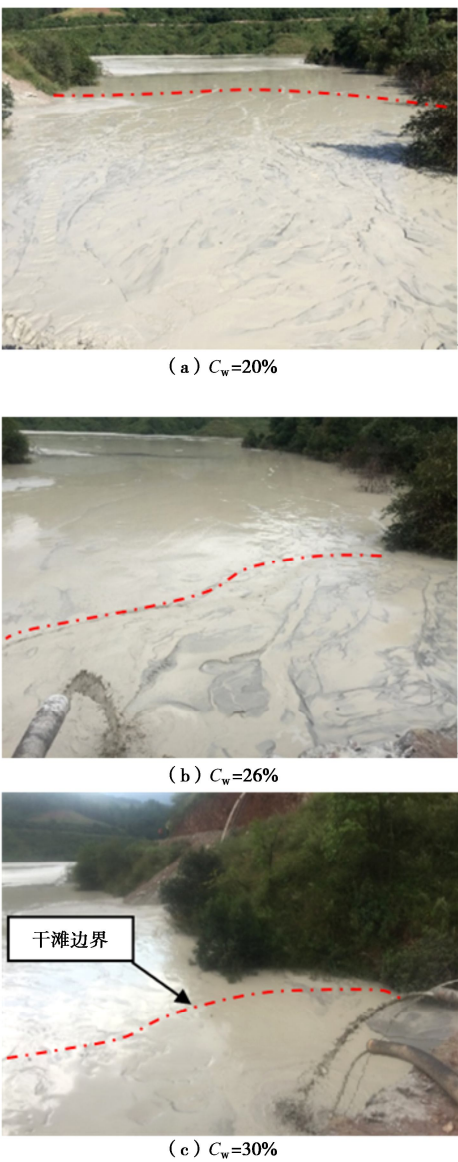


图 11 现场不同浓度放矿干滩淤积形态

Fig. 11 Siltation morphology at different slurry concentrations on site

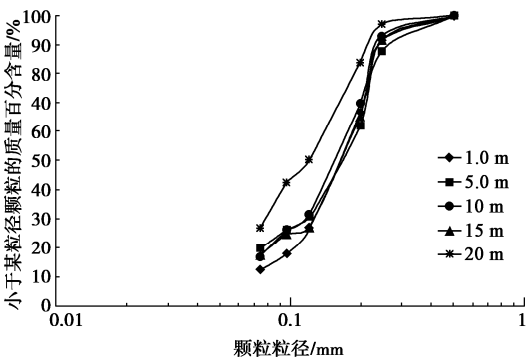


图 12 实际尾矿库内沉积尾矿颗粒级配曲线 (20%放矿浓度)

Fig. 12 Sediment-size distribution curves of tailings sediment in tailings dams ( $C_w = 20\%$ )

综合室内模型试验与现场实际放矿堆坝的结果可知,针对本文的细粒尾矿上游法放矿堆坝需控制排放浓度在20%~26%,即便在放矿过程中矿浆浓度波动变化,以不超过26%为佳,可保证分选效果,形成一定长度的干滩。

## 5 结 论

针对细粒尾矿上游法难以筑坝的问题,本文基于矿浆的沉降及流变特性试验初步筛选出尾矿浆的分选浓度,并设计开发尾矿沉积模型槽,进行上游法筑坝模型试验。根据室内试验优选得到的放矿参数,在实际尾矿坝内进行放矿堆坝试验,得到以下4点结论。

(1)尾矿浆混合物一维竖向沉降将形成澄清区、沉降区和压密区。沉降区的沉降速度与矿浆浓度密切相关,浓度越低,沉降速度越快,压密区的上升速度与浓度成反比,且浓度越低分选沉降效果越显著。针对本文颗粒级配下的尾矿,28%浓度为静水沉降下的临界分选浓度。

(2)根据不同浓度矿浆的流变参数,浓度为28%,浆体具有0.044 Pa的屈服应力,浓度进一步增大时,容易形成絮凝结构,不利于分选沉降;而当浓度小于28%时,矿浆呈牛顿体。这也从矿浆流变特性的角度解释了28%是分选沉降临界浓度的结论。

(3)本文采用的3种浓度在尾矿筑坝模型试验中都分选,这说明仅靠静态沉积试验无法探究流动尾矿浆的沉积特性,应采用与实际放矿沉积条件更相近的沉积模型槽进行模拟分析。矿浆浓度对尾矿粗细颗粒分选效果的影响较为显著,随着浓度增大,水力分选有所减弱。淤积比降随浓度增加而减少,随流量的增大而减小。尾矿沉积物的含水率沿程整体呈现增大的趋势,而干密度则逐渐减小。沉积尾矿的黏聚力均为0 kPa,内摩擦角均值为35°。沉积物的抗剪强度沿程呈现先减小后增加的趋势,在10 m附近尾矿沉积物的抗剪强度较小。

(4)现场实际放矿堆坝验证了室内模型试验的结果,综合来看,在实际尾矿坝放矿时必须控制排放浓度在20%~26%。

本文基于尾矿浆沉降机理,提出了利用一维沉降与流变特性测试相结合确定矿浆分选浓度的方法,并利用沉积模型槽进行堆坝模拟试验以确定最优放矿参数。对于其他类似细粒尾矿上游法堆坝的放矿参数优选具有借鉴意义。

## 参考文献:

[1] YIN G, WEI Z, WANG J G, et al. Interaction characteristics of geosynthetics with fine tailings in pullout test[J].

Geosynthetics International, 2008, 15(6): 428 - 436.

[2] AZAM S, LI Q R. Tailings dam failures: a review of the last one hundred years[J]. Geotechnical News, 2008, 15(6): 50 - 54.

[3] 汤优优, 陈 雄. 西南某低品位硫化铅锌矿选矿试验研究[J]. 金属矿山, 2021(3): 103 - 109. (TANG You-you, CHEN Xiong. Experimental study on beneficiation of a low grade lead-zinc sulfide ore in southwest China[J]. Metal Mine, 2021(3): 103 - 109. (in Chinese))

[4] MARTIN T E, MCROBERTS E C, DAVIES M P. A tale of four upstream tailings dams[J]. Proceedings, Tailings Dams, 2002.

[5] 尾矿堆坝岩土工程技术规范: GB 50547—2010[S]. 2010. (Technical code for geotechnical engineering of tailings embankment: GB 50547—2010[S]. 2010. (in Chinese))

[6] PETTIBONE H C, KEALY C D. Engineering properties of mine tailings[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1971, 97(9): 1207 - 1225.

[7] 路美丽, 崔 莉. 影响尾矿坝渗流场的因素分析[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(6): 17 - 20. (LU Mei-li, CUI Li. Analysis of factors affecting seepage field of tailings dam[J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(6): 17 - 20. (in Chinese))

[8] JEERAVIPOOLVARN S, SCOTT J D, CHALATURNYK R J. 10 m standpipe tests on oil sands tailings: long-term experimental results and prediction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(8): 875 - 888.

[9] ITO M, AZAM S. Large-strain consolidation modeling of mine waste tailings[J]. Environmental Systems Research, 2013, 2(1): 7.

[10] WANG S C, MAO C J, ZHANG C L, et al. Comparative study on the sedimentation rules of flotation tailing and natural clay[C]// 2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment. Zhengzhou, 2010.

[11] SALFATE E R. Predicting Void Ratio for Surface Paste Tailings Deposited in Thin Layers[D]. Vancouver: The University of British Columbia, 2011.

[12] 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(增刊2): 3710 - 3718. (YIN Guang-zhi, JING Xiao-fei, WEI Zuo-an, 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))

[13] 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 Bing, LÜ Zhi-qiang, JIN Jia-xu, 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))
- [14] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983. (QIAN Ning, WAN Zhao-hui. Mechanics of Sediment Transport[M]. Beijing: Science Press, 1983. (in Chinese))
- [15] 邵学军, 王兴奎. 河流动力学概论[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2013. (SHAO Xue-jun, WANG Xing-kui. Introduction to River Mechanics[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese))
- [16] 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. (WU Shang-wei, YANG Chun-he, ZHANG Chao, et al. Indoor scale-down test of tailings[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, **39**(10): 1485 - 1492. (in Chinese))
- [17] FITCH B. Sedimentation of flocculent suspensions: state of the art[J]. Aiche, 1979, **25**(6): 913 - 930.
- [18] KÜPPER A M. Design of Hydraulic Fill[D]. Edmonton: Alberta University, 1991.
- [19] WINTERWERP J C, DE GROOT M B, MASTBERGEN D R, et al. Hyperconcentrated sand-water mixture flows over a flat bed[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, **116**(1): 36 - 54.
- [20] 李广信. 高等土力学[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2016. (LI Guang-xin. Advanced Soil Mechanics[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2016. (in Chinese))
- [21] 徐宏达. 上游式尾矿坝的沉积规律[J]. 有色矿山, 2003(5): 40 - 43. (XU Hong-da. The sedimentary law of the upstream tailing dam[J]. China Mine Engineering, 2003(5): 40 - 43. (in Chinese))
- [22] 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. (GUO Xiao-xia, CHEN Zhi-xiang, SHAO Long-tan, et al. Experimental study on sedimentary behavior and basic physical mechanical properties of fine iron tailings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(7): 1220 - 1227. (in Chinese))

## The 13<sup>th</sup> International Symposium on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development

### Nanjing, China 7<sup>th</sup> - 9<sup>th</sup> December 2022

**Organised by:** Nanjing University, China

**Supported by:** National Natural Science Foundation of China; Nanjing University High-Tech Institute at Suzhou; CSRME Subociety for Intelligent Monitoring in Geoengineering; Suzhou NanZee Sensing Technology.

**Introduction:** The “International Symposium” series, founded in 1986 and with a history of 36 years, is a signature event for the International society of Environmental Geotechnology (ISEG). ISEG seeks to promote scientific cooperation among countries, organizations and individuals on geoenvironmental issues for global sustainable development. The theme of the 13<sup>th</sup> symposium is “Environmental Geotechnology for A Low-carbon World”. We will invite prominent scholars and experts to give keynote speeches, sharing their latest achievements in environmental geotechnology and sustainable development.

**Sessions:** Geological carbon capture, utilization and storage;

Pollution and remediation of mining site, soil and groundwater; Microplastics and other emerging contaminants; Soil-plant-atmosphere interaction; Sustainable energy utilization; Waste disposal and utilization; Sustainable infrastructure; Sustainable and high-efficient geohazard prevention; Interdisciplinary and emerging technologies; Geoenvironmental protection.

**Important dates:** First announcement: July 5; Second announcement: August 1; Open registration/abstract submission: August 1; Early-bird registration deadline: October 20; Regular registration deadline: December 7; Abstract submission deadline: October 30; Symposium Date: December 7-9.

**The conference access:** Online platform Website; Zoom [www.iseg.info](http://www.iseg.info).

**Contact us:** Prof. Chao-Sheng Tang, Email: [iseg@nju.edu.cn](mailto:iseg@nju.edu.cn); Zheng-Tao Shen, Email: [ztshen@nju.edu.cn](mailto:ztshen@nju.edu.cn).