

DOI: 10.11779/CJGE202007005

细粒铁尾矿的沉积特性与基本物理力学性质试验研究

郭晓霞^{1,2}, 陈之祥^{1,2}, 邵龙潭^{1,2}, 田筱剑^{1,2}

(1. 大连理工大学工程力学系, 辽宁 大连 116085; 2. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116085)

摘要: 尾矿的沉积与固结过程是形成强度和确定变形量的重要依据。为探求尾矿沉积过程中应力和孔隙水压力演变规律, 揭示尾矿料的强度形成机理和变形特征, 结合现场溜槽试验, 对细粒铁尾矿的沉积坡度、以及沉积过程中的应力、孔隙水压力和有效应力的演变规律进行了监测。同时, 采用十字板剪切仪确定了沉积完成后尾矿的剪切强度。在此基础上, 对不同沉积断面尾矿料的颗粒级配和渗透特性进行了试验研究, 分析尾矿沉积速率的演变机理。试验结果表明: 颗粒研磨极其均匀的尾矿料的堆积形式和渗透特性与尾矿料的水力特性存在差别; 受尾矿颗粒相对密实度较大、颗粒分布均匀等因素影响, 增加尾矿料的透水边界较施加外荷载, 更能提升尾矿料中有效应力的形成速率; 尾矿料表层硬化和封闭微孔隙引发了上层滞水入渗困难, 应采用必要的引水导流措施降低高势能流体对筑坝稳定性的影响。
关键词: 细粒铁尾矿; 溜槽试验; 沉积特性; 孔隙水压力; 剪切强度

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)07-1220-08

作者简介: 郭晓霞(1978—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土与环境力学等方面的教学和科研工作。E-mail: hanyuer@dlut.edu.cn.

Experimental study on sedimentary behavior and basic physical mechanical properties of fine iron tailings

GUO Xiao-xia^{1,2}, CHEN Zhi-xiang^{1,2}, SHAO Long-tan^{1,2}, TIAN Xiao-jian^{1,2}

(1. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China; 2. State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China)

Abstract: The process of deposition and consolidation of fragmented multiphase materials is the basis and prerequisite for studying their strength and deformation. To find out the evolution laws of stress and pore water pressure during the deposition of fine iron tailings and reveal the strength formation mechanism and deformation characteristics of tailings reservoir, the sedimentary slope of tailings, stress, pore water pressure and effective stress during the deposition process are monitored by field large-scale flume tests. Meanwhile, the shear strength of tailings after deposition is determined by the vane shear apparatus. On this basis, grain-size distribution and permeability characteristics of tailings from different sedimentary sections are tested to analyze the evolution mechanism of tailings sedimentation rate. The experimental results show that the accumulation form and permeability characteristics of tailings with extremely uniform particle grinding are different from those of soils. Due to the large proportion of tailings particles and uniform distribution of particles, increasing the permeable boundary of tailings can improve the formation rate of effective stress of tailings better than applying external loads. The surface hardening of tailings and the sealing of micro-pore trigger the formation of effective stress in tailings. It is difficult to infiltrate the stagnant water in the upper layer. Necessary diversion measures should be adopted to reduce the influences of high potential fluid on the stability of dam construction.

Key words: fine iron tailings; flume test; deposition characteristic; pore water pressure; shear strength

0 引言

中国每年尾矿排放量约3亿吨, 除小部分作为矿山充填, 有相当部分尾矿采用构筑尾矿库的方式储存^[1-2]。随着尾矿浓缩技术和工艺的日益成熟, 细粒高浓度尾矿地表堆存处理是近年来发展起来的一种新的尾矿处理方法。

不同于常规地基的骨架受力和水库的单类流体传力形式, 尾矿料的沉积是典型的高含水细粒料沉积、

基金项目: 国家重点实验室自主研究课题项目(S18406); 国家自然科学基金项目(51479023, 51309047, 41877251)

收稿日期: 2019-09-04

*通信作者(E-mail: shaolt@hotmail.com)

固结和排水的过程, 是与有效应力密切相关的力学过程^[4-5]。应力传递规律隐含了材料的强度和变形特性, 孔压消散规律表征了沉积体受力骨架的形成速率^[6-8], 揭示以上规律, 对于尾矿库的合理设计和安全运行具有重要的工程意义。

湿排出的尾矿料是由水和细粒骨料组成的浆体, 该浆体中的水分含量可达 40%~85%^[9]。尾矿沉积和固结是有效应力的形成过程, 只有将浆体的各向等值压力转换为尾矿料的骨架应力, 才能保证尾矿库的安全^[10]。细粒高浓度尾矿是一种均质的、不易离析的浆体, 分选较差导致尾矿沉积固结特性、渗透特性、强度特性存在明显差异^[11]。罗战友等^[12]采用沉降柱方法研究浓度对尾矿的沉积固结特性等的影响, 揭示高浓度尾矿沉积固结规律, 但受到沉降柱边壁效应的影响及无法模拟实际尾矿排放的动态过程, 只能进行静态沉降过程的分析。利用堆坝物理模型试验演绎尾矿坝的堆坝过程, 采用传统的上游式常规浓度尾矿排放方法, 已有较为深入的研究^[1-2, 13-14]。由于高浓度细粒铁

尾矿浆体与低浓度尾矿浆体在流动性、沉积分选性等方面存在差异, 尾矿料的沉积、固结、有效应力的形成和颗粒分选带来的强度分布直接影响尾矿坝体的稳定性和安全性, 因此, 有必要针对高浓度尾矿浆体排放进行专门研究。

为探求高浓度排放尾矿沉积体形成过程中的应力和孔隙水压力演变规律, 揭示尾矿库的强度形成机理和变形特征, 结合现场溜槽试验, 对尾矿的沉积坡度以及沉积过程中的应力、孔隙水压力进行了监测。同时, 采用十字板剪切仪确定了沉积完成后尾矿沉积物的剪切强度。在此基础上, 对不同沉积断面的尾矿料的颗粒级配和渗透特性进行了试验研究, 分析尾矿沉积的演变机理。

1 尾矿溜槽试验

溜槽试验场地位于河北唐山滦县某铁矿厂, 设计的流槽模型槽如图 1 所示。

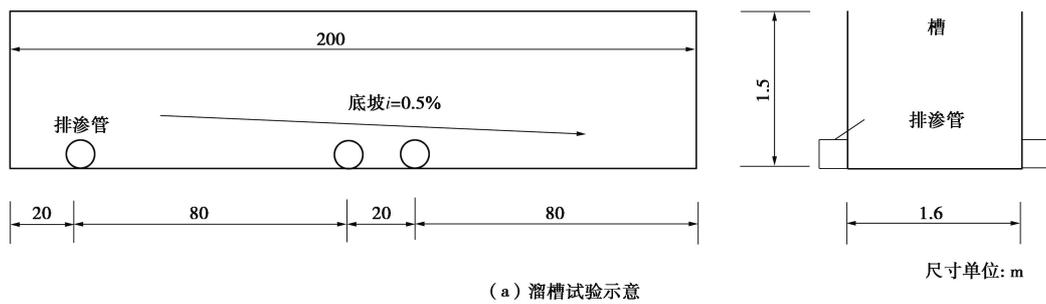


图 1 试验布置

Fig. 1 Test arrangement

为了模拟尾矿实际排放和沉积过程，对实际工况进行缩比，即缩小流槽宽度至单位宽度，依据确定的单位宽度结合放矿总流量确定单位宽度内的实际放矿流量（约 7.27 m³/h），结合流槽宽度与现场尾矿放矿宽度的缩比关系对尾矿库中布置的排渗管管径进行缩比。为了保证尾矿料在沿溜槽方向的颗粒分选效果，流槽长度未进行比例缩小。试验槽净尺寸设为 200 m（长）×1.6 m（宽）×1.5 m（高）。同时，模拟尾矿库现状排放已形成的尾矿堆积体坡比，试验槽底坡比为 0.5%，并在距离放矿口 20, 100, 120 m 的流槽两侧分别布置 2 个排渗管研究排水条件对尾矿沉积特性的影响。流槽试验示意如图 1（a）所示，现场实际如图 1（b）所示。

模拟尾矿库实际生产中的放矿和停放过程，试验工况设置如表 1 所示。

表 1 试验过程中各阶段

Table 1 Schedule of flume tests on tailings

序号	时间	事项
1	2011年10月13日	开始排放尾矿
2	2011年10月13日	初始阶段放矿
3	2011年10月14日—15日	第二阶段放矿
4	2011年10月16日—17日	第三阶段放矿
5	2011年10月23日—24日	第四阶段放矿
6	2011年11月08日	降雨
7	2011年11月20日	监测到尾矿冻结
8	2011年12月10日	停止数据监测

放矿过程分为 4 个阶段：第一阶段为初始放矿阶段，保证沉积滩面高度能够覆盖监测传感器；第二、三、四放矿阶段，每个阶段沉积滩面上升高度约 30 cm，监测放矿过程和停放间歇各项试验数据。放矿过程中主要监测并调控流量变化，以满足单宽流量要求。同时监测流速、排水管流量、流槽末端回水面高度，根据回水面高度和范围及时调整流槽末端的阀门开口大小。放矿结束后，分别监测距离放矿口 10, 20, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 140, 160, 180 m 位置处的土压力、孔隙水压力、不同深度处的十字板剪切强度和尾矿沉积厚度。试验中监测的平均放矿质量浓度为 46.42%（标准差为 2.92），平均流量为 6.58 m³/h（标准差为 0.925）

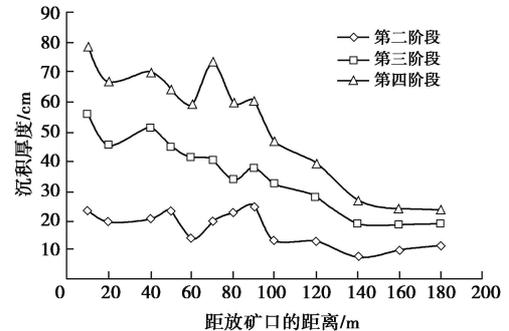
2 现场测试结果分析

试验开始后，通过上游的阀门控制注入流槽的矿浆量，然后观测不同时间段流槽中不同位置处的沉积厚度、土压力、孔隙水压力及抗剪强度。待 40 d 试验完成后，取不同断面处的尾矿料并测定其颗粒级配和渗透系数。通过溜槽试验结果，探究细粒铁尾矿的沉

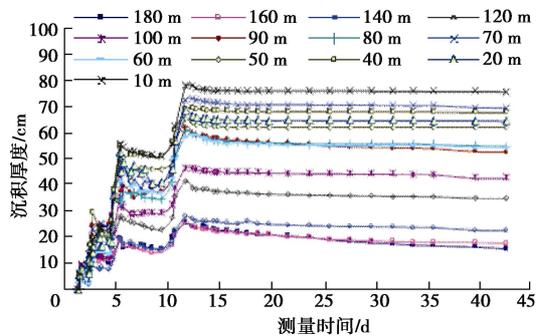
积特性与基本物理力学性质。

2.1 沉积特性与压力变化特征

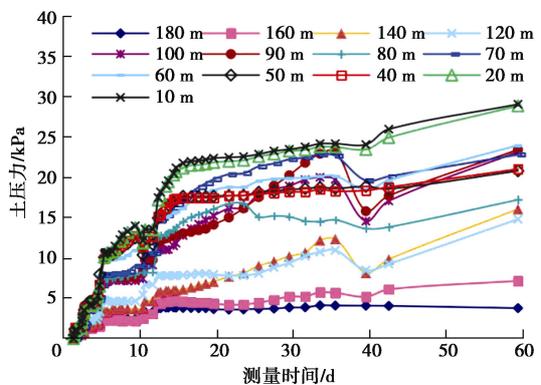
不同放矿阶段流槽中不同位置处的沉积厚度、土压力及孔隙水压力试验结果如图 2 所示。



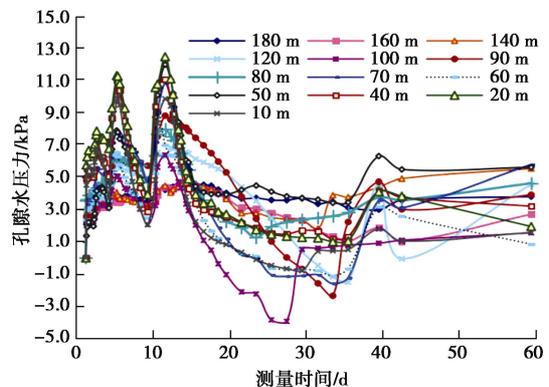
(a) 不同阶段尾矿料的沉积厚度分布



(b) 距离放矿口不同位置处尾矿料的沉积厚度



(c) 距离放矿口不同位置处尾矿料的土压力



(d) 距离放矿口不同位置处尾矿料的孔隙水压力

图 2 现场流槽试验结果

Fig. 2 Results of flume tests on tailings

由图2(a)可知,随着距离放矿口距离的增加,其堆积高度总体呈现下降趋势,且140 m后趋于平缓,说明细粒铁尾矿颗粒分选作用对前期矿料沉积高度影响较大,历经一定的流动时程后其沉积总体趋于稳定。同时,在中间部位沉积断面高度随距放矿口距离的增大产生了增大的趋势,这与流槽中尾矿料的非均匀流态相对应(图3),也与不同粒径颗粒材料的堆积休止角研究相符合^[14-15]。



图3 尾矿流槽中的非均匀流态

Fig. 3 Non-uniform flow patterns in tailings flume

由图2(b)可知,第三放矿阶段至第四放矿阶段之间,土的沉积厚度发生了显著变化,表现为尾矿的沉积厚度逐渐减少,尾矿料趋于密实。第四放矿阶段后,尾矿料的沉积速率发生了较大变化,自17 d后尾矿的沉积厚度减少较少。从提升尾矿沉积速率的角度来看,沉积料放矿速率和放矿总量应达成一个动态平衡,以促进尾矿料筑坝强度的形成。

由图2(c)可知,埋置于流槽底部的土压力传感器测定的总应力随沉积时间的增加而逐渐增大,且距离放矿口较近位置的总应力变化速率更大。从理论上来看,尾矿的总压力应在放矿完成后达到峰值,之后随着孔隙水压力的消散,其总应力逐渐减小^[16]。尾矿料中水分的排出需要合适的透水路径,在周围封闭的不透水结构中尾矿的沉积服从 Stokes 定律,即不同粒径颗粒的沉降分层^[17]。

实际上,由于在距离放矿口 20, 100, 120 m 的流槽两侧分别布置有 2 个排渗管,致使土中水的排出边界较为复杂。同时需要说明的是,由于尾矿表层干燥形成了硬化层^[18],加之尾矿颗粒过细引起的一端封闭微孔隙^[19]广泛分布阻挡了第 40 天降雨的入渗,使得雨水作为上覆荷载提升了流槽内的总压力。既有的研究表明^[20],土的冻结表现为单位体积中冰体含量的增加,是土体材料各向等压的密实过程。因此,试验后期的冰冻也一定程度上增加了尾矿中的总压力,结合图 2(b)能够得到,冻结引发的“压密”作用随着尾矿厚度的增大而越明显。

由图 2(d)可知,放矿过程中孔隙水压力随着槽内矿浆量的增大而增大,第四次放矿完成后,孔隙水压力达到峰值,之后随着尾矿固结排水过程的进行,

尾矿中的孔隙水压力逐渐消散。随着降雨的出现,尾矿表层的雨水不断入渗,不同断面处的孔隙水压力逐渐上升。接近放矿口位置的上覆尾矿较厚,降雨入渗所需时间长;流槽尾部的上覆土层较少、颗粒较细,也接近尾部排水边界,因此,流槽两端的孔隙水压力上升较少或较慢,100 m 等断面处的孔隙水压力最早上升。随着冻结期的到来,上层尾矿冻结抑制了水分蒸发引起的孔隙水压力消散,观测到的孔隙水压力并未随着沉积时间的延长而消散。

2.2 级配特性和水力特性

不同断面处的沉积尾矿料颗粒级配试验结果如图 4 和表 2 所示,渗透试验结果如表 3 所示。颗粒级配越平缓,不同粒径的颗粒含量占比越均匀^[21]。由图 4 可知,不同断面处尾矿料的颗粒级配并不呈现单一规律,而是分布在 5 m 级配曲线的两侧。相较于其他断面,5 m 处的颗粒级配最为良好(线性程度最高)。60~100 m 区间的颗粒级配基本一致,100 m 之后的颗粒级配呈现另一分布特性。这些规律表明:细类铁尾矿料沉积过程中,最先沉积的并不一定全是最大的颗粒,而是较为均匀的颗粒;之后较粗的颗粒、较细的颗粒、更细的颗粒依次沿着流动过程逐渐沉积。

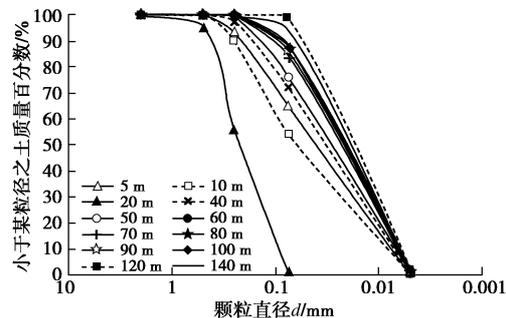


图4 不同断面处尾矿料的颗粒级配

Fig. 4 Grain-size distribution curves of different sections

渗透性能能够表征尾矿筑坝的速度,影响筑坝的有效应力形成,更决定坝体的稳定性。渗透系数与颗粒级配密切相关,颗粒级配较好,一定体积的尾矿沉积体中颗粒填充占比越多,渗透性就越差。某一阶段的颗粒较为集中,颗粒越均匀,其渗透性也较好。由表 2 可知,渗透系数的演变规律与土体的颗粒级配曲线具有相关性,即颗粒级配较好的 5 m 处的尾矿渗透性能较差,15 m 处颗粒级配曲线较陡,其渗透性也较好;25 m 处的颗粒级配分布也存在突降段,其渗透性也较差。总体而言,存在颗粒粒径集中区的尾矿渗透性能较差。

2.3 强度特性

剪切强度反映的是土体黏聚力和内摩擦角的变化,同时体现出土中有效应力的增长情况^[22-23]。十字板剪切试验结果如图 5 所示。由图 5 可知,土体的抗

表2 不同断面处尾矿料的颗粒组成

Table 2 Grain composition of different sections

断面/m	土粒 相对密 实度	颗粒组成/%					不均匀 系数 C_u	曲率系 数 C_c	液限含 水率/%	塑限 含水率/%	塑性指 数 I_p	土质类型
		2~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm						
5	2.877	0.24	6.69	28.13	64.70	0.25	4.47	0.57	11.68	21.55	9.87	低液限尾粉土
10	2.851	0.36	9.36	35.86	53.92	0.50	4.56	1.07	13.26	23.17	9.91	低液限尾粉土
20	2.846	0.06	4.61	39.56	54.68	1.10	4.42	1.00	13.30	22.77	9.47	低液限尾粉土
40	2.838	0.02	2.54	25.34	71.90	0.21	3.53	1.07	14.49	25.80	11.31	低液限尾粉质黏土
50	2.861	0.02	0.45	23.28	75.86	0.40	3.94	1.08	15.76	27.80	12.04	低液限尾粉质黏土
60	2.839	0.01	0.24	14.60	84.40	0.75	2.87	0.89	14.57	25.73	11.16	低液限尾粉质黏土
70	2.806	0.02	0.25	15.74	82.50	1.50	3.57	1.29	12.32	25.99	13.67	低液限尾粉质黏土
80	2.868	0	0.37	12.27	86.66	0.70	3.50	1.59	14.54	25.85	11.31	低液限尾粉质黏土
90	2.864	0	0.22	13.89	84.19	1.70	3.15	0.95	15.36	26.23	10.87	低液限尾粉质黏土
100	2.877	0	0.16	11.31	86.04	2.50	4.11	0.97	15.57	27.42	11.85	低液限尾粉质黏土
120	2.884	0	0.42	5.72	91.66	2.20	3.08	0.90	17.09	27.23	10.14	低液限尾粉质黏土
140	2.878	0	0.10	5.84	91.57	2.50	3.61	0.79	16.61	29.05	12.44	低液限尾粉质黏土

表3 不同断面处尾矿料的渗透系数

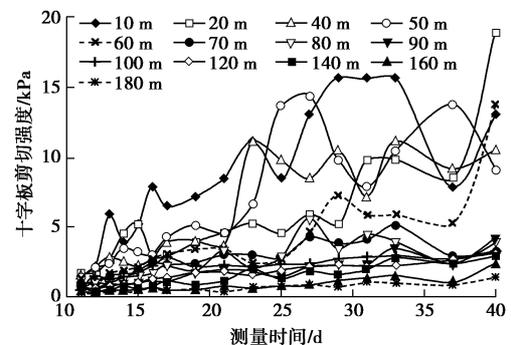
Table 3 Permeability coefficient of different sections

断面位 置/m	土粒 相对密 实度	干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	最大干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	最优含水 率/%	渗透系数 $/(cm \cdot s^{-1})$
15	2.84	1.517	1.868	15.5	2.63×10^{-4}
25	2.84	1.553	1.915	13.7	6.02×10^{-5}
40	2.84	1.498	1.795	15.9	3.28×10^{-4}
80	2.87	1.475	1.828	15.8	1.27×10^{-4}
120	2.89	1.516	1.819	16.7	7.75×10^{-5}

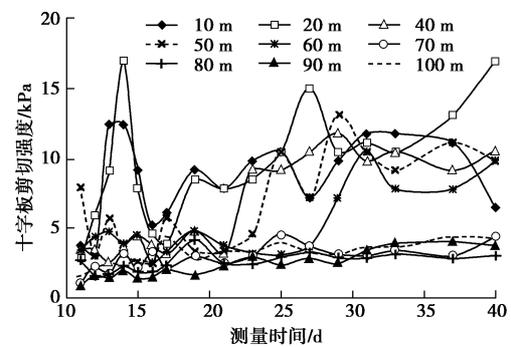
剪强度整体呈现上升的趋势，且距离放矿口较近点的强度提升速度较大。依据距离放矿口 60 m 位置，可将剪切强度的种类分为两种：①剪切强度迅速增长区域；②剪切强度缓慢增长区域。根据本研究中流槽中不同位置土料的颗分试验结果，如图 4 和表 2 所示，依据尾矿定名标准可知，流槽中除 20 m 以内的位置土体定名为尾粉土外，20 m 至流槽尾部土料定名为尾粉质黏土。20 m 以内的位置由于沉积尾矿中含有一定的砂性粒组，个别测量点遇到砂粒含量高的区域，强度测量值会有显著波动，20 m 以外的区域用十字板剪切仪测定其强度表现出较好的规律。

对比图 5 可知，20，60 cm 深度处土体的抗剪强度演变差距并不明显。20，60 cm 处土体状态的差距主要体现在上覆荷载的不同，同一位置不同深度处土体的内摩擦角和黏聚力应差距极小。依据土的抗剪强度公式^[24]，对十字板抗剪强度与总应力（上覆尾矿自重）、黏聚力（ c, c' ）和内摩擦角（ φ, φ' ）的关系进行研究。具体为：假定同一断面上土体性质相同，通过在 20，60 cm 深度处土体的最终抗剪强度反演土体的黏聚力 c 和内摩擦角 φ ，结果如图 6 所示。计算

过程中所需各测试点土样的基本物性参数见表 4。



(a) 沉积表层 20 cm 下的十字板剪切试验结果



(b) 沉积表层 60 cm 下的十字板剪切试验结果

图5 现场流槽十字板剪切试验结果

Fig. 5 Results of vane shear tests of tailings flume

表4 各测试点土样的基本物性参数

Table 4 Basic physical properties of soil samples at different test points

取土点/m	颗粒相对 密实度	天然含水率 /%	天然密度 $/(g \cdot cm^{-3})$
10	2.83	27.4	2.032
20	2.84	27.8	2.027
40	2.84	27.0	1.985
60	2.84	27.7	1.965
70	2.85	23.1	1.939
80	2.87	32.9	1.960
90	2.86	26.6	1.984
100	2.87	27.8	1.922

经计算发现, 固结 40 d 后尾矿料仍处于流塑状态, 其内摩擦角为 0, 尾矿的抗剪强度与其黏聚力相等。不同断面处尾矿的内摩擦角存在一定差别, 各断面的内摩擦角平均值为 30.6° 。结合图 4, 6 可知, 内摩擦角与颗粒级配之间存在较好的对应关系, 即含水率相近的情况下, 颗粒粒径分布越均匀, 其内摩擦角倾向于越大; 反之, 适宜的排水条件 (布置有排渗管的 20, 100 m 断面处) 也能够显著提升土的抗剪强度。

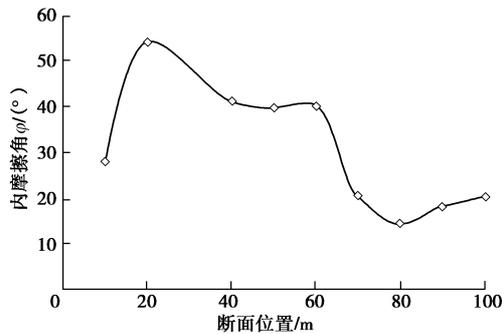


图 6 基于十字板抗剪强度的内摩擦角

Fig. 6 Friction angles based on vane shear strength tests

2.4 试验结果讨论

尾矿流槽试验涉及颗粒料沉积、尾矿中均布水排出、排水边界等问题。在浆体流动过程中, 颗粒产生分选, 颗粒粒径与距放矿口的距离大致成反比。同一沉积断面上服从 Stokes 定律, 较粗的颗粒率先沉积。在静态沉积过程中, 尾矿中均布的水分从上部开放边界 (含上部表层的蒸发) 和找坡方向上排出, 尾矿颗粒料沉积并趋于密实甚至形成硬化表层; 在此过程中, 若在上部排水边界施加一定荷载, 则可加速下部尾矿沉积层的密实。

既有研究认为, 颗粒材料的沉积速度与其粒径成正比^[25]。本试验研究表明: 颗粒较细且较为均匀的尾矿料在水力冲击作用下, 率先沉积的并不一定是最粗的颗粒, 筑坝试验的选料和加固过程中应考虑上述规律的影响。表层尾矿料硬化产生的硬化层显著隔绝了上层滞水的入渗, 一定程度上促进了尾矿料的固结, 但也影响了尾矿坝的稳定性。因此, 应对尾矿坝表层滞水进行导流, 减小高势能流体对筑坝稳定性的影响。图 2 (d) 表明, 自由沉积并不能在短时间内降低尾矿中的孔隙水压力, 采用必要的物理化学方法, 劣化尾矿料的颗粒级配, 增加可渗透边界, 减少一端封闭孔隙结构对尾矿料渗透性能的影响, 对于尾矿料有效应力的形成和筑坝稳定性具有重要作用。

3 结 论

通过现场溜槽试验和室内土工测试, 对尾矿料的沉积特性、级配特性、水力特性及强度特性等进行了

试验研究, 得到结论如下:

(1) 颗粒较细且较为均匀的尾矿料在水力冲击作用下, 率先沉积的并不一定全是最粗的颗粒, 但最粗的颗粒仍在上游部分沉积, 满足上游法筑坝的要求。

(2) 高浓度尾矿排放过程中, 与施加外荷载相比, 增加尾矿料的透水边界, 更能提升尾矿料中有应力形成速率, 进而加速尾矿固结和筑坝进程。

(3) 尾矿料表层硬化和封闭微孔隙使得上部排放的尾矿入渗困难, 应采用必要的引水导流措施降低高势能流体对筑坝稳定性的影响。

参考文献:

- [1] 张力霆, 齐清兰, 李 强, 等. 尾矿库坝体溃决演进规律的模型试验研究[J]. 水利学报, 2016, 47(2): 229 - 235. (ZHANG Li-ting, QI Qing-lan, LI Qiang, et al. Experimental model study on dam break and evolution law of tailings pond[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(2): 229 - 235. (in Chinese))
- [2] 张力霆. 尾矿库溃坝研究综述[J]. 水利学报, 2013, 44(5): 594 - 600. (ZHANG Li-ting. Summary on the dam-break of tailing pond[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(5): 594 - 600. (in Chinese))
- [3] 陈生水. 尾矿库安全评价存在的问题与对策[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(10): 1869 - 1873. (CHEN Sheng-shui. Problems and countermeasures of safety evaluation of tailing pond[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(10): 1869 - 1873. (in Chinese))
- [4] 孙从露, 邵龙潭, 郭晓霞. 尾矿砂不同频率动三轴试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(11): 69 - 73. (SUN Cong-lu, SHAO Long-tan, GUO Xiao-xia. Study on dynamic triaxial tests of tailings sand under different vibration frequencies[J]. Mining Research and Development, 2015, 35(11): 69 - 73. (in Chinese))
- [5] 于斯滢, 邵龙潭, 刘士乙. 基于有限元极限平衡法的尾矿坝坝体稳定分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1185 - 1190. (YU Si-ying, SHAO Long-tan, LIU Shi-yi. Stability analysis of tailings dam based on finite element limit equilibrium method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 1185 - 1190. (in Chinese))
- [6] 刘建民, 邱 月, 郭婷婷, 等. 饱和重塑黄土液化孔压增长模型的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(19): 226 - 232. (LIU Jian-min QIU Yue GUO Ting-ting, et al. Experimental study on pore pressure growth model of saturated remolded loess sample during liquefaction[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(19): 226 -

232. (in Chinese))
- [7] GARING C, CHALENDAR J A D, VOLTOLINI M, et al. Pore-scale capillary pressure analysis using multi-scale X-ray micromotography[J]. *Advances in Water Resources*, 2017, **104**: 223 - 241.
- [8] 刘叔灼, 李慧子, 单毅, 等. 基于能量法的尾矿土动孔压模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(11): 2051 - 2058. (LIU Shu-zhuo, LI Hui-zi, SHAN Yi, et al. Energy method for analyzing dynamic pore water pressure model for tailing soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **104**: 223 - 241. (in Chinese))
- [9] 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))
- [10] 刘洋, 赵学同, 吴顺川. 快速冲填尾矿库静力液化分析与数值模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, **33**(6): 1158 - 1168. (LIU Yang, ZHAO Xue-tong, WU Shun-chuan. Analysis of static liquefaction and numerical simulation for tailings pond under high deposing rates[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, **33**(6): 1158 - 1168. (in Chinese))
- [11] LIANG W, XIONG D S. Research on the solution to coefficient of earth pressure at rest using effective stress spade[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2017, **34**(7): 5 - 9, 35.
- [12] 罗战友, 夏建中, 龚晓南, 等. 考虑孔压消散的静压单桩挤土位移场研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, **33**(增刊1): 2765 - 2772. (LUO Zhan-you, XIA Jian-zhong, GONG Xiao-nan. Study of compacting soil displacements around jacked single pile based on excess pore pressure dissipation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, **33**(S1): 2765 - 2772. (in Chinese))
- [13] 郑彬彬. 高浓度尾矿上游式堆坝基础性问题的研究及坝体稳定性分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2017. (ZHENG Bin-bin. Research on the Basic Issues for Upstream Method of High Thickened Tailings and Stability Analysis of Tailings Dam[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese))
- [14] 张鹏伟, 吴辉, 胡黎明, 等. 铁矿尾矿料力学特性及坝体变形稳定性研究[J]. *工程地质学报*, 2015, **23**(6): 1189 - 1195. (ZHANG Peng-wei, WU Hui, HU Li-ming, et al. Mechanical characteristics of iron mine tailing materials and analysis on deformation and stability of tailing dam[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, **23**(6): 1189 - 1195. (in Chinese))
- [15] 成词峰, 徐颖, 郑庭. 混合式堆坝尾矿料的基本性能及沉积规律分析[J]. *青岛理工大学学报*, 2018, **39**(2): 36 - 41. (CHENG Ci-feng, XU Ying, ZHENG Ting. Properties of tailings and the law of deposition about tailings dam constructed by upstream and centerline methods[J]. *Journal of Qingdao University of Technology*, 2018, **39**(2): 36 - 41. (in Chinese))
- [16] 尹光志, 张千贵, 魏作安, 等. 孔隙水运移特性及对尾矿细观结构作用机制试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, **31**(1): 71 - 79. (YIN Guang-zhi, ZHANG Qian-gui, WEI Zuo-an, et al. Experimental study of migration characteristics of pore water and its effect on meso-structure of tailings[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, **31**(1): 71 - 79. (in Chinese))
- [17] 魏作安, 杨永浩, 赵怀军, 等. 小打鹅尾矿库尾矿堆积坝稳定性研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2016, **37**(4): 589 - 593. (WEI Zuo-an, YANG Yong-hao, ZHAO Huai-jun, et al. Stability of tailings dam of Xiaodae Tailings pond[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2016, **37**(4): 589 - 593. (in Chinese))
- [18] 冯彦芳, 李顺群, 陈之祥, 等. 基于土体各向异性的雨水入渗渗井试验研究与验证[J]. *长江科学院院报*, 2019, **36**(3): 110 - 115. (FENG Yan-fang, LI Shun-qun, CHEN Zhi-xiang, et al. Experimental study and verification of rainwater infiltration well based on soil anisotropy[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, **36**(3): 110 - 115. (in Chinese))
- [19] 李顺群, 贾红晶, 王杏杏, 等. 轴平移技术在基质吸力测控中的局限性和误差分析[J]. *岩土力学*, 2016, **37**(11): 3089 - 3095, 3252. (LI Shun-qun, JIA Hong-jing, WANG Xing-xing, et al. Limitation and error analysis of axis translation technique for measuring and controlling matric suction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, **37**(11): 3089 - 3095, 3252. (in Chinese))
- [20] 王建州, 刘书幸, 周国庆, 等. 深季节冻土地区基坑工程水平冻胀力试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, **47**(4): 815 - 821. (WANG Jian-zhou, LIU Shu-xing, ZHOU Guo-qing, et al. Model experiment on frost-heave force of foundation pit at deepseasonal frozen regions[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, **47**(4): 815 - 821. (in Chinese))
- [21] 蔡正银, 李小梅, 韩林, 等. 考虑级配和颗粒破碎影响

- 的堆石料临界状态研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1357 - 1364. (CAI Zheng-yin, LI Xiao-mei, HAN Lin, et al. Critical state of rockfill materials considering particle gradation and breakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(8): 1357 - 1364. (in Chinese))
- [22] ONO K, YU Y, SAWADA Y, et al. Lateral force-displacement prediction for buried pipe under different effective stress condition[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2017(2): 1 - 9.
- [23] CHUN L I, ZHAO F L, XIU Z G, et al. Testing investigation on effective stress increment of unsaturated sandy soils[J]. Journal of Northeastern University, 2017, 38(8): 1158 - 1162.
- [24] 张常光, 赵均海, 朱 倩. 非饱和土抗剪强度公式分类及总结[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(2): 74 - 82. (ZHANG Chang-guang, ZHAO Jun-hai, ZHU Qian. Classification and summary of shear strength formulae for unsaturated soils[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(2): 74 - 82. (in Chinese))
- [25] 陈星欣, 白 冰, 于 涛, 等. 粒径和渗流速度对多孔介质中悬浮颗粒迁移和沉积特性的耦合影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊1): 2840 - 2845. (CHEN Xing-xin, BAI Bing, YU Tao, et al. Coupled effects of particle size and flow rate on characteristics of particle transportation and deposition in porous media[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S1): 2840 - 2845. (in Chinese))

第 29 届全国土工测试学术研讨会通知 (2020 年 7 月 18, 19 日, 呼和浩特) 第 1 号通知

主办单位: 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会, 中国水利学会岩土力学专业委员会。

承办单位: 内蒙古工业大学等。

协办单位: 《岩土工程学报》编委会等。

大会邀请及主题: 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会, 中国水利学会岩土力学专业委员会拟定于 2020 年 7 月在呼和浩特召开“第 29 届全国土工测试学术研讨会”, 会议主题: “岩土工程勘察技术及土工测试新技术、新方法”。中国土木工程学会土力学及岩土工程分会, 中国水利学会岩土力学专业委员会邀请全国相关学科的专家、学者、科技工作者与工程技术人员, 特别是青年岩土工程工作者踊跃撰稿, 集聚呼和浩特, 围绕会议主题探讨与交流土工测试最新研究成果与实践经验。

会议要点: 本次学术研讨会组织委员会、学术委员会由承办、协办单位, 学会专委会专家组成。会议将邀请国内著名土工测试专家进行特邀报告和主题报告, 并进行新编《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019) 宣贯。

会议专题: ①岩土工程勘察技术; ②土基本性质测试; ③

土工物理模型试验; ④土工原测试技术; ⑤现场土工监测技术; ⑥环境土工测试技术; ⑦特殊土性质测试技术; ⑧土工微观测试新技术; ⑨土工测试新型技术设备。

会议论文与出版: 会议投稿论文要求为原创、未公开发表的内容, 论文篇幅一般在 5 页以内, 格式请参考《岩土工程学报》(增刊)(EI 收录)、《地下空间与工程学报》、《内蒙古农业大学学报》、《内蒙古科技大学学报》、《内蒙古工业大学学报》其他论文将在论文集中刊出。

投稿邮箱: geotest2020@163.com。

重要日期: ①2019 年 12 月 30 日前提交论文全文; ②2020 年 2 月 15 日前返回论文录用通知; ③2020 年 3 月 15 日前返回修改后论文。

会议联系方式: 地址: 内蒙古呼和浩特市新城区爱民街 49 号内蒙古工业大学土木工程学院, 邮政编码: 010051, 联系人: 刘俊芳: 18647964316; 杜强: 15560924010; 马建国: 18847187706。

(大会组委会 供稿)