

中文引用格式:陈青林,包礼霖,王晓军,等. 细粒尾矿沉积特性与矿浆流动特征流槽模型试验[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(5): 135–144.

英文引用格式:CHEN Qinglin, BAO Lilin, WANG Xiaojun, et al. Sedimentation law of fine tailings and characteristics of slurry flow by flume model test [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(5): 135–144.

细粒尾矿沉积特性与矿浆流动特征流槽模型试验*

陈青林^{1,2}副教授, 包礼霖^{1,2}, 王晓军^{**1,2}教授, 戴泽宇^{1,2},
张超³研究员, 王光进^{1,2}教授

(1 稀有金属资源安全高效开采江西省重点实验室, 江西 赣州 341000; 2 江西理工大学
资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000; 3 中国科学院武汉岩土力学研究所
岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

中图分类号: X936

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.05.0918

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3012200); 国家自然科学基金资助(52104085); 江西省自然科学基金资助(20232BAB213069); 江西省双千计划项目(jxsq2023102139)。

【摘要】 为剖析尾矿坝堆积筑坝过程中尾矿沉积体赋存特征与浆液流动行为, 采用流槽试验模型开展单管浆液排放条件下细粒尾矿堆积筑坝试验, 研究细粒尾矿堆积过程中沉积滩坡度、尾矿颗粒粒径分布、水位高度和孔隙水压力的变化特性, 分析尾矿浆流动、运动轨迹特征, 并讨论尾矿沿程沉积细化机制。结果表明: 沉积滩坡度随沿程距离的增加而减小; 尾矿颗粒粒径随沿程距离的增加逐渐细化, 随深度的增加粒径呈交错变化; 尾矿坝水位高度随坝高的增高而增加, 整体表现出前陡后缓; 孔隙水压力在尾矿浆排放阶段上升, 在尾矿浆停止排放间歇阶段消散; 尾矿浆在流槽首端以扇形发散的方式流动, 中部以不规则溪流的方式流动, 末端尾矿浆先以层流方式流动后转变为无规则旋转流动; 干滩面浆液运动速率波动较大, 达到尾水面后浆液的运动趋于平稳, 尾水面交界处前后浆液的运动特征差异性较大。

【关键词】 细粒尾矿; 矿浆流动; 沉积滩坡度; 流槽; 尾矿坝; 孔隙水压力

Sedimentation law of fine tailings and characteristics of slurry flow by flume model test

CHEN Qinglin^{1,2}, BAO Lilin^{1,2}, WANG Xiaojun^{1,2}, DAI Zeyu^{1,2},
ZHANG Chao³, WANG Guangjin^{1,2}

(1 Jiangxi Province Key Laboratory of Safe and Efficient Mining of Rare Metal Resources, Ganzhou Jiangxi 341000, China; 2 School of Resources & Environment Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi 341000, China; 3 State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan Hubei 430071, China)

* 文章编号: 1003-3033(2025)05-0135-10; 收稿日期: 2024-12-05; 修稿日期: 2025-02-15

** 通信作者: 王晓军(1979—), 男, 山西晋中人, 博士, 教授, 主要从事金属矿安全高效开采与灾害防治研究。E-mail: wangxiaojun@jxust.edu.cn。

Abstract: To investigate the occurrence characteristics of the tailings deposit and slurry flow behavior during the damming process of tailings impoundments, the flume test model was used to carry out the fine-grained tailings accumulation damming test under single pipe slurry discharge conditions. The variation characteristics of beach slope, tailings particle size distribution, water level height and pore water pressure during the accumulation process of fine-grained tailings were studied. The tailings slurry flow and trajectory characteristics were analyzed, and the mechanism of tailings refinement along the deposition course was discussed. The results show that deposition slope decreased with the increase of the downstream distance. The particle size of tailings gradually becomes finer with increase of downstream distance, and the particle size is staggered with the increase of depth. The height of water level of tailings dam increases with the increase of height of dam, exhibiting a steep front slope and a gentle back slope overall. The pore water pressure rises during the discharge stage of tailings slurry and dissipates during the intermittent stage when tailings slurry stops discharging. The tailings slurry flows in a fan-shaped divergent pattern at the beginning of flume, in an irregular stream-like pattern in the middle section, and transitions from laminar flow to irregular rotational flow at the end. The slurry flow rate on dry beach surface fluctuates greatly, and slurry movement tends to be stable after reaching the tailings water surface. There is a significant difference in slurry movement characteristics before and after the interface between dry beach and tailings water.

Keywords: fine-grained tailings; tailings pulp flow; deposition beach slope; flume; tailings dam; pore water pressure

0 引言

我国大多数尾矿坝采用上游法构筑^[1],构筑过程中尾矿颗粒将在自身重力和水动力作用下发生水力分选效应。尾矿颗粒在水力分选效应下的沉积特征是研究尾矿坝坝体结构的基础。文献[2]总结分析过去 100 多年尾矿库溃坝事故案例,指出尾矿坝沉积结构特征认识不充分是导致尾矿坝溃坝事故频发的主要原因。因此,探究尾矿沉积特征对尾矿坝坝体结构揭示以及坝体安全稳定性评估具有重要作用。

目前,物理模型试验是揭示尾矿坝沉积结构的最有效的手段,国内外学者借助该手段对尾矿沉积特征开展了大量研究。PETTIBONE 等^[3]开展了尾矿坝室内堆坝模型试验,计算了尾矿坝安全系数,发现利用尾矿建造具有足够安全系数的坝体是可行的。尹光志等^[4]开展细粒尾矿堆积坝稳定性模型试验,验证了坝体加筋加固的作用效果,获得了加筋坝体与未加筋坝体的破坏模式。SHAO Longtan 等^[5]开展了尾矿水力分选大型模型试验,研究了铁尾矿的自然沉降行为,发现尾矿浆密度、流量对全尾矿分选效果呈负相关性关系。梁冰等^[6]开展了不同排浆速度尾矿沉积模型试验,得出尾矿颗粒运动-沉积临界速度关系和尾矿沉积的判据。LEBITSA 等^[7]通过沉降柱试验观测了不同沉积速率下金尾矿超孔隙水压力的演变过程,得出沉降过

程中超孔隙水压力呈“累积—消散”的演变特性。GUI Rong 等^[8]研究干滩坡度对尾矿沉积特征的影响,得出干滩尾矿层理特征随坡度的增大而更加明显的结论。张东明等^[9]开展了传统上游法与改进上游法的高浓缩尾矿堆坝模型试验,分析了堆坝过程中滩面尾矿沉积情况、尾矿颗粒分布规律及水位变化特性,得出高浓缩尾矿堆坝使沉积滩颗粒分布均匀并减少了互层和细泥夹层的出现。TIAN Sen 等^[10]通过物理模型试验探讨了尾矿在水平和垂直方向上的沉降分布特征,表明尾矿颗粒粒径随着干滩面水平方向距离的增加而缓慢减小,垂直方向上粒径波动较大。郭晓霞等^[11]开展溜槽试验,分析细粒铁尾矿沉积坡度、孔隙水压力和有效应力的演变特性,得出尾矿浆入渗困难的原因是尾矿料表层硬化和封闭微孔。

综上所述,学者们针对不同放矿条件下的尾矿坝沉积结构特征,分析了尾矿坝的堆积筑坝过程,获得了一些具有建设性的关于尾矿坝沉积结构特征以及渗透特性的研究成果,但是,对于尾矿浆流动特性的研究仍然相对较少,此外,试验过程中尾矿浆的运动轨迹也缺乏定量描述。实际放矿过程中,尾矿坝沉积结构受放矿水流运动的控制,常与浆液流动形式紧密相连。鉴于此,笔者拟采用流槽模型开展单管排放条件下细粒尾矿堆积筑坝试验,探究细粒尾矿沉积特性、水位高度及孔隙水压力变化特征,定量

表征尾矿浆流动特征与运动轨迹,以期更加全面地剖析堆积筑坝过程中尾矿浆液流动行为与尾矿沉积体沿程细化机制。

1 流槽模型试验设计

1.1 流槽试验尾矿材料

为探究尾矿坝堆积筑坝过程中尾矿沉积体的赋存特性与浆液流动特征,采用流槽模型开展单管排放条件下细粒尾矿堆积筑坝试验。试样尾矿材料取于江西德兴枫树岭尾矿库,尾砂干密度为 1.478 g/cm^3 , 平均粒径 D_{50} 为 $66\text{ }\mu\text{m}$, 不均匀系数 C_u 与曲率系数 C_c 分别为 2.80、1.35, 小于 $75\text{ }\mu\text{m}$ 尾矿粒径的质量占比为 63%, 试验尾矿材料为粉粒组。采用射线衍射仪测试尾矿矿物的组分, 试验尾矿材料主要以石

英砂为主, 含量高达 54.31%, 其他矿物成分按含量从大到小依次为伊利石 38.38%、高岭石 4.47%、黄铁矿 2.83%。

1.2 流槽模型试验平台

物理模型试验平台由以下 7 大部分组成: 试验流槽 $7\text{ m}\times0.8\text{ m}\times0.8\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)、排洪系统 (排水孔、排水管)、水位监测系统 (U 型水位管)、孔压监测系统 (孔隙水压力传感器、孔压采集箱)、流态监测系统 (相机、广角相机)、搅拌系统 (搅拌机、搅拌机固定装置、搅拌桶) 和尾矿浆输送系统 (螺杆泵、排浆软管)。物理模型试验平台如图 1 所示。基于相似理论原理, 模型试验中须保证试验的主要物理量和原型保持相似性^[12-14], 试验模型长度比尺为 1 : 100。

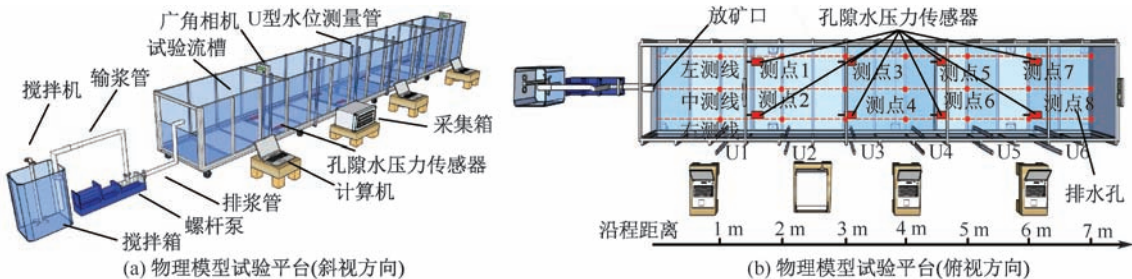


图 1 物理模型试验平台
Fig. 1 Physical model testing platform

1.3 流槽模型试验步骤

1) 试验准备工作。2 个广角相机分别固定在流槽首端、末端; U 型水位测量管每隔 1 m 布置于流槽内部, 用于记录水位高度数值; 孔隙水压力传感器 (测点 1—测点 8) 分别布置于流槽内部, 量程为 0~20 kPa (图 1a)。沿程距离每隔 1.5 m 布置 2 个同一水平方向的孔隙水压力传感器, 2 个孔隙水压力传感器相距 0.4 m, 分别离左、右亚克力板壁 0.2 m。搅拌系统与尾矿浆输送系统采用排浆软管连接。

2) 尾矿浆液制备。根据试验设计方案要求, 按水 : 砂质量 4 : 1 的比例将水和尾砂倒入搅拌箱, 采用搅拌机充分搅拌, 待搅拌均匀后, 即可启动螺杆泵将搅拌均匀的尾矿浆输送至试验流槽。

3) 数据监测。由于实际尾矿坝的堆筑过程为分层逐级堆载过程, 因而文中试验采用间歇排放的方式向流槽内排放尾矿浆, 以真实地演绎尾矿坝的堆筑过程。文中试验单次排放尾矿浆时间为 8~15 min, 单次间歇时间为 10~20 min。浆液排放与间歇过程中监测记录各 U 型水位测量管的水位高

度以及孔隙水压力数值。采用广角相机录制流槽内尾矿浆流动状态和标记小泡沫运动轨迹。

4) 粒径分析。在尾矿沉积滩面上布设 3 条取样路线, 中测线为流槽中心测线, 左测线和右测线分别在槽的左右两侧, 距流槽中心线 0.4 m (图 1b)。对沉积滩面上布设的 3 条测线在沿程方向上每隔 1 m 进行 1 次取样, 并在沿程距离 0.5 m 处干滩面上沿竖直方向每隔 0.02 m 进行 1 次取样, 采用激光粒度分析仪测量所取样本的颗粒粒径。

2 细粒尾矿沉积特性与矿浆流动特征分析

2.1 尾矿沉积体终了形态特征

为研究尾矿沉积体终了形态特征, 观测流槽首端沉积滩形状、尾矿横断面以及尾矿平剖面特征, 如图 2 所示。

由图 2a 可知: 在浆液下泄冲击力作用下, 流槽首端沉积滩表面形成了较大的扇形消能坑, 这与实际尾矿坝尾矿浆液排放现象一致。由图 2b 可知: 在

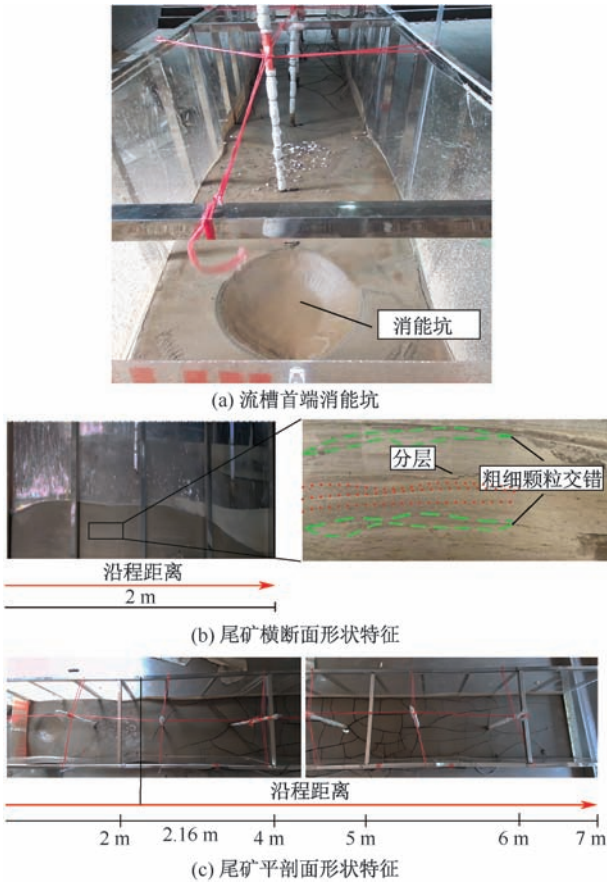


图2 尾矿沉积体终了形态

Fig. 2 End-of-settlement pattern of tailings deposits

间断尾矿浆液排放方式下,沉积体竖直剖面具有明显的分层现象,说明尾矿浆液在停止排放与重新排放时,其速率的非同步性会导致尾矿颗粒在沉积过程中出现非均质性分布。尾砂沉积体竖直剖面表现出颗粒粒径交错变化或相间的夹层现象,尾矿颗粒在水力分选效应下颗粒粒径分级沉积,形成了粗粒在下、细粒在上的尾矿沉积体。在下次排放尾矿浆时,尾矿浆中粗颗粒再次沉积在原尾矿沉积体表面,经多次沉积后沉积体在竖直方向上表现出粗细颗粒交错层理的沉积结构。由图 2c 可知:尾矿沉积干滩面呈前陡后缓变化,在沿程距离 216 cm 处具有明显的坡度转折。坡度转折点与尾水面界面重合,说明尾矿颗粒入水后将在水的黏滞阻力影响下下沉。

2.2 沉积滩坡度变化特征

沉积滩坡度是影响尾矿库调洪能力、坝体稳定性的重要因素^[15-16]。为研究试验过程中沉积滩坡度的变化特征,统计第 5、10、15 和 20 次浆液排放结束时尾矿的堆积高度,绘制沉积滩坡度变化曲线,如图 3 所示。

由图 3 可知:第 5 次、第 10 次、第 15 次和第 20

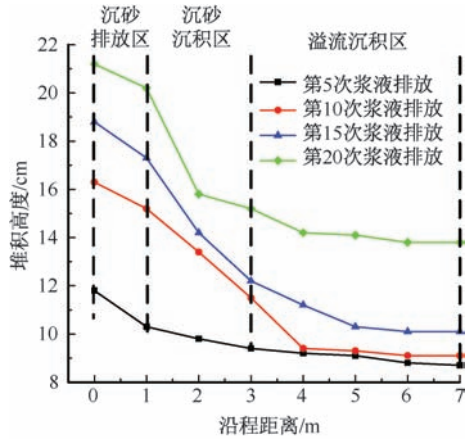


Fig. 3 Sedimentary beach slope change curve

次浆液排放结束时堆积体的高度分别为 11.8、16.3、18.8 和 21.2 cm,堆积体的高度随流槽内排放尾矿浆量的增加而增加。堆积体的高度随沿程距离的增加呈下降趋势,在沿程距离 0~4 m 内堆积体的高度下降显著,且下降高度随浆液排放次数的增加越明显。堆积体的高度在沿程距离 4~7 m 内下降不显著,坡度变化基本趋于稳定。说明尾矿浆经放矿管排入试验流槽后,水流流速逐渐降低,携砂能力逐渐变弱,尾矿颗粒逐渐在沉积滩面上沉积,整体尾矿颗粒沉积量随沿程距离的增加而减小。粗颗粒沉降速度较快,在距离放矿口较近的位置沉积,细小颗粒沉降速度慢,能够随矿浆流至库内,从而产生自然分级并形成具有一定坡度的滩面。

根据沉积滩坡度陡缓的变化特征,沉积滩坡度变化曲线可分为 3 个区域。第 1 段区域为沉砂排放区,在沿程距离 0~1 m 范围内,沉积滩坡度较平缓,坡度为 1.1%~1.5%;第 2 段区域为沉砂沉积区,在沿程距离 1~3 m 范围内,沉积滩坡度较陡,整体坡度为 0.45%~2.55%;第 3 段区域为溢流沉积区,在沿程距离 3~7 m 的范围内,沉积滩坡度平缓,整体坡度为 0.175%~0.6%。综合 3 个区域坡度的陡缓程度,具体表现为“平缓—陡—平缓”。

2.3 尾矿颗粒粒径分布特征

为获取尾矿浆液排放后沉积滩颗粒粒径分布特征,借助激光粒度仪测试沉积滩所取尾矿样品的颗粒粒径。

1) 沉积滩沿程平面尾矿颗粒粒径分布特征。颗粒粒径测试结果如图 4 所示。

由图 4a—图 4c 可知:3 条测线的尾矿粒径级配曲线分离程度均较高,放矿试验的水力分选效果良

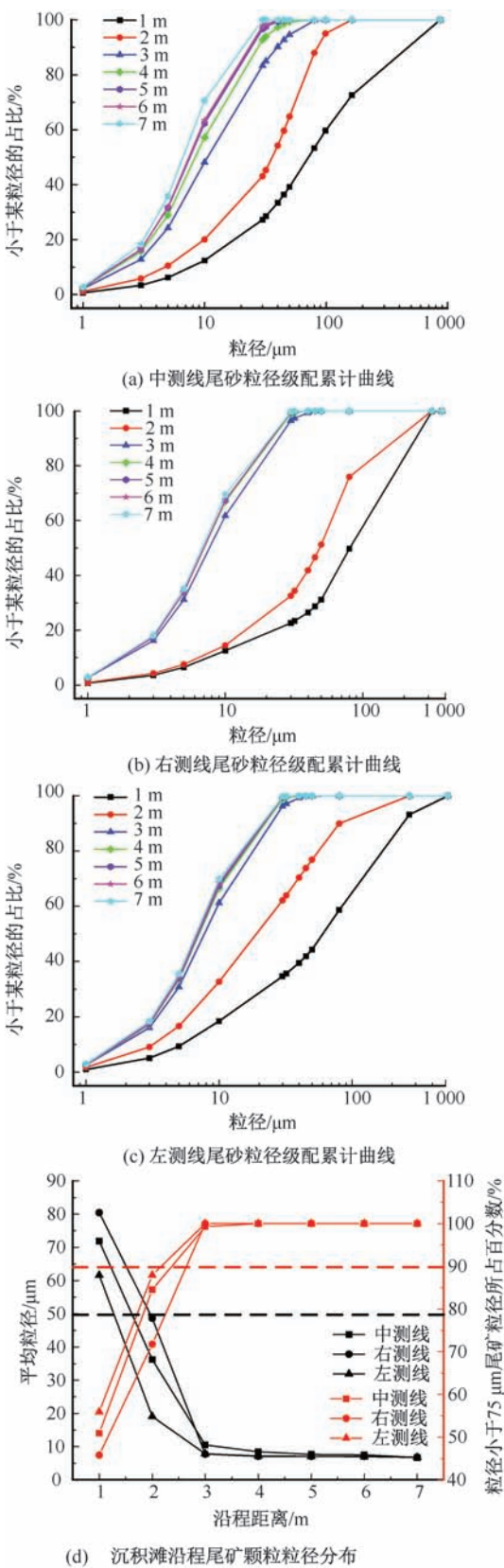


图 4 沉积滩面尾砂粒径级配累计曲线

Fig. 4 Cumulative grain size gradation curve of sedimentary beach tailing sand

好。为进一步描述尾矿浆液排放过程中的沿程细化特性,绘制平均粒径、粒径小于 $75\text{ }\mu\text{m}$ 的尾矿颗粒含量与沿程距离的变化关系(图 4d)。由图 4d 可知:以 $75\text{ }\mu\text{m}$ 作为粗、细颗粒分界值^[17],粒径小于 $75\text{ }\mu\text{m}$ 的尾矿颗粒含量随沿程距离的增加而增加,平均粒径随沿程距离的增加而减小。从沉积滩放矿口到流槽末端尾矿颗粒粒径由粗变细,说明水力分选效应容易使沉积滩面上较细颗粒向更远处运移和淤积。尾矿浆经排放后,浆液在消能坑附近形成扇形漫流区,大部分粗粒在该区域沉积,小部分粗粒随水流流速的变小而逐渐向远处沉积,细粒主要沉积在流槽下游。

左、中、右 3 条测线平均粒径变化范围分别为 $61.6\sim 6.77$ 、 $71.86\sim 6.73$ 和 $83.42\sim 6.83\text{ }\mu\text{m}$,选取左、中、右测线平均粒径 $50\text{ }\mu\text{m}$ 时对应的沿程距离,分别为 1.25 、 1.70 和 1.90 m ;左、中、右 3 条测线细粒含量变化范围分别为 $55.93\%\sim 100\%$ 、 $50.91\%\sim 100\%$ 、 $45.80\%\sim 100\%$,选取左、中、右测线细粒含量为 90% 时对应的沿程距离,分别为 2.20 、 2.35 和 2.70 m 。平均粒径与细粒含量在沿程距离 $1\sim 3\text{ m}$ 范围内变化较大,在沿程距离 $3\sim 7\text{ m}$ 范围内变化较小。上述差异性可归于以下原因:①细粒尾矿沉降过程中易形成絮团、絮网结构,不利于尾矿颗粒分选沉降,因而易使沿程距离 $3\sim 7\text{ m}$ 范围内细颗粒尾矿聚集。②在沿程距离 $1\sim 3\text{ m}$ 范围内,水流速率较大,横向水流为尾矿颗粒沉积与运动的主导因素,进而使得该范围内尾矿颗粒粒径分布较大;在沿程距离 $3\sim 7\text{ m}$ 范围内,水流速率较小,竖向自重为尾矿颗粒沉积与运动的主导因素,从而使得该区域尾矿颗粒呈聚集现象。

2) 沉积滩垂直剖面尾矿颗粒粒径的分布特征。沉积滩垂直剖面尾矿颗粒粒径分布如图 5 所示。平均粒径和细粒含量在深度 $2\sim 22\text{ cm}$ 内的变化范围分别为 $78.35\sim 106.14\text{ }\mu\text{m}$ 、 $30.02\%\sim 46.30\%$,平均粒径、细粒含量随深度的增加表现为交错变化,这一结论与图 2b 的沉积体粗细颗粒交错现象一致。

2.4 水位高度变化特征

为研究水位高度的变化特征,监测试验过程中各 U 型水位管的水位高度,浆液排放后水位高度变化曲线如图 6 所示,水位高度与沿程距离的变化关系如图 7 所示。由图 6 可知:各 U 型水位测管水位高度随浆液排放次数的增加呈上升趋势,在整个浆液排放堆积过程中最前端 U1 测点水位始终最高。随浆液排放次数的增加,U1 相对其它水位管高度的

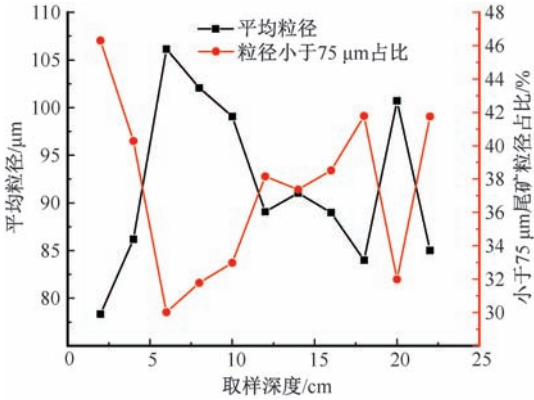


图5 沉积滩竖直剖面尾矿颗粒粒径分布
Fig.5 Distribution of tailings particle size in vertical profile of sedimentary beach

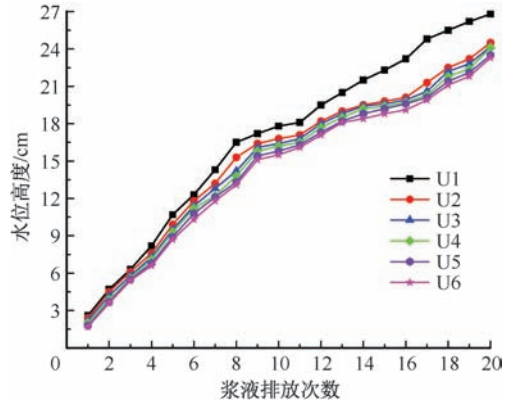


图6 浆液排放后水位高度变化曲线
Fig.6 Water level height change curve after slurry discharge

差值越来越大,该结果归因于 U1 水位测管位置多为粗颗粒尾矿,渗透性较好,水进入土体速度较快所致。由图 7 可知:第 5 次、第 10 次、第 15 次、第 20 次浆液排放后水位高度分别为 10.7~8.7、17.8~15.5、22.3~18.8 和 26.8~23.3 cm,水位高度随尾矿浆量的增加而增加,堆积体高度随尾矿浆量的增加而增加。由于前 5 次浆液排放时流槽内尾砂量不足以堆积起较高的坝体,致使第 5 次浆液排放后的水位高度与后 3 组差值较大。当浆液排放次数达 10 次后,流槽内尾砂量已堆积形成了稳定的坝体结构,所以第 10 次浆液排放结束后的水位高度与后 2 组差值较小。由于沿程距离 100~200 cm 沉积尾砂颗粒主要为粗粒尾砂,该区域内粗颗粒粒径变化较大,沿程距离 200~600 cm 沉积尾砂颗粒主要为细粒尾砂,该区域内细颗粒粒径变化较小,这将引起水位高度在沿程距离 100~200 cm 范围内变化较大,沿程距离 200~600 cm 范围内变化较小,水位高度随沿程距离变化曲线整体表现为前陡后缓。相对于第 5 次、第 10 次浆液排放沿程距离 100~200 cm 的水位高度,第 15 次、20 次变化较大,这种现象是由沉积滩后期坡度较大所导致的。

尾矿沉积是典型的高含水土体沉积、固结和排水的过程。为研究尾矿浆液排放堆积停止后尾矿沉积体的固结排水特征,监测各 U 型水位管的高度,绘制尾矿浆液排放终止了水位高度变化曲线如图 8 所示。由图 8 可知:各 U 型水位管的水位高度在尾矿浆液排放终止后均具有下降的趋势,U1—U6 的水位高度分别下降了 14.8、12.7、12.9、13.5、13.1 和 13.3 cm,尾矿停止排放 160 min 后各 U 型水位测量管水位高度保持基本稳定。U1 水位高度下降最大,其它 5 组水位高度变化曲线斜率基本一致。

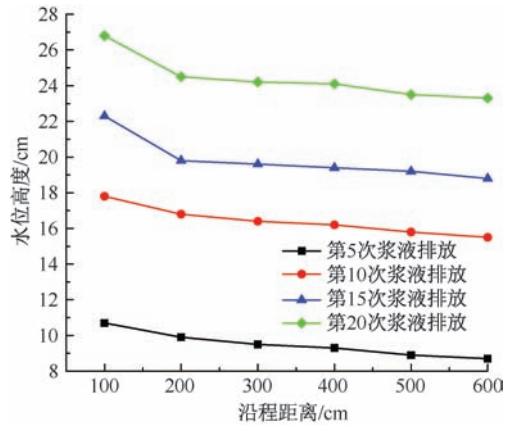


图7 水位高度与沿程距离变化关系
Fig.7 Variation of water level elevation in relation to distance along a course

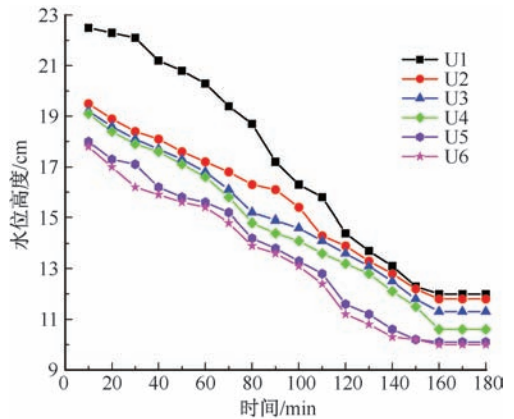


图8 尾矿浆液排放终止了水位高度变化曲线
Fig.8 Tailings slurry end-of-discharge water level height change curve

2.5 孔隙水压力变化特征

尾矿中孔隙水压力是由尾矿骨架内孔隙水承受上部料浆重力或其他外部载荷而产生的,即液体对

尾矿结构骨架的作用力^[18]。监测试验过程中流槽内测点 1—测点 8 的孔隙水压力传感器数值,孔隙水压力变化曲线如图 9 所示,试验过程中各传感器的孔隙水压力随尾矿浆量的增加而呈线性增加,且各曲线的变化具有较好的相似性,孔隙水压力的变化曲线均表现出“上升—下降”的周期性特征。“上升”阶段为尾矿浆排放堆积过程,该阶段尾矿沉积滩高度不断累积,由于孔隙水不能及时排出,导致孔隙水压力的逐渐积累。“下降”阶段为间歇停止排放尾矿浆过程,该阶段尾矿沉积体在自重下固结排水,超孔隙水压力逐渐消散。

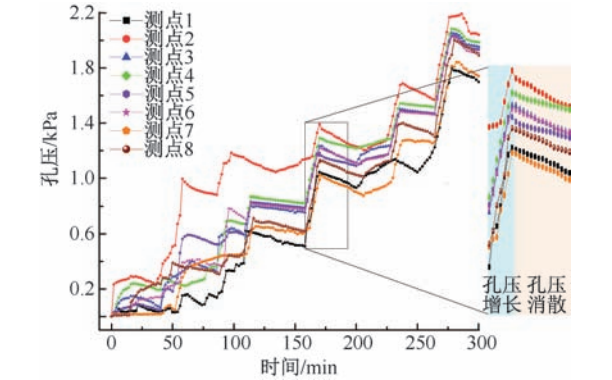


图 9 孔隙水压力变化曲线
Fig. 9 Pore water pressure change curve

2.6 尾矿浆流动特征

试验尾矿浆液的排放速度控制为匀速,并保持矿浆流速方向与沿程距离方向平行。由于实际中尾矿坝是在具有一定坡度的情况下进行尾矿浆液排放,因而选择第 15 次浆液排放过程中尾矿浆的流动特征进行分析。尾矿浆流动特征如图 10 所示。试验过程中尾矿排放方式为间歇式,间断流动尾矿浆在沉积滩表面冲刷形成了冲沟边界。冲沟边界周边水流条件紊乱,冲淤交替迅速,为库内夹层、透镜体的产生提供了条件;沉积尾矿扇形区边界与消能坑边界重合,由放矿口处下泄的尾矿浆冲击而形成,该区域与周边沉积滩面具有一定高度差;弯曲主流槽区为尾矿浆主要流动区域,形状无规则,处于 2 个冲沟边界或 2 个沉积尾矿扇形区的交界,该区域尾矿浆流速大,挟砂能力强。

由图 10a 可知:流槽首端下泄尾矿的运动浆体对周边沉积滩产生冲刷。运动浆体与原沉积滩表层尾砂发生冲刷后,导致浆体中部分尾砂颗粒水平流速抵消而沉积,原沉积表层尾砂颗粒再次拥有流速而向前运动。表现为尾矿浆围绕沉积尾矿扇形区以扇形发散方式流向流槽中部^[19]。由图 10b 可知:尾

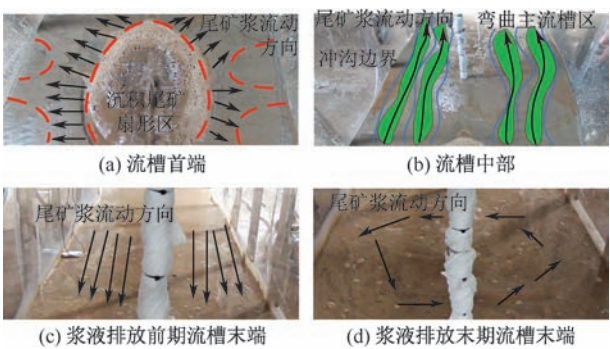


图 10 尾矿浆流动特征
Fig. 10 Characteristics of movement direction of tailings slurry

矿浆在经历扇形发散流动后,流入了 2 个冲沟边界的交界区域,即弯曲主流槽区。弯曲主流槽区尾矿浆液呈蜿蜒曲折的流动特征,并以不规则溪流的方式流向流槽末端。由图 10c 和图 10 d 可知:尾矿浆已流入尾水面区域,尾矿浆先以层流方式流动,后因浆液流速减小发展为无规则旋转方式流动。试验成功地模拟了尾矿库中普遍存在的扇形区、冲沟游荡区以及沟后层流区等沉积滩面特征。

2.7 尾矿浆运动轨迹特征

为量化表征尾矿沉积过程的流动特征,选用直径为 18 mm 的球形小泡沫追踪尾矿浆的运动轨迹,图像数据采集间隔为 1 s。通过绘制球形小泡沫运动迹点,即可表征尾矿浆运动轨迹,结合前后 2 个连续小泡沫的位置差异和时间间隔即可计算获得尾矿浆的运动速率及运动速度变化率。尾矿浆运动轨迹、速率以及速度变化率如图 11 所示,其中沿程速率和轴向速率分别用 V_x 、 V_y 表示,沿程方向速度变化率和轴向方向速度变化率分别用 a_x 、 a_y 表示。

由图 11a 可知:尾矿浆在沿程距离 238 cm 处基本保持静止。尾矿浆运动轨迹在轴向距离方向上发生了改变,具体表现为在沿程距离 218 cm 前尾矿浆以轴向距离正方向运动;在沿程距离 218 cm 后尾矿浆以轴向距离负方向运动。由图 11b 可知:尾矿浆沿程速率随沿程距离的增加而波动性较大。尾矿浆在沿程距离 0~85 cm 范围内主要处于沉积尾矿扇形区与冲沟边界的弯曲主流槽区,且沉积滩的坡度变化较大,所以尾矿浆沿程速率随沿程距离的增加而增加;在沿程距离 85~102 cm 范围内,浆液处于弯曲主流槽区,故尾矿浆沿程速率随沿程距离的增加而减小;沿程距离 102~153 cm 范围内,尾矿浆沿程速率随沿程距离的增加而增加;又因尾矿浆在沿程距离 153~202 cm 运动受到冲沟边界阻碍,致使

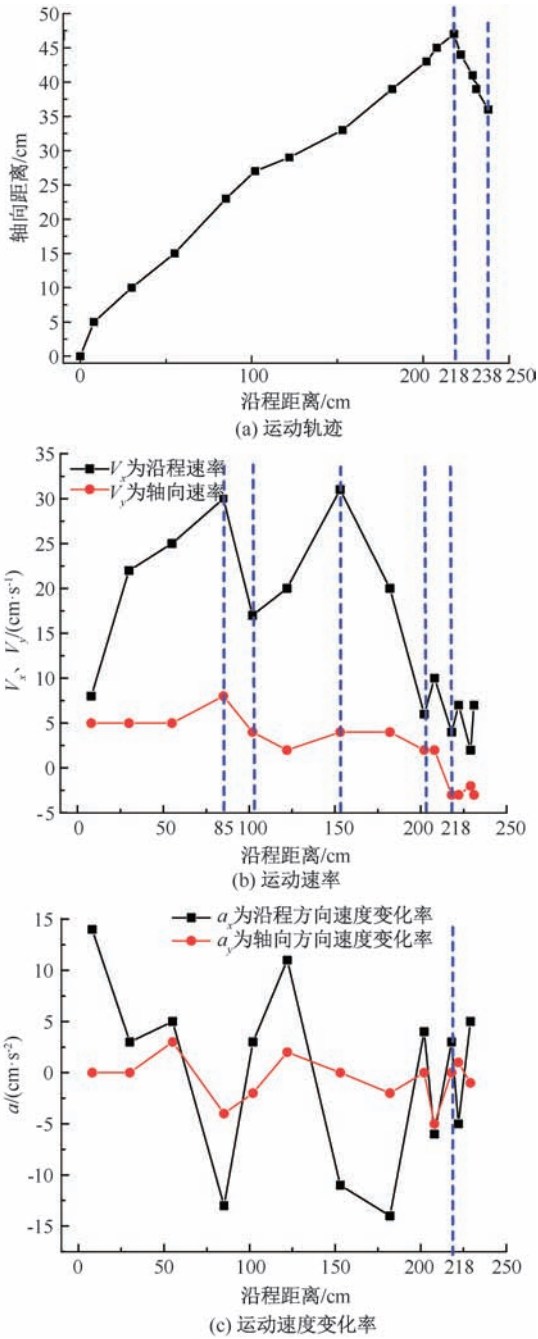


图 11 尾矿浆运动轨迹、速率以及速度变化率

Fig. 11 Tailings slurry trajectory, rate and rate of change of velocity

浆液沿程速率随沿程距离的增加而减小。尾矿浆沿程速率在沿程距离 202~218 cm 范围内仍具有波动性,在沿程距离达 218 cm 后,尾矿浆沿程运动速率的变化幅度随沿程距离的增加而减小。对于轴向水流速率而言,由于尾矿浆排放的矿浆流速方向与轴向方向垂直,浆液排放对轴向水流流动的影响较微弱一致,所以轴向方向水流速率始终低于沿程方向的水流速率,水流速率的波动性也相对较小。

运动速度的变化率可间接反映水流的紊动尺度,而水流的紊动尺度与滩底面形态及发育程度密切相关。由图 11c 可知:尾矿浆速度的变化率在沿程距离 0~218 cm 范围内始终处于剧烈变化状态,表明水流紊动强烈,各方向随机作用力对尾矿浆运动影响剧烈,反映了滩底面的不规则动态演化较为显著;尾矿浆速度变化率在沿程距离 218 cm 后尾矿浆速度变化率程度较小,表明水流紊动较弱,各方向随机作用力对尾矿浆运动影响较微弱,反映了滩底面动态变化趋于平稳。

3 尾矿沿程沉积细化机制

在尾矿浆流动过程中,由于其机械能的损失,流动速度不断下降。当流动速度高于某粒径颗粒临界分离流速时,该粒径颗粒将继续被尾矿浆携带,保持运动;当流动速度低于某粒径颗粒临界分离流速时,该粒径颗粒与尾矿浆分离,发生沉积。由图 4d 可知:尾矿颗粒粒径随沿程距离的增加而减小,不同粒径颗粒的沉积距离决定了尾矿颗粒在沉积滩面上的细化程度,而尾矿沉积滩分级效果对尾矿库的正常运营与稳定性有较大影响。

通过颗粒受力极限平衡方程和尾矿浆流动能量守恒方程可推导沿程沉积距离与尾矿颗粒粒径的理论关系式^[20]。假设尾矿浆在沉积滩面上的流动满足以下条件:①尾矿浆体为恒定流,总流量在流动过程中不发生变化;②在尾矿浆上的质量作用力只有重力;③沉积滩面任意过流断面为渐变流;④沉积滩的过流面之间的流量保持不变;⑤尾矿颗粒形状为等量球体。

尾矿颗粒在沉积与运动过程主要受到拖拽力、上举力、摩擦力和等效重力等的作用,尾矿颗粒受力分析如图 12 所示。对于单个尾矿颗粒的理论沿程沉积距离计算如下:

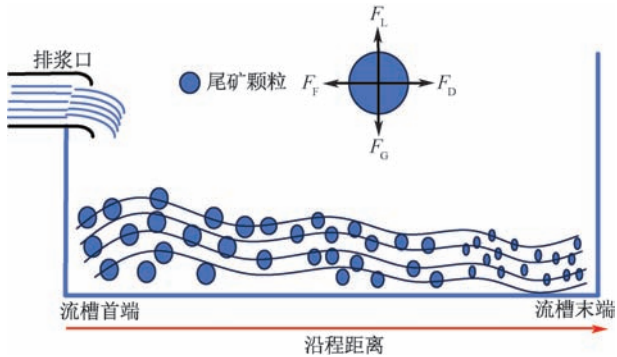


图 12 尾矿颗粒受力分析

Fig. 12 Force analysis of tailings particle

$$F_D = C_D \alpha d^2 \frac{pv_c^2}{2} \tag{1}$$

$$F_L = C_L \alpha d^2 \frac{pv_c^2}{2} \tag{2}$$

$$F_G = \alpha (\gamma_s - \gamma_L) d^3 \tag{3}$$

$$F_F = f(F_G - F_L) \tag{4}$$

式中: F_D 为拖曳力, N; F_L 为上举力, N; F_G 为颗粒等效重力, N; F_F 为摩擦力, N; C_D 、 C_L 分别为拖曳力系数、上举力系数; v_c 为颗粒临界分离流速, m/s; α 为面积系数; d 为等量球体的直径, 即为尾矿颗粒粒径, m; p 为清水容重, N/m³; γ_s 、 γ_L 分别为固体颗粒容重、尾矿浆容重, N/m³; f 为摩擦因数。在固液两相流的尾矿浆流体中, 若尾矿浆中的尾矿颗粒保持平衡, 即考虑在尾矿颗粒在受拖曳力、上举力、等效重力、摩擦力作用下平衡, 建立力矩平衡方程式如下:

$$F_D L_D + F_L L_L + F_F L_F = F_G L_G \tag{5}$$

式中: L_D 为拖曳力力臂, m; L_L 为上举力力臂, m; L_F 为摩擦力力臂, m; L_G 为颗粒等效重力力臂, m。

令 $L_D = L_L = L_F = L_G$, 联立式(1)~式(5), 即可得到尾矿颗粒的分离流速:

$$V_c = \sqrt{\frac{2d(1-f)(\gamma_s - \gamma_L)}{C_{Dp} + (1-f)C_{Lp}}} \tag{6}$$

对于在沿程距离 x 处的尾矿浆, 根据恒定总伯努利方程:

$$h_w = k_0 x v_x^2 \tag{7}$$

$$xi + \frac{\alpha_1 v_0^2}{2g} = \frac{\alpha_2 v_x^2}{2g} + h_w \tag{8}$$

式中: h_w 为总流水头损失, m; k_0 为定值参数; x 为沿程距离, m; v_x 为沿程距离 x 处尾矿浆流速, m/s; v_0 为初始流速, m/s; i 为沉积滩坡度, (°); α_1 、 α_2 分别为动能修正因数; g 为重力加速度, m/s²。联立式(7)和式(8)可得出:

$$v_x = \sqrt{\frac{2gxi + \alpha_1 v_0^2}{\alpha_2 + 2gk_0 x}} \tag{9}$$

结合式(6)和式(9), 当 $v_c = v_x$ 时粒径为 d 的尾矿颗粒将发生沉积:

$$x_c = \frac{\alpha_1 v_0^2 [C_{Dp} + C_{Lp}(1-f)] - 2d\alpha_2(1-f)(\gamma_s - \gamma_L)}{2d g k_0 (1-f)(\gamma_s - \gamma_L) - 2g i [C_{Dp} + C_{Lp}(1-f)]} \tag{10}$$

式中 x_c 为该粒径尾矿颗粒理论沿程沉积距离, m。
对式(10)进行简化, 可得:

$$x_c = \frac{N - dM}{dY - H} \tag{11}$$

式中 N 、 M 、 Y 、 H 均为定值参数。

综合式(10)、式(11)可知: 尾矿颗粒理论沿程沉积距离与尾矿颗粒粒径呈负相关关系。尾矿颗粒沿程沉积距离与矿浆初始流速、矿浆浓度、沉积滩坡度和尾矿理化性质等有关。该数学模型描述了沿程沉积距离与尾矿颗粒粒径之间的联系, 可为尾矿坝数值建模以及在无实测数据情况下预测坝体内尾矿颗粒粒径分布特征提供参考。

4 结 论

1) 在流槽首端尾矿沉积滩面出现扇形消能坑; 堆积体的高度随流槽内排放尾矿浆的增加而增加, 随沿程距离增加呈下降趋势; 沉积滩坡度可划分为 3 个区域: 从流槽首端到流槽末端依次为沉砂排放区、沉砂沉积区、溢流沉积区, 3 个区域对应的沉积滩坡度陡缓程度分别为: “平缓—陡—平缓”; 尾矿浆量不足时, 流槽内平坦的地形使得尾矿浆表现为平面自由流动性态。

2) 沉积滩面上的尾矿颗粒粒径分布特征宏观表现为前粗后细; 沉积滩竖直剖面出现了粗细颗粒交错的分层沉积现象; 水位高度随尾矿浆量的增加而增加, 整体表现为前陡后缓; 孔隙水压力随尾矿浆量增加呈“上升—下降”周期性变化特征, 整体表现为线性增长趋势。

3) 流槽首端尾矿浆液呈扇形发散的流动特征; 中部尾矿浆液呈蜿蜒曲折的流动特征; 末端尾矿浆液呈层流以及无规则旋转的流动特征。

4) 尾矿浆的运动轨迹在沿程距离 218 cm 前以轴向正方向运动, 在沿程距离 218 cm 后以轴向负方向运动; 尾矿浆沿程运动速率具有波动性特征; 尾矿浆运动速度的变化率在沿程距离 218 cm 前变化强烈, 沿程距离 218 cm 后变化微弱。揭示了尾矿浆运动特征随沿程距离的变化趋势。

5) 沿程沉积距离与尾矿颗粒粒径呈负相关, 与矿浆初始流速、矿浆浓度、沉积滩坡度、尾矿理化性质有关。

参 考 文 献

[1] 段志杰, 李全明, 赵学义, 等. 细粒级尾矿上游法筑坝放矿参数优选试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(8): 1474-1482.

- DUAN Zhijie, LI Quanming, ZHAO Xueyi, et al. Experimental study on optimization of ore drawing parameters for upstream damming of fine-grained tailings [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44 (8): 1 474–1 482.
- [2] 李全明, 段志杰, 于玉贞, 等. 尾矿坝沉积结构特征与性能演化规律研究进展[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(2): 6–19, 2.
- LI Quanming, DUAN Zhijie, YU Yuzhen, et al. Research progress on deposition structure characteristics and performance evolution law of tailings dam [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(2): 6–19, 2.
- [3] PETTIBONE H C, KEALY C D. Engineering properties of mine tailings [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1971, 97(9): 1 207–1 225.
- [4] 尹光志, 余果, 张东明, 等. 细粒尾矿堆积坝物理模型试验研究[J]. 矿业安全与环保, 2005, 31(5): 4–5, 89.
- YIN Guangzhi, YU Guo, ZHANG Dongming, et al. Physical modelling of fine-grained tailings impoundment dams [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2005, 31(5): 4–5, 89.
- [5] SHAO Longtan, CHEN Zhixiang, GUO Xiaoxia, et al. Hydraulic classification and sedimentation behaviors of iron tailings [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(5): 3 989–4 000.
- [6] 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, LYU Zhiqiang, JIN Jiaxu, et al. Model experimental study of effect of slurry draining speed on tailings deposition [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(6): 880–887.
- [7] LEBITSA G, HEYMANN G, RUST E. Excess pore pressure generation during slurry deposition of gold tailings [J]. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2021, 35(2): 95–114.
- [8] GUI Rong, HE Guicheng. The effects of internal erosion on the physical and mechanical properties of tailings under heavy rainfall infiltration [J]. Applied Sciences Basel, 2021, 11(20): DOI:10. 3390/app11209496.
- [9] 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): 1 832–1 838, 1 867.
- ZHANG Dongming, ZHENG Binbin, YIN Guangzhi, et al. Study on upstream dam stacking and model test of highly concentrated graded tailings [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(7): 1 832–1 838, 1 867.
- [10] TIAN Sen, ZHAO Ying, GONG Yuanheng, et al. Experimental study on tailings deposition distribution pattern and sedimentation characteristics [J]. ACS Omega, 2024, 9(17): 19 428–19 439.
- [11] 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): 1 220–1 227.
- GUO Xiaoxia, CHEN Zhixiang, SHAO Longtan, 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): 1 220–1 227.
- [12] 金佳旭, 崔红志, 梁冰, 等. 地震作用下尾矿库溃坝过程模型试验及加固方案[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(2): 92–97.
- JIN Jiaxu, CUI Hongzhi, LIANG Bing, et al. Model-based study on collapse of tailing sreservoir dam under earthquake action and reinforcement scheme [J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(2): 92–97.
- [13] 杨俊杰. 相似理论与结构模型实验[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005: 9–17.
- [14] 凌贤长, 郭明珠, 王东升, 等. 液化场地桩基桥梁震害响应大型振动台模型试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 7–10.
- LING Xianchang, GUO Mingzhu, WANG Dongsheng, et al. Large-scale shaking table model test of seismic response of bridge of pile foundation in ground of liquefaction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(1): 7–10.
- [15] HENRIQUEZ J, SIMMS P. Dynamic imaging and modeling of multilayer deposition of gold paste tailings [J]. Minerals Engineering, 2009, 22(2): 128–139.
- [16] KWAK M, JAMES D F, KLEIN K A. Flow behavior of tailings paste for surface disposal [J]. International Journal of Mineral Processing, 2005, 77(3): 139–153.
- [17] 乔兰, 屈春来, 崔明. 细粒含量对尾矿工程性质影响分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 923–927, 945.
- QIAO Lan, QU Chunlai, CUI Ming. Effect of fines content on engineering characteristics of tailings [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(4): 923–927, 945.
- [18] 何文, 陈豪, 郑场松, 等. 尾矿渗透破坏及其导波监测试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(2): 415–424.
- HE Wen, CHEN Hao, ZHENG Changsong, et al. Experimental research on seepage failure of tailings and its monitoring using guided waves [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(2): 415–424.
- [19] 王昆, 张俊阳, 杨修志, 等. 考虑精细地形的尾矿库溃坝外泄泥流运移规律研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(12): 95–101.
- WANG Kun, ZHANG Junyang, YANG Xiuzhi, et al. Research on migration law of tailings dam breach runoff mud flow considering fine terrains [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(12): 95–101.
- [20] 郑艳娜, 朱永英. 水力学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2017: 64–79.



作者简介: 陈青林 (1990—),男,江西抚州人,博士,副教授,主要从事采矿工程、尾矿坝灾变机制与防控技术,边坡稳定等方面的研究。E-mail: chenql@jxust.edu.cn。