

文章编号: 1001-4888(2017)06-0880-08

排浆速度对尾矿沉积影响的模型试验研究^{*}

梁冰¹, 吕志强¹, 金佳旭², 武鹏飞³

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 土木与交通学院, 辽宁阜新 123000;
3. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁阜新 123000)

摘要: 尾矿库中尾砂的沉积规律受颗粒级配、浆体浓度和排浆速度等因素的影响, 其中排浆速度是影响尾矿沉积规律的主要因素之一。本文采用自行研制的水力分选粒度分析装置, 对阜新同乃铁尾矿砂进行排浆速度分别为 0.15cm/s、0.30cm/s、0.45cm/s 的尾矿沉积模型试验。研究表明: (1) 通过单粒尾矿砂临界状态分析, 得到了尾矿颗粒运动—沉积临界速度关系和尾矿沉积判据, 并通过试验验证其正确性。 (2) 沉积滩坡度随排浆速度的增加而减小, 沉积池内的沉积坡度几乎不受排浆速度影响。 (3) 排浆速度越大, 水平方向尾矿颗粒的分选性越好, 以中值粒径为 0.040mm 代表, 三种流速对应位置分别为 61.4cm、70.8cm 和 76.7cm。

关键词: 模型试验; 尾矿沉积; 坡度; 粗化现象; 沉积判据

中图分类号: TU43

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-126

0 引言

尾矿库是由选矿厂水力放矿沉积形成的, 其内部结构, 如粒径和孔隙分布规律等是影响尾矿库渗流稳定的重要因素, 因此研究尾砂的沉积规律意义重大。由于尾矿砂是一种特殊的人工砂, 其强度和黏度与天然土体有着本质的区别, 堆积形态受水流的影响, 与传统的散体堆积也略有不同, 针对这一特点, 国内外学者做了大量的研究工作。在国外, Kealy^[1] 最早在实验室进行模型试验, 对沉积尾矿粒度分级进行研究, 随后 Sederberg^[2] 和 Volpe^[3] 分别对粒度与渗透系数的关系及渗透系数与随排放距离的关系进行了研究。在国内, 王学进等^[4] 结合现场数据证明了在有大量原始数据的情况下, 神经网络预测尾矿沉积规律的可行性。尹光志等^[5] 通过粗、细粒尾矿砂的模型试验和现场实例分析, 得出尾矿在沉积滩表面的沉积规律。徐宏达^[6] 通过大量的现场资料揭示了尾矿浓度越大越不易分选。以上学者通过模型试验、理论分析及现场数据研究等方法对尾矿沉积规律进行了初步探索, 并取得了一定的成果, 但对于排浆速度变化引起沉积规律改变的研究成果鲜有报道。因此, 本文以单颗粒尾砂受力分析为基础, 通过研究尾矿砂运动—沉积临界状态, 提出尾矿浆入库过程中固体颗粒状态判据, 并通过模型试验对所提出判据进行验证, 探究不同排浆速度对尾矿沉积规律的影响, 对于更好地了解尾矿库内部结构及渗流规律, 保证尾矿库渗流稳定, 具有现实意义。

1 尾矿颗粒状态判据

1.1 运动—沉积机制分析

如图 1 所示, 尾矿浆以消能坑为起点向尾矿库内呈扇形运动沉积, 粒径从 0.005mm 到 2mm, 跨越

^{*} 收稿日期: 2016-07-08; 修回日期: 2016-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(5157041488, 5150041215)

通讯作者: 梁冰(1962—), 女, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 尾矿库稳定性分析。Email: lbwqx@163.com

四个数量级。粒径较粗的尾矿沉积在坝前较近处,粒径相对较细的尾矿向库尾移动。先沉积的尾矿也并非静止不动,在尾矿浆冲击力的作用下可能重新启动。在水动力、砂粒重力和摩擦阻力影响下,尾矿颗粒的运动状态主要与浆体速度和粒径大小有关。但是由于不同尾矿库沉积滩组成不同,因此,很难用尾矿粒径大小对尾矿状态进行判定,只有假定粒径不变的情况下,尾矿颗粒的运动—沉积规律才可以通过流体速度进行判定,即当流体运动速度大于某一临界速度时,尾矿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,尾矿颗粒不足以克服阻力,呈沉积状态。

1.2 流速对单颗粒影响的分析

假设尾矿颗粒为球状,对沉积滩表面运动的颗粒进行受力分析,根据文献[7]可知尾矿在稀疏流场中主要受到拖拽力、上举力和等效重力,根据文献[8]对颗粒在沉积滩表面运动的假设,建立力矩平衡方程:

$$F_D L_D + F_L L_L = W' L_W \quad (1)$$

式中, F_D 为拖拽力; F_L 为上举力; W' 为等效重力; L_D , L_L , L_W 分别为拖拽力臂、上举力臂和重力力臂。令

$$L_D = L_L = L_W \quad (2)$$

有

$$F_D = C_D A \frac{\rho u_0^2}{2} \quad (3)$$

$$F_L = C_L A \frac{\rho u_0^2}{2} \quad (4)$$

$$W' = (\rho_s - \rho) \frac{\pi D^3 g}{6} \quad (5)$$

式中, u_0 为分离时流速; C_D , C_L 为拖拽力、上举力系数; A 为颗粒面积; D 为颗粒直径; W' 为颗粒等效重力; ρ_s , ρ 分别为颗粒密度和清水密度。

联立(1)~(5),得到分离粒径与流速的关系:

$$u_0 = \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho) D g}{3 \rho (C_D + C_L)}} \quad (6)$$

1.3 尾矿颗粒状态判定

在确定了尾矿颗粒临界速度之后,就可以通过速度的大小来判断尾矿颗粒是处于运动还是沉积状态。设流体流速为 u , 则

当 $u > u_0$ 时,尾矿颗粒处于运动状态;

当 $u < u_0$ 时,尾矿颗粒处于沉积状态。

2 尾矿沉积规律模型试验

模型试验是岩土工程的主要研究方法之一,与现场试验相比,具有费用低,省时省力的优点。因此,本文采用模型试验的方法,通过改变排浆速度来研究粒径沉积规律和坡度变化特征。

2.1 试验设计

为了检验尾矿沉积判据的正确性,设计尾矿沉积规律模型试验,确定临界速度 u_0 , 将 $D = 0.0025$ (此处取中值粒径), $C_D = 1.11$, $C_L = 0.87$, $\rho_s = 1.22 \text{ kg/m}^3$, $\rho = 1 \text{ kg/m}^3$, 代入公式(6)得到 $u_0 = 0.309 \text{ cm/s}$ 。为研究排浆速度对尾矿沉积的影响,采用三种试验工况分别为:排浆速度大于临界速度,



图1 现场沉积图

Fig. 1 Site deposition

取 $u=0.45\text{cm/s}$; 排浆速度约等于临界速度, 取 $u=0.30\text{cm/s}$; 以及排浆速度小于临界速度, 取 $u=0.15\text{cm/s}$ 。

2.2 试验设备

试验设备采用拥有自主知识产权的水力分选粒度分析装置(专利号 201520455538.1), 模型示意图如图 2 所示。试验装置分为搅拌装置、调节装置和模拟装置三个主要部分组成, 其中模拟装置主要包含有调坡块(11)和带孔隙钢板(12)的模拟箱(10), 以及库区内排水塔(13); 搅拌装置包括搅拌箱(1), 含砂度测量仪(2), 搅拌机(3)以及阀门(4)等; 调节装置由伸缩杆(5)、输浆管(6)、排浆管(9)、阀门(7)及流量计(8)等组成。

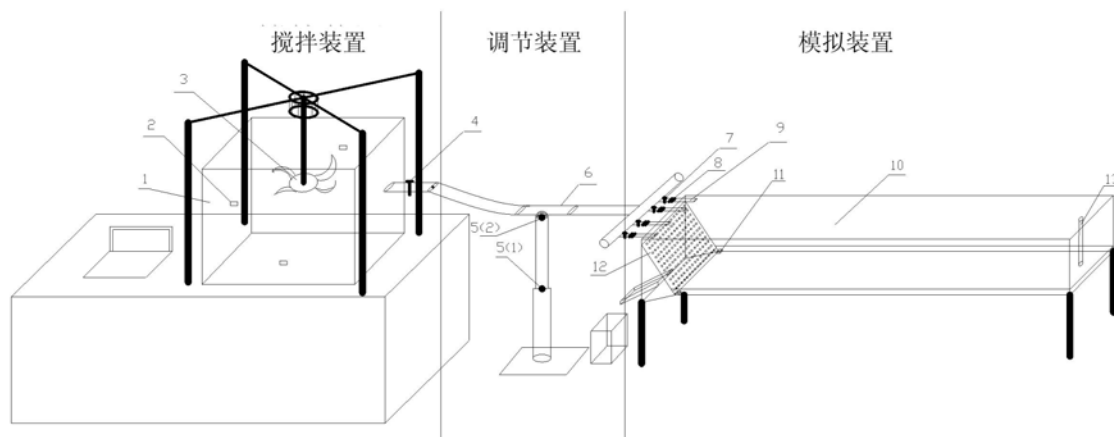


图 2 试验装置简图

Fig. 2 Experiment device diagram

2.3 试验材料

根据相似理论^[9], 确定模型相似比, 模型长度比为 $l_{cm} : l_{cn} = 1 : 200$, 黏度比 $\eta_{cm} : \eta_{cn} = 1 : 1$, 排浆管半径比 $R_{cm} : R_{cn} = 1 : 200$ 。其中, 下标 cm 代表模型, cn 代表原型。

模型砂的选取原则^[10]: (1)原型中 0.1mm 以下的颗粒仍按原质量百分比配置。(2) 0.1mm 以上的颗粒按比例缩小, 缩小后远小于 0.1mm 的颗粒用 0.1mm 颗粒取代, 仍大于 0.1mm 颗粒按实际比例配置, 但要求按质量百分比配置; 若严格按照相似比例进行缩小, 所采用的尾矿砂 80% 以上粒径均小于 0.0004mm 黏粒(即将表 1 中粒径按相似比例缩小)。缩小后尾矿浆基本呈现胶体性质, 尾矿浆黏度比原尾矿黏度高出几个数量级, 使得运动形式与实际不符, 试验结果出现错误。为确保试验结果的真实性, 此模型材料采用阜新市同乃铁矿现场的原尾矿作为试验材料^[5], 其中剔除粒径极大的颗粒。试验尾矿砂粒度级配如表 1 所示。

表 1 尾矿砂粒径组成

Tab. 1 Tailings sand particle size composition

粒径(mm)	>0.16	0.16~0.08	0.08~0.04	0.04~0.02	<0.02
百分比(%)	2.2	17.1	25.1	28.4	27.2

2.4 试验过程

(1)调节出浆口至设计一定高度。(2)调节装置中带孔洞钢板坡度, 使其达到 $1 : 3$, 在钢板上铺设土工织物模拟尾矿坝。(3)将水和尾矿砂按照 $3 : 1$ 倒入搅拌箱中进行搅拌, 观察侧壁和底部的含砂量测量装置显数达到 25%。(4)同时打开出浆口和排浆口, 通过出浆口处装有的流量控制装置和流速传感器控制三次模型试验排浆速度分别为 0.15cm/s 、 0.30cm/s 、 0.45cm/s 。(5)为与实际排浆过程相吻合, 排浆过程采用左右两侧的排浆口间歇式排放。尾矿浆中水分主要由排水塔排出, 并保持模拟装置内汇水界面距离坝前位置不变, 试验效果如图 3 所示。模型水分蒸发后, 沿模型中轴线每 20cm 取尾矿砂

试样,并按深度每5cm为一层选取,通过粒度分析仪进行粒径分布测试。

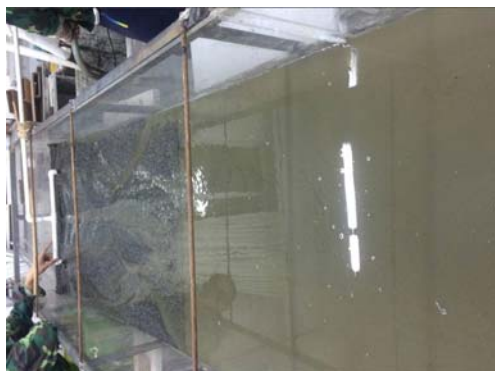


图3 (a) 试验过程图

Fig. 3 (a) experimental process diagram



图3 (b) 试验效果图

Fig. 3 (b) experiment effect diagram

3 试验结果及分析

3.1 模型水平向沉积规律

排浆速度是影响尾矿沉积规律的重要因素之一,当排浆速度较大时,矿浆中尾矿颗粒受力水平方向分量大,颗粒在水平方向的运动能力增强;反之流速较小时,颗粒的受力水平分量小,使得水平方向运动能力减弱。



图4 扇形扩散

Fig. 4 Fan diffusion



图5 弯曲通道

Fig. 5 Narrow winding passages

如图4所示,矿浆从排浆口流出,在沉积滩表面形成消能坑,由于尾矿坝的阻挡,矿浆以消能坑为起点呈扇形区域向库内扩散,此过程中尾中砂和尾细砂在坝前沉积,尾粉砂和尾粘土在坝前30~100cm集中沉积,大部分尾矿泥进入沉积池中沉淀(>100cm)。扩散过程中两个扇形区域的交汇处,在沉积滩表面形成弯曲的槽状通道(如图5所示),这是尾矿浆交汇时水平流速抵消,向库内运动流速叠加使得矿浆流速增大,挟砂能力增强,对滩面颗粒冲刷所造成的^[11-15]。

图6、图7、图8是三种流速下距底边6cm、距坝前60~80cm处的局部沉积形态剖面图。试验结果表明随着排浆速度的增大,颗粒运移距离越远,分选性越明显。随着排浆速度的逐渐增加,浆体对颗粒作用力逐渐加大,因此颗粒随水流的加大沉积距离不断增加^[16]。

图9和图10是坝前120~130cm沉积滩与水面交界处,可以看出粒径较大的尾矿在此处集中沉积,即有明显粗化现象。浆体中较大粒径颗粒在远离坝体处主要以滚动形式向前运移,运动过程中在沉积滩表面摩擦消耗大部分能量,运动速度明显降低,颗粒自身惯性力较小^[17],运动到汇水界面处惯性力被尾矿池中的阻力消散,运动停止,这是产生粗化现象的主要原因。



图 6 0.15cm/s 流速下的水平剖面图
Fig. 6 0.15cm/s horizontal sectional view

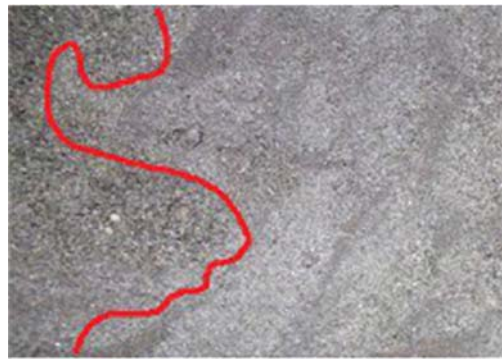


图 7 0.30cm/s 流速下的水平剖面图
Fig. 7 0.30cm/s horizontal sectional view

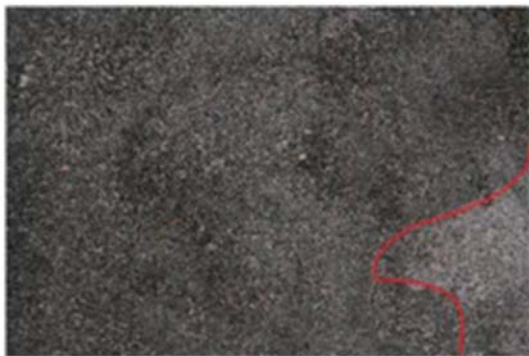


图 8 0.45cm/s 流速下的水平剖面图
Fig. 8 0.45cm/s horizontal sectional view



图 9 0.30cm/s 流速下的汇水界面表面图
Fig. 9 0.30cm/s catchment interface surface view



图 10 0.30cm/s 流速下的汇水界面剖面图
Fig. 10 0.30cm/s catchment interface section view

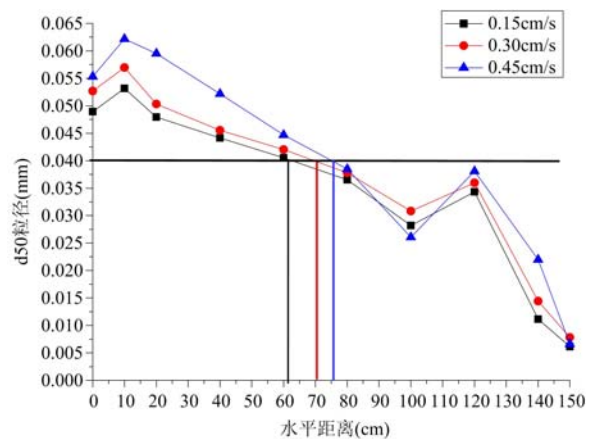


图 11 d50 水平分布图
Fig. 11 Horizontal distribution of d50

根据试验数据得到三种不同流速下中值粒径(d_{50})位置的变化情况(如图 11):流速大分选性好,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 0.040mm 为研究对象,得到排浆速度 0.15cm/s、0.30cm/s、0.45cm/s 时对应的位置分别为 61.4cm、70.8cm、76.7cm。在 120cm 处中值粒径发生突变现象,这是由于重量较大尾矿粒径在汇水界面集中沉积造成的。图 12 为三种流速下滩面高度随距离的变化趋势,根据沉积分布情况划分为:渐变区、突变区和稳定区三个区域。排浆速度对渐变区和突变区的坡度影响为速度越大坡度越缓,稳定区几乎不受排浆速度影响^[18,19]。

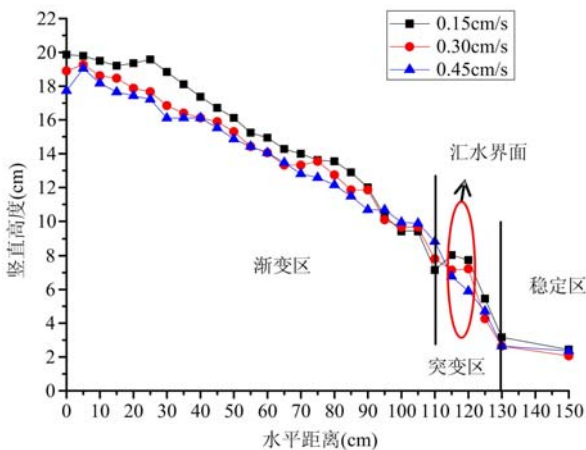


图 12 高程图

Fig. 12 Elevation view



图 13 竖直剖面图

Fig. 13 Vertical cross-sectional view

3.2 模型竖直向沉积规律

流速为 0.30cm/s、距离坝前 50cm 处的竖直剖面图如图 13 所示,透过侧壁能够观察尾矿沉积后有明显的分层现象,这与实际钻孔取样过程中发现坝体内部呈现分层现象一致。当排浆突然停止时,尾矿在沉积滩上的沉积类似于净水沉积,即砂性尾矿先沉积,尾矿泥后沉积并附着在沉积滩表面,随着水向池中心运移,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,所以产生了明显的分层现象^[20]。

图 14 为对应剖面 d50 粒径分布情况。竖直剖面颗粒粒径随高度的增加逐渐减小,试验以竖直高度 5cm 为一个周期,每一周期结构内粒径随高程减小,并在顶部粒径突然骤减,每一周期排浆停止时颗粒在沉积滩表面类似于净水沉积,所以出现周期内粒径先增大后减小的试验现象。经过试验得到的尾矿分层结构和粒径变化趋势与钻孔勘探结果相同。

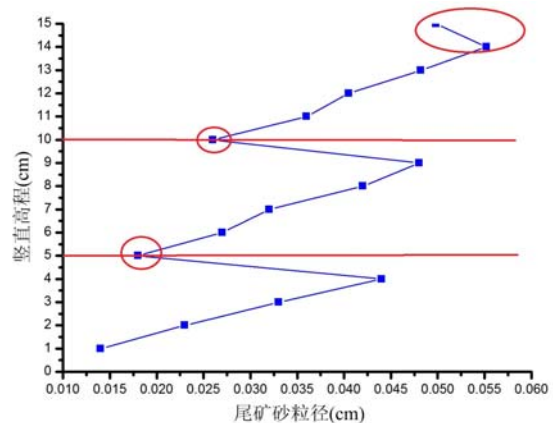


图 14 d50 竖直粒径分布图

Fig. 14 d50 vertical diameter distribution

4 结论

通过对尾矿沉积规律的研究,得出以下几点结论:

(1) 对沉积滩表面运动单颗粒进行力矩受力分析,推导出运动沉积速度与临界粒径的关系式,并由此确定尾矿颗粒的运动沉积判据。

(2) 根据沉积分布将坡度划分三个区域,分别为:渐变区、突变区和稳定区。排浆速度对渐变区和突变区的坡度影响明显,排浆速度越大坡度越缓,稳定区几乎不受排浆速度影响。

(3) 三种排浆速度下尾矿沉积粒径总体表现为速度越大粒径沿沉积距离变化越明显,分选性越好。竖直剖面粒径总体上随着高程的增加粒径减小,且有分层现象。

本文通过模型试验得到不同排浆速度对尾矿颗粒沉积的影响规律,着重讲述了排浆速度与尾矿沉积的定性关系,对定量关系研究较少,今后将会进行排浆速度对沉积影响的定量研究。

参考文献:

- [1] Kealy C D, Busch R A. Determining seepage characteristics of mill-tailings dams by the finite-element method [R]. U. S Bureau of mines, 1971:25—36.

- [2] Sederberg R L, Busch R A. Design guide for metal and nonmetal tailings disposal[R]. Bureau of Mines, 1977:15—21.
- [3] Volpe R. Physical and engineering properties of copper failings[C]. Current Geotechnical Physical in Mine Waste Disposal AJCE, 1979.
- [4] 王进学, 曹作忠. 神经网络预测尾矿沉积规律的方法[J]. 金属矿山, 2003(7):9—12 (WANG Jinxue, CAO Zuozhong. Neural network forecasting method of tailings deposition[J]. Metal Mine, 2003(7):9—12 (in Chinese))
- [5] 尹光志, 敬小非, 魏作安, 等. 粗、细尾砂筑坝渗流特性模型实验及现场实测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2):3710—3718 (YIN Guangzhi, JING Xiaofei, WEI Zuoan, et al. Thick, fine tailings dam seepage characteristics of model experiment and field measurement [J]. Rock Mechanics and Engineering of Journal, 2010, 29(2):3710—3718(in Chinese))
- [6] 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 Mine, 2003, 32(5):40—43 (in Chinese))
- [7] 黄社华, 李炜, 程良骏. 任意流场中稀疏颗粒运动方程及其性质[J]. 应用数学和力学, 2000, 21(3):265—276 (HUANG Shehua, LI Wei, CHENG Liangjun. On equation of discrete solid particles' motion in arbitrary flow field and its properties[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2000, 21(3):265—276(in Chinese))
- [8] 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 Shangwei, YANG Chunhe, ZHANG Chao, et al. Microscopic geometric characteristics of surface sedimentary tailings[J]. Rock Mechanics and Engineering of Journal, 2016, 35(4):768—777(in Chinese))
- [9] 杨俊杰. 相似理论与模型实验[M]. 武汉理工大学出版社, 2005 (YANG Junjie. Similarity theory and model experiment [M]. Wuhan University of Technology press, 2005(in Chinese))
- [10] 姚德基. 泥石流[M]. 北京: 科学出版社, 1986 (YAO Deji. Debris flow [M]. Beijing: Science Press, 1986(in Chinese))
- [11] 梁冰, 姜利国. 矸石山剖面颗粒分布规律的实验研究[J]. 实验力学, 2010, 25(6):704—711 (LIANG Bing, JIANG Ligu. Experimental study on coal gangue profile for the particle size distribution[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(6):704—711(in Chinese))
- [12] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003 (QIAN Ning, WAN Zhaohui. The mechanics of sediment movement [M]. Beijing: Science Press, 2003(in Chinese))
- [13] 舒安平, 王乐, 杨凯, 等. 非均质泥石流固液两相运动特征探讨[J]. 科学通报, 2010, 55(31):3006—3012 (SHU Anping, WANG Yue, YANG Kai, et al. Non homogenous solid-liquid two-phase debris flow movement characteristics of [J]. Science Bulletin, 2010, 55(31):3006—3012(in Chinese))
- [14] 庄琦, 王日龙, 史雪慧, 等. 基于 DIC 的受载砂土颗粒体系的细观参数及运动分析[J]. 实验力学, 2016, 31(3):377—385 (ZHUANG Qi, WANG Rilong, SHI Xuehui, et al. On the meso parameters and movement analysis of a load and particles system based on DIC[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(3):377—385(in Chinese))
- [15] 李强, 张立霆, 齐清兰, 等. 基于流固耦合理论某尾矿坝失稳特性及稳定性[J]. 岩土力学, 2012, 33(增 2):243—250 (LI Qiang, ZHANG Liting, QI Qinglan, et al. Instability characteristics and stability of a tailing dam based on fluid solid coupling theory [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(sup2):243—250(in Chinese))
- [16] 曲轶众, 倪晋仁, 孟晓刚. 固液两相流中固体颗粒的垂直分选机理[J]. 水动力学研究与进展, 2003, 18(4):483—488 (QU Yizhong, NI Jinren, MENG Xiaogang. Vertical separation mechanism of solid particles in solid-liquid two-phase flow [J]. Journal of Hydrodynamics, 2003, 18(4):483—488(in Chinese))
- [17] 孙望, 王鲁海, 王兆杰, 等. 基于 PIV 测量的超声波流量计内流场特性研究[J]. 实验力学, 2014, 29(6):695—702 (SUN Wang, WANG Luhai, WANG Zhaojie, et al. On the internal flow field performance of ultrasonic flow meter base on PIV measurement[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(6):695—702(in Chinese))
- [18] 王光进, 杨春和, 张超, 等. 超高排土场的粒径分级及其边坡稳定性分析研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3):905—913 (WANG Guangjin, YANG Chunhe, ZHANG Chao, et al. Particle size classification and slope stability analysis of super high row soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3):905—913(in Chinese))
- [19] Yalin M S. Mmechanics of sediment transport[M]. Peramon Press, 1972:290.

- [20] 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 Fangfang, XUE Kun, BAI Chunhua. Experimental study of size in convection mechanism of vertically vibrated particle bed[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(3):290—298(in Chinese))

Model Experimental Study of Effect of Slurry Draining Speed on Tailings Deposition

LIANG Bing¹, LV Zhi-qiang¹, JIN Jia-xu², WU Peng-fei³

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China; 2. Civil Engineering and Transportation, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China; 3. School of Mines, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

Abstract: Tailings deposition regular pattern in tailings pond is affected by the grain composition, slurry concentration and slurry draining speed and so on, in which, the slurry draining speed is one of main factors affecting the tailings deposition regular pattern. In this paper, taking iron ore tailings sand from Fuxin Tong Nai as samples, using self-developed hydraulic sorting granularity analysis device, a model experiment of tailings deposition regular pattern was carried out under the condition of slurry draining speed is 0.15cm/s, 0.30cm/s, 0.45cm/s respectively. Experimental results show: (1)Based on the analysis of single particle tailings critical state, relation between tailings particle movement and sedimentation speed and criterion of tailings deposition are obtained and verified by experiments. (2) The slope of deposition beach decreases with the increase of slurry draining speed, but slurry draining speed has little influence on slope of deposition pond. (3) The higher the slurry draining speed is, the better the tailings particle sorting along horizontal direction. Median diameter of tailings particle is 0.040mm. The locations corresponding to flow speed are 61.4cm, 70.8cm and 76.7cm, respectively; at three flow speeds, there is hierarchical structure in the vertical cross-section.

Keywords: model experiment; tailings deposition; slope; coarsening phenomenon; sedimentary criterion