

doi: 10.11731/j.issn.1673-493x.2018.05.014

## 多因素影响下尾矿库坝体沉积特性的试验研究\*

赵怀刚<sup>1</sup>, 王光进<sup>1,2</sup>, 许志发<sup>1</sup>, 唐永俊<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650000;

2. 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)

**摘要:** 为了研究尾矿颗粒的沉积特性, 基于四川某尾矿库进行颗粒取样, 并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。研究表明: 干滩面上的沉积规律宏观上表现为前粗后细的规律, 并可概化为“粗化—缓慢细化—细化”的变化过程, 局部位置出现粒径的突变; 干滩面上不同位置均出现了临界粒径, 而该粒径的出现标志着某一粒径尾矿含量的显著增多; 堆积坝体的颗粒粒径整体呈上粗下细的规律, 不同深度位置有夹层、互层、交错层等现象出现; 尾矿颗粒的分离流速随着尾矿粒径的增大而变小, 而重力与水流拖拽力呈三次线性关系; 当选矿工艺一定时, 尾矿颗粒在干滩面上的沉积与颗粒流速成正比, 和干滩坡度、尾矿粒径成反比。

**关键词:** 尾矿库; 干滩; 恒定水流理论; 沉积规律

**中图分类号:** X936      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1673-193X(2018)-05-0095-07

### Experimental study on deposition characteristics of tailings dam body influenced by multiple factors

ZHAO Huaigang<sup>1</sup>, WANG Guangjin<sup>1,2</sup>, XU Zhifa<sup>1</sup>, TANG Yongjun<sup>1</sup>

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650000, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan Hubei 430071, China)

**Abstract:** In order to study the deposition characteristics of tailings particles, the particles sampling was carried out based on a tailings reservoir in Sichuan, and the deposition characteristics of tailings particles were analyzed by using the indoor screening experiments and the constant flow theory. The results showed that the deposition laws on the surface of dry beach macroscopically presented as the first coarse and then fine, and could be generalized to the change process of “coarse-slow refinement-refinement”, with the mutation of the particle size at the local positions. The critical particle size appeared at different positions on the surface of dry beach, and the appearance of this particle size reflected the significant increase of the tailings content with a certain particle size. The particle size of the accumulation dam body presented the laws of upper coarse and lower fine as a whole, and the phenomena of interlayer, interbedding and cross-bedding appeared at different depths. The separation flow velocity of the tailings particles decreased with the increase of the tailings particle size, and the gravity had a cubic linear relationship with the drag force of water flow. The derivation formula showed that when the mineral processing technology was fixed, the deposition of tailings particles on the surface of dry beach was directly proportional to the particle velocity, and was inversely proportional to the slope of dry beach and the tailings particle size.

**Key words:** tailings reservoir; dry beach; constant flow theory; deposition laws

收稿日期: 2018-03-12

\* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0804600); 国家自然科学基金青年项目(41602307); 国家安全生产监督管理总局重点项目(yunnan-001-2016AQ); 云南铜业集团校企基金项目(2015YT05); 昆明理工大学实验室建设与管理研究项目(SYYJ23); 中国博士后科学基金项目(2017M613006)

作者简介: 赵怀刚, 硕士研究生, 主要研究方向为矿山岩土灾害防治与治理。

通信作者: 王光进, 博士, 教授, 主要研究方向为矿山岩土边坡稳定性及其预测预警。

## 0 引言

目前国内采用上游法筑坝的尾矿库已经超过 10 000 多座,而作为矿山生产的 3 大重点性工程,尾矿库的稳定性不仅关系到矿山的生产安全,同时还影响着下游人民群众的生命财产安全。由于上游法尾矿库的堆积坝是由人工松散体材料构建,放矿过程中的水力分选及沉积使得尾矿库沉积颗粒的粒径和特性差异非常大,这就造成库内尾矿的颗粒组成、物理力学性质等方面存在明显差异<sup>[1]</sup>。因此,研究尾矿库颗粒沉积规律不仅对尾矿库稳定性评价有着重要的作用,同时还对矿山放矿方式的优化也有着指导性的意义。而对于此类尾矿库的研究,其核心问题就是入库尾矿颗粒在浆体中受水力分选后不同沉积点粒径变化的问题。

对于尾矿库颗粒沉积的研究,部分研究成果<sup>[2-3]</sup>指出尾矿颗粒的沉积特性是影响尾矿堆积坝体抗剪强度和稳定性的重要原因之一,并分析了尾矿颗粒沉积和粒径组成等对物理力学性质和坝体稳定性的影响。同时巫尚蔚等<sup>[4]</sup>研究了尾矿浆的沉积分层特征随时间演化规律,讨论了尾矿沉积物的细观结构特征和分层划分依据,并解释了絮凝作用对沉积特征的影响机理;杜飞飞等<sup>[5]</sup>通过沉降试验测定了尾矿在不同浓度和不同沉降方式下的沉降速度,并结合实测资料建立了尾矿颗粒在静水环境中的澄清距离;Giuliano 等<sup>[6]</sup>用多种技术手段对硫铁矿的粒径进行测量,提出用 Rosin - Rammler 函数描述尾矿沉积物的粒径分布。然而,由于放矿位置、浓度、流速、方式的不同,尾矿库内不同位置的颗粒沉积规律表现出巨大的差异性,因此徐宏<sup>[7]</sup>、居伟伟<sup>[8]</sup>、李权<sup>[9]</sup>等根据实际的勘探资料或室内堆坝模型试验研究了上游式尾矿坝尾矿干滩的沉积规律,提出了影响沉积规律的影响因素和尾矿颗粒沉积距离的计算方法;张千贵等<sup>[10]</sup>针对尾矿沉积分层的特点,研究了粗细尾矿分层结构的力学特性;乔兰等<sup>[11]</sup>分析了上游式尾矿库尾矿经排放、沉积、分选等作用后颗粒组成的变化特征及其对尾矿工程性质的影响;胡海等<sup>[12]</sup>通过 Slide 软件对云南某尾矿坝在考虑沉积特性或未考虑沉积特性时对稳定性的影响进行了研究;田莉梅<sup>[13]</sup>、尹光志等<sup>[14]</sup>、敬小非等<sup>[15]</sup>以新建尾矿库为工程背景,通过室内堆坝模型试验与土工试验,获得尾矿坝干滩面几何特征、颗粒分布规律,并通过数值模拟软件分析颗粒沉积特性对坝体稳定性的影响;梁冰等<sup>[16]</sup>采用自行研制的水力分选粒度分析装置研究了颗粒级配、浆体浓度和排浆速度等因素对尾矿沉积规律的影响。

综上所述,学者们已经对尾矿的沉积特性开展了大量研究,并分析了沉积特性对尾矿物理力学性质及坝体

稳定性影响。尽管如此,目前结合理论分析和现场试验开展尾矿库颗粒沉积规律的研究仍然比较少,还需要更深入系统的开展研究。因此,本文采用试验研究和理论分析相结合的方法,通过对四川某尾矿库现场取样和室内筛分实验获得干滩面和坝体尾矿颗粒的沉积规律,并利用恒定水流理论建立尾矿颗粒沉积的分离流速、最远沉积位置与干滩坡度的计算方法。研究成果可为该类尾矿库颗粒沉积规律、稳定性评价和放矿方式的优化提供一定的理论和实际指导。

## 1 尾矿库颗粒沉积特性试验

### 1.1 试验样本及试验工具

本次试验在该尾矿库干滩面上划定 3 条不同取样路线,使得样本能够充分体现整个尾矿库干滩的沉积特性,测线 1 距离坝体右侧库边 34 m,测线 2 和测线 3 分别依次向左侧推进,与测线 1 的间距分别为 80 m 和 130 m,每条测线尾矿试样的采取视干滩面长度而定(如图 1 所示),而坝体内部不同深度的尾矿样本则采用钻探的方式获取。尾矿粒径分析采用水筛的方法,小于 0.074 mm 以下的尾矿颗粒采用 LS13320/VSM + 激光粒度仪测定其含量。



图 1 尾矿坝干滩面尾矿现场取样

Fig. 1 Site sampling of dry tailings on the tailings dam

### 1.2 不同取样点尾矿粒径变化情况

为了充分了解该选厂排放尾矿的颗粒粒径变化情况,分别在排放口、坝前、库尾 3 个不同位置取样进行筛分实验,分析粒径变化情况,如图 2 所示。通过图 2 可以看出,干滩表面的尾矿颗粒和排放口的尾矿颗粒相比,粒径明显发生了变化,其原因在于经水力冲刷后的尾矿颗粒发生了重力分选,致使排放后的尾矿粒径发生变化。然而在干滩表面,尾矿颗粒的粒径曲线保持基本相同的变化趋势,一则是由于尾矿颗粒粒径比较均匀,二是坝前沉积的粗颗粒组在重复的水流冲刷下被携带

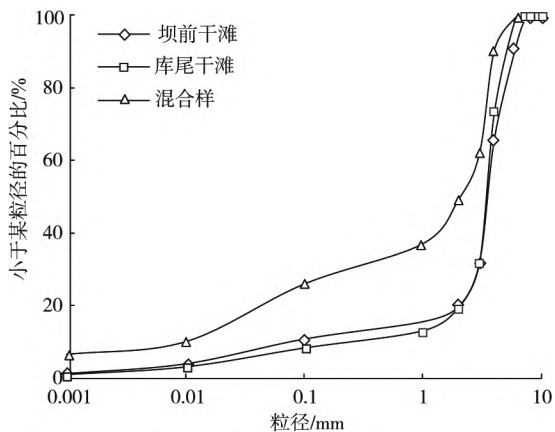


图2 不同取样点尾矿颗粒级配曲线

Fig.2 Gradation curve of tailings particles at different sampling points

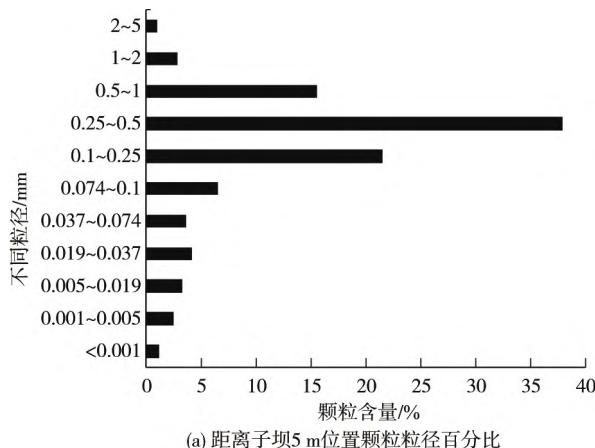
流向库尾。但坝前 0.01 ~ 1 mm 粒径范围内的尾矿颗粒略高于库尾处的尾矿样,这主要是因为坝前主要是粗颗粒沉积所造成的。

### 1.3 干滩面上沉积特性分析

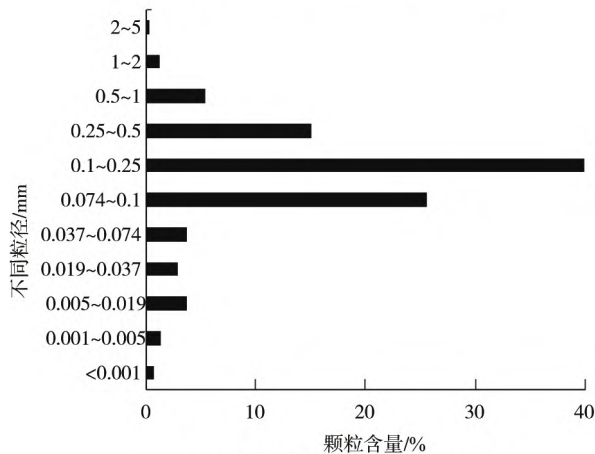
为了了解干滩面上不同位置尾矿颗粒沉积变化特性,选取干滩面上距子坝 5, 30, 60 m 共 3 个不同位置样本进行分析,如图 3 所示。

从图 3 可以看出,干滩面上的沉积规律宏观上从坝前到库尾表现出由粗到细的规律。坝前颗粒粒径主要集中在 0.1 ~ 1 mm,而干滩 30 m 位置集中在 0.074 ~ 0.5 mm,干滩 60 m 位置集中在 0.019 ~ 0.25 mm。出现这种变化规律的原因主要是由于尾矿浆经排放后存在分选的作用,浆体以排放口开始形成扇形漫流区,粗砂、细砂在自重的作用下沉积下来,推移质随水流流速的变小沉积,悬移质流向库尾静水区沉积。与此同时,图 3 中不同位置均出现了临界粒径的突然变化,当颗粒粒径变化达到临界粒径时,大于等于该临界粒径的尾矿颗粒含量显著增多,因此该粒径的出现可看作是判断该点尾矿分类的标志。如距离子坝 5 m, 0.1 ~ 0.25 mm 粒径的突然增多表明了坝前 5 m 位置主要会出现大于 0.1 ~ 0.25 mm 的粗粒组,而在距离子坝 30 m 位置,当 0.074 ~ 0.1 mm 粒径出现显著增加后,大于该范围的粒径颗粒也显著增加。因此对于某一尾矿库某一位置的粒径变化,临界粒径的变化可作为判断该点颗粒粒径变化范围的标志。

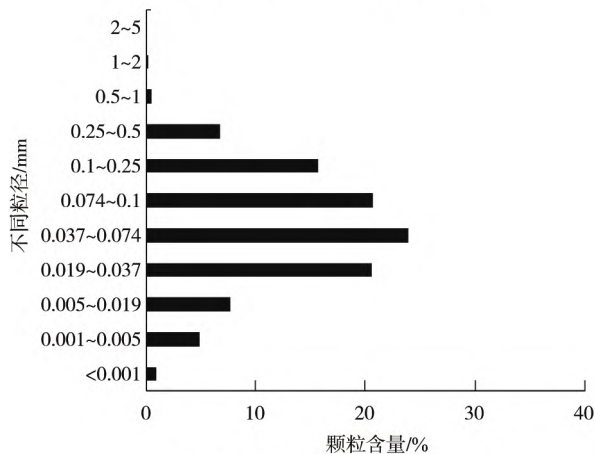
为了能够全面的体现尾矿库干滩面的沉积特性,采用平均粒径  $D_{50}$  来进行表征分析。图 4 为 3 条测线的尾矿颗粒在干滩面上整体的平均粒径  $D_{50}$  变化情况。从图 4 可以看出,不同测线平均平均粒径  $D_{50}$  变化趋势趋近相同,从坝前到库尾保持由粗到细的变化规律。这和该尾矿库采用的分散均匀放矿的方式存在很大的关系,由



(a) 距离子坝5 m位置颗粒粒径百分比



(b) 距离子坝30 m位置颗粒粒径百分比



(c) 距离子坝60 m位置颗粒粒径百分比

图3 不同位置颗粒含量分布

Fig.3 Distribution of particle content at different positions

于分散均匀排放的方式使得细颗粒尾矿在水流冲刷的作用下流向库尾,而粗颗粒在自重作用下分选沉积,形成了由粗变细的沉积规律,同时,排放口在坝前间距 20 m 左右使得整个坝前干滩横向保持了基本一致的沉积规律。然而,对比测线不同位置的粒径变化,  $D_{50} \geq 0.2$  mm 主要分布在坝 15 m 内;  $D_{50}$  在 0.17 ~ 0.2 mm 主要分布在 15 ~ 40 m 内;  $D_{50} \leq 0.17$  mm 主要分布在 40 ~

60 m 内,且在 6.45 m 位置  $D_{50}$  发生了突变,这种情况的发生是前期扇形沉淀交界地区形成的弯曲主流横槽内水流速较大,其推移质或沉砂质尾砂在二次水流的冲刷下再次发生了流动,表现了突变性的沉积特性。

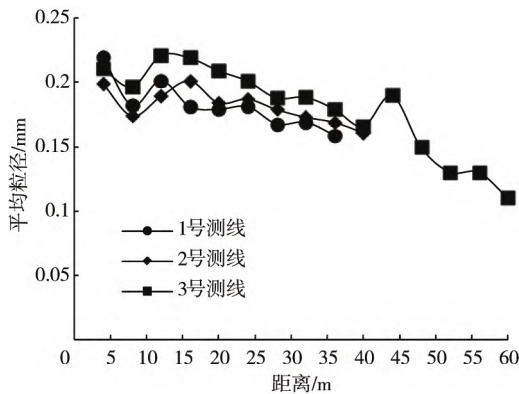


图 4 不同测线平均粒径  $D_{50}$  随距离变化  
Fig. 4 Different lines average particle size  $D_{50}$  content changes

不同颗粒粒径在干滩不同位置含量能够从另一方面反映尾矿库在坝前均匀放矿条件下干滩沉积规律。图 5 为距离坝前不同位置平均粒径  $D_{50}$  含量变化。

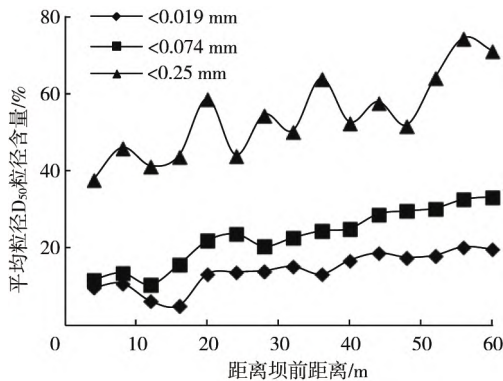


图 5 距离坝前不同位置平均粒径  $D_{50}$  含量变化  
Fig. 5  $D_{50}$  content of average particle size at different positions before dam

从图 5 对  $<0.019$  mm、 $<0.074$  mm、 $<0.25$  mm 平均粒径尾矿含量累积百分比的变化趋势分析可知,总体上看,干滩面上细颗粒含量随取样点距离的增加而逐渐增加,即水力分级后,排放点至库尾其尾矿颗粒具有由粗到细的沉积规律。由于颗粒运移过程中,粗颗粒在水流中容易先沉积下来,而细颗粒更容易受水流的携带流向库尾,较细的悬浮颗粒和胶质颗粒却只有到静水区时才沉淀,因此,水力的这种分级作用使得沉积滩上较细颗粒总的趋势是向更远处传送和沉积。

分析其不同位置平均粒径  $D_{50}$  含量变化,在距离子

坝 4 m 位置  $<0.074 \sim 0.25$  mm 的含量为 26%,而在距离子坝 60 m 位置  $<0.074 \sim 0.25$  mm 的含量也仅仅为 30%,这种变化与其选矿工艺有关,即排放的尾矿颗粒多集中在尾细沙部分;在距子坝 12 m 处,  $D_{50} \leq 0.074$  mm 的尾矿含量由 12.85% 快速下降为 6.97%,  $D_{50} \leq 0.019$  mm 的尾矿含量由 11.79% 下降为 5.12%;在距子坝 16 ~ 36 m,  $D_{50} \leq 0.074$  mm 的尾矿含量在 16.97% ~ 22.43%,  $D_{50} \leq 0.019$  mm 的尾矿含量为 9.01% ~ 13.72%;在距子坝 60 m 处,  $D_{50} \leq 0.074$  mm 的尾矿含量由 22.43% 上升为 34.94%,  $D_{50} \leq 0.019$  mm 的尾矿含量由 11.74% 上升为 22.45%。因此,对于尾矿库干滩粒径的变化大概可以概化为“粗化—缓慢细化—细化”的变化过程。由于该尾矿库采用的是坝前多管小支流分散放矿,浆体从排放管中流出后形成冲击力,会在坝前形成一个消能坑,矿浆从消能坑携带尾矿向四周流出,并形成以消能坑为圆心的扇形冲积滩,推移质尾矿沉积在扇形区,悬移质尾矿被矿浆携向远处,而在消能坑窝积区周围则多为沉砂质,颗粒较粗。同时在扇形堆积区外尾矿浆呈漫流状流,浆体受水流的分选作用,导致淤积尾矿的粒径逐渐变细,越接近库水面,颗粒越细,只有到达沉淀池的静水中时,大部分粒径较小的悬浮颗粒才缓慢的沉淀下来,导致细粒含量显著增加,细化现象比较明显。

1.4 尾矿颗粒沿垂向的沉积特性

尾矿颗粒的沉积特性不仅包括干滩表面的沉积规律,还包括垂直变化的规律。分析堆积坝体垂直的颗粒特性对于尾矿库稳定性的评价有着重要的意义。

图 6 为坝体不同深度尾矿堆积分类。从图 6 可以看出,钻孔取样的深度越深,坝体颗粒越细。在对坝体深度 0 ~ 10 m 的取样中,其颗粒粒径大多集中在 0.25 mm 以上的尾粉砂,当取样深度到达 20 m 时,基本上以尾黏土、尾粉质黏土为主,但是其中也交替出现了尾

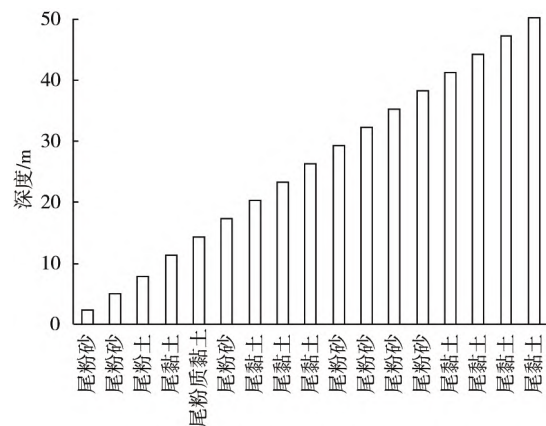


图 6 坝体不同深度尾矿堆积分类  
Fig. 6 Tailings accumulation classification at different depths



粉砂、尾黏土等。其原因是由于在重复的筑坝过程中,干滩前端的粗粒尾矿在水流冲刷下,受到水流的分选,被裹挟流向下游库尾造成某一位置尾矿粒径发生变化。

不同范围颗粒粒径在不同深度的含量变化趋势如图7所示。从图7可以看出宏观上随钻孔深度增加粗颗粒变少而细颗粒增加,呈现上粗下细的规律。同时不同深度还出现了粒径的交错变化、粗细相间的夹层、互层、交错层等现象。一方面由于尾矿采用软管分散放矿时,在每根软管每次放矿结束后,水力骤降,尾矿浆即很快就地沉淀,形成粗颗粒在下,细颗粒粘粒在上的特点;另一方面由于冲沟不平,在停止放矿后,局部冲沟中凹凸地段会出现夹层、透镜体现象,且在正常运行期间,停放某一软管的同时会打开其他相应软管放矿,新开放矿管的浆液将有可能在停止放矿软管前场地沉积新尾矿,覆盖了原沉淀尾矿,产生新一轮的沉淀,如此重复交错沉淀使尾矿沉积在垂直方向上即出现交错层理的沉淀结构。同时从图7中可以看出,相互交错的夹层、交错层只出现在11~32 m之间的深度,而在0~10 m和33 m的位置却没有出现上述相互交错的表现情况,而出现粒径的极差化现象,造成这种现象的原因是因为此组数据表征的是已经完成堆积的子坝颗粒沉积数据,在0~10 m的范围内,堆积子坝所用的筑坝尾砂是上一阶子坝放矿堆积完成后沉积在坝前的粗粒组,所以在勘探点0~10 m的深度范围主要是该阶堆积坝前一阶子坝的坝前位置,造成该深度范围内基本是粗粒组而细粒组含量极低,同时由于尾矿在干滩沉积表现出从坝前到库尾为由粗到细的现象,而在33 m深的位置,已经处于早期尾矿沉积的库尾位置,沉积的基本上为细颗粒或者极微小颗粒,所以该位置的细粒含量非常多而粗颗粒很少。

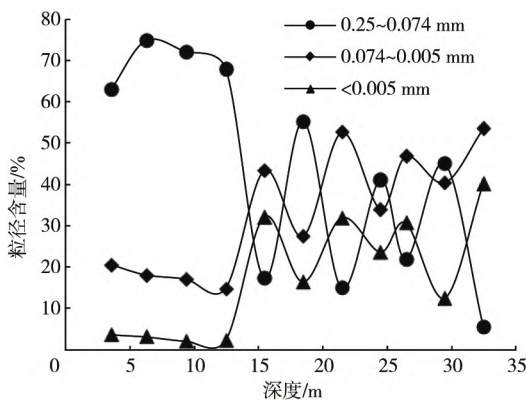


图7 不同粒径在不同深度的含量变化趋势  
Fig.7 Different particle size at different depths of content trends

## 2 干滩颗粒流动特性分析

根据对尾矿库颗粒沉积规律的分析,尾矿颗粒沉积从坝前到库尾表现出由粗到细的沉积规律,且矿浆流速、干滩坡度、尾矿粒径对于颗粒沉积特性均有重要的影响。因此基于恒定水流理论分析流速、干滩坡度、颗粒最远沉积距离对沉积规律的影响,并建立三者影响颗粒沉积的数学模型。

### 2.1 颗粒迁移和沉积分析

尾矿颗粒在浆体中沉积与否与其浆体的流速、颗粒物理力学性质等因素有关,且颗粒大小形状不规则。因此,概化尾矿颗粒形状为等量球体(见图8),在水流中只受拖拽力、上举力、摩擦力、等效重力影响。因此,对于单一的尾矿颗粒,其分离流速公式计算如下。

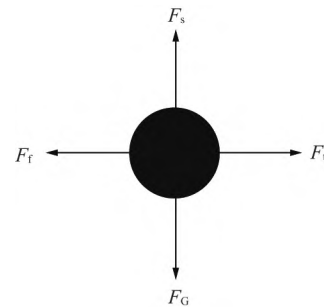


图8 尾矿颗粒受力分析

Fig.8 Tailings particles force analysis

$$\text{拖拽力: } F_t = C_t a d_i^2 \frac{\rho v_c^2}{2} \quad (1)$$

$$\text{上举力: } F_s = C_s a d_i^2 \frac{\rho v_c^2}{2} \quad (2)$$

$$\text{等效重力: } F_G = a(\gamma_m - \gamma_w) d_i^3 \quad (3)$$

$$\text{摩擦力: } F_f = f(F_G - F_s) \quad (4)$$

式中:  $C_t$ 、 $C_s$  分别为拖拽系数和上举力系数;  $\rho$  为尾矿颗粒密度  $g \cdot cm^{-3}$ ;  $\gamma_m$  分别为颗粒重度  $kN \cdot cm^{-3}$ ;  $\gamma_w$  为尾矿浆体的重度  $L \cdot cm^{-3}$ ;  $a$  为面积系数;  $d_i$  为颗粒的直径  $\mu m$ ;  $v_c$  为分离流速  $m \cdot s^{-1}$ 。

若尾矿颗粒在尾矿浆体中保持平衡,即需要:

$$F_t l_t + F_s l_s + F_f l_f = F_G l_G$$

令  $l_t = l_s = l_f = l_G$ , 可得尾矿颗粒在水流中分离的流速:

$$v_c = \sqrt{\frac{2d_i(\gamma_m - \gamma_w)(f - 1)}{\rho[C_s(1 + f) + C_t]}} \quad (5)$$

$$\text{即: } v_c = K\sqrt{d_i} \quad (6)$$

从式(5)~(6)中可看出,颗粒的分离流速和尾矿的粒径、尾矿浆重度、尾矿颗粒密度、颗粒在浆体中的摩擦力有关,当选矿和放矿工艺一定时,尾矿颗粒的分离

流速和尾矿颗粒粒径线性平方根成正比。

同时 根据文献<sup>[17]</sup>可知尾矿浆重量  $G$  与流速呈高次线性关系,引入式(1) (5),可得:

$$G = CF_1^3 \tag{7}$$

因此,对于颗粒在水流中的沉积现象:

当  $G > CF_1^3$  时,尾矿颗粒出现沉积;

当  $G > CF_1^3$  与  $G < CF_1^3$  交替发生时,尾矿颗粒呈现推移与滚动现象;

当  $G < CF_1^3$  时,尾矿颗粒称为悬移质,尾矿颗粒在水流带动下流向库尾净水区并沉积。

### 2.2 颗粒运移距离分析

从第 2.1 节对于尾矿颗粒沉积特性的分析可知,尾矿颗粒沉积和颗粒的粒径、物理力学性质、放矿方式、浆体流速、干滩坡度等有关,同时由于尾矿浆体类似于无粘性水流,因此引入水流恒定总流能量方程<sup>[18-19]</sup>,并假定:

- ①尾矿浆体为恒定流;
- ②作用于尾矿浆体的质量力只有重力;
- ③干滩过流断面水流符合渐变流;
- ④干滩过流水面之间流量保持不变。

即:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{a_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{a_2 v_2^2}{2g} + h_w \tag{8}$$

$$Z_1 - Z_2 = Li \tag{9}$$

$$h_w = \lambda \frac{Lv_2^2}{8Rg} \tag{10}$$

式中:  $z_1$  为干滩前端总水头;  $z_2$  为干滩尾端总水头, m;  $a_1, a_2$  为动能修正系数,一般令  $a_1 = a_2 = 1$ ;  $P_1, P_2$  为尾矿浆体表面压强, kPa;  $\rho$  为尾矿浆密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $h_w$  干滩水头损失, m;  $v_1, v_2$  分别为初始流速和某处平均流速,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $R$  为水力半径, m;  $\lambda$  为沿程阻力系数;  $i$  为干滩面平均坡度, %。

由 (8) ~ (10) 可得:

$$L = \frac{4R(v_2^2 - v_1^2)}{8Rgi - \lambda v_2^2} \tag{11}$$

引入式(5) 可得:

$$L = \frac{Nv^2 - 8RM}{\lambda M - 8RgiN} \tag{12}$$

式中:  $M = 2d_i(\gamma_m - \gamma_w)(f - 1)$ ;  $N = \rho [C_s(1 + f) + C_i]$ 。

从式(12) 中可以看出,单颗尾矿排放后的最远沉积位置和放矿的浓度、容重、颗粒粒径、尾矿浆体流速、干滩坡度等方面有关,但是上式只是理想情况下单个颗粒最远沉积位置的计算式,实际上并不是所有颗粒都能达到最理想的沉积点。因此,对式(12) 进行一定的改

写,采用加权平均粒径  $d_{ep}$ <sup>[20]</sup> 来描述尾矿颗粒整体的沉积特性,则上式可改写为:

$$d_{ep} = \frac{M(v^2 + 8RiL)}{N(L + 8R)} \tag{13}$$

或者

$$d_{ep} = \frac{M(Q_k^2 + 8S^2 RiL)}{N(L + 8R)S^2} \tag{14}$$

式中:  $M, N$  为选定参数值;  $Q_k$  为单管矿浆排放量,  $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $S$  为单口排放管横截面积,  $\text{m}^2$ 。

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,尾矿的物理性质基本不变,因此对于加权平均粒径  $d_{ep}$  也可以用平均粒径  $d_{50}$  来进行表示。从式(12) ~ (14) 可以看出,尾矿干滩面上颗粒沉积位置和尾矿浆流速成正比,和干滩坡度、尾矿粒径成反比。即随着尾矿浆体在干滩面上流速的增大,尾矿颗粒最远沉积位置将会增大,而干滩坡度也将会制约尾矿颗粒沉积。同时,尾矿颗粒沉积规律还受到尾矿物理特性、放矿流量等因素的影响。因此,对于矿山,当一定时期选矿工艺变化不大时,放矿方式对于尾矿的堆存有着至关重要的作用,因此选择合理的放矿方式对于坝体稳定性具有重要的意义。

### 3 结论

1) 干滩面上尾矿颗粒沉积规律宏观上表现为前粗后细的规律,并可概化为“粗化—缓慢细化—细化”的过程,且局部位置出现粒径的突变。而堆积坝体尾矿颗粒总体呈上粗下细的规律,且出现交错变化、粗细相间的夹层、互层、交错层等现象。

2) 干滩面不同位置均出现了临界粒径,而该粒径的出现标志某一粒径尾矿含量的显著增多,并可作为尾矿分类的标志。

3) 颗粒的分离流速随着粒径的增大而变小,而颗粒重力与拖拽力呈三次线性关系,当  $G > CF_1^3$  时,尾矿颗粒出现沉积;当  $G > CF_1^3$  与  $G < CF_1^3$  交替发生时,尾矿颗粒呈现推移与滚动现象;当  $G < CF_1^3$  时,尾矿颗粒称为悬移质,尾矿颗粒在水流带动下流向库尾净水区并沉积。

4) 推导公式表明:尾矿颗粒在干滩面上的沉积与尾矿颗粒流速成正比,和干滩坡度、尾矿粒径成反比,同时还受到放矿流速、浓度、尾矿物理特性等因素的影响。

### 参考文献

[1] 张力霆. 尾矿库溃坝研究综述[J]. 水利学报, 2013, 39(5): 594-600.  
 ZHANG Liting. Summary on the dam-break of tailing pond [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 39(5): 594-600.

- [2] 王凤江,张作维. 尾矿砂的堆存特征及其抗剪强度特性[J]. 岩土工程技术,2003(4): 209-212.  
WANG Fengjiang,ZHANG Zuowei. Deposit characteristic and shear strength of tailing sand [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2003 (4): 209-212.
- [3] 张志军,李亚俊,刘玄钊,等. 基于颗粒级配均匀设计的尾矿坝中毛细水上升规律研究[J]. 中国安全生产科学技术,2014,10(6): 45-50.  
ZHANG Zhijun,LI Yajun,LIU Xuanzhao, et al. Study on the rising regularity of capillary water in a tailings dam based on uniform design of grain composition [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014,10(6): 45-50.
- [4] 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 Shangwei,YANG Chunhe,ZHANG Chao, et al. Indoor scale-down test of tailings [J]. Chinese Journal of Engineering, 2017,39(10): 1485-1492.
- [5] 杜飞飞,吕宪俊,王健,等. 某微细粒金尾矿的沉降试验及澄清距离的计算[J]. 金属矿山,2009(10): 108-110.  
DU Feifei,LYU Xianjun,WANG Jian, et al. Sedimentation tests on a fine-grained gold tailing and calculation of the transparent distance [J]. Metal Mine, 2009(10): 108-110.
- [6] GIULIANO V,PAGNANELLI F,BORNORONI L, et al. Toxic elements at a disused mine district: particle size distribution and total concentration in stream sediments and mine tailings [J]. Journal of Hazardous Materials 2007,148(1): 409-418.
- [7] 徐宏达. 细粒尾矿冲填筑坝的沉积规律初探[J]. 中国矿山工程,2004,33(1): 39-42.  
XU Hongda. Discussion on the deposition law of finetailings fill dam [J]. China Mine Engineering, 2004,33(1): 39-42.
- [8] 居伟伟,许忠安,王博. 尾矿沉积滩坡度的计算方法研究[J]. 现代矿业,2013,29(10): 54-55.  
JU Weiwei,XU Zhongan,WANG Bo. Research on the calculation method of tailings deposited beach gradient [J]. Modern Mining, 2013,29(10): 54-55.
- [9] 李权,党发宁,郭振世,等. 尾矿坝干滩长度确定方法及影响因素分析[J]. 水利与建筑工程学报,2014(4): 14-17.  
LI Quan,DANG Faning, GUO Zhenshi, et al. Determination method for beach width of tailings dams and its Influence factors [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014(4): 14-17.
- [10] 张千贵,尹光志,周永昆,等. 尾矿粗细颗粒分层结构体的力学特性分析[J]. 重庆大学学报,2012,35(5): 97-102.  
ZHANG Qiangui,YIN Guangzhi,ZHOU Yongkun, et al. Analysis on mechanical characteristic of coarse and fine particles layered structure of tailings [J]. Journal of Chongqing University, 2012,35(5): 97-102.
- [11] 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): 923-945.  
QIAO Lan,QU Chunlai,CUI Ming. Effect of fines content on engineering characteristics of tailings [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015,36(4): 923-945.
- [12] 胡海,陈玉明,普兴林. 尾矿库尾矿沉积特性对坝体稳定性的影响分析[J]. 中国钨业,2016,31(5): 19-24.  
HU Hai,CHEN Yuming,PU Xinglin. Effect of tailings sediment characteristics on the dam stability [J]. China Tungsten Industry, 2016,31(5): 19-24.
- [13] 田莉梅,屈春来,张景华. 上游式尾矿库颗粒沉积规律及坝体渗流场分析[J]. 金属矿山,2017,V46(5): 60-64.  
TIAN Limei,QU Chunlai,ZHANG Jinghua. Analysis on particle deposition law and seepage field of upstream tailings dam [J]. Metal mine, 2017,V46(5): 60-64.
- [14] 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 Guangzhi,JING Xiaofei,WEI Zuoan, et al. Study of model test of seepage characteristics and field measurement of coarse and fine tailing dam [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2010,29(S2): 3710-3718.
- [15] 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,2009,32(3): 308-313.  
JING Xiaofei,YIN Guangzhi,WEI Zuoan, et al. Model test and numerical simulation of tailing dam safety forecasting [J]. Journal of Chong Qing University, 2009,32(3): 308-313.
- [16] 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(6): 880-887.  
LIANG Bing,LYU Zhiqiang,JIN Jiayu, et al. Model experimental study of effect of slurry draining speed on tailings deposition [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017(6): 880-887.
- [17] 尚晶. 尾矿的沉积规律研究及尾矿坝渗流稳定性分析[D]. 武汉:中国地质大学,2013.
- [18] 吴持恭. 水力学[M]. 北京:高等教育出版社,2007: 72-93.
- [19] 严导法. 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 Daofa. The total flow bernoulli equation in fluid mechanics [J]. Physics and Engineering, 2014,24(4): 47-53.
- [20] 徐宏达. 上游式尾矿坝的沉积规律[J]. 有色矿山,2003,32(5): 40-43.  
XU Hongda. The law of deposition about upstream tailings dam [J]. Nonferrous Mines, 2003,32(5): 40-43.

(责任编辑:郭利)