

DOI: 10.11779/CJGE2019S1037

粒径对尾矿抗剪强度及坝体稳定性影响

张超^{1, 2}, 马昌坤^{*1, 2}, 杨春和^{1, 2}, 陈青林³, 潘振凯^{1, 2}

(1. 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; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 重庆大学, 重庆 400044)

摘要: 为解决尾砂安全筑坝与井下充填之间的矛盾, 开展了粒径对尾矿强度及坝体稳定性影响的研究。试验结果表明: 尾砂加权平均粒径随干滩长度增大而下降的速率越来越缓, 加权平均粒径与滩长之间关系满足幂函数沉积模型; 尾矿内摩擦角随粒料加权平均粒径的减小而减小, 当加权平均粒径小于 0.05 mm 时, 内摩擦角显著减小; 尾矿坝稳定性随粒料加权平均粒径的减小而降低, 当加权平均粒径小于 0.05 mm 时坝体稳定性显著降低。研究结果为尾砂安全筑坝与井下粗料充填提供可借鉴的界限粒径, 对于其它相同类型尾砂安全筑坝同样具有重要参考价值。

关键词: 粒径; 尾矿; 抗剪强度; 尾矿坝; 稳定性

中图分类号: TU43; TD926.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S1-0145-04

作者简介: 张超(1978—), 男, 汉, 副研究员, 主要从事尾矿力学特性与尾矿坝灾变机理研究工作。E-mail: czhang@whrsm.ac.cn。

Effects of particle diameter on shear strength of tailings and stability of tailings dams

ZHANG Chao^{1, 2}, MA Chang-kun^{1, 2}, YANG Chun-he^{1, 2}, CHEN Qing-lin³, PAN Zhen-kai^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to solve the contradiction between safety damming and downhole filling of tailings dams, the effects of particle size on tailing strength and dam stability are studied. The tests show that, the weighted average particle size of tailings decreases slowly with the increase of dry beach length, the relationship between the weighted average particle size of tailings and the length of the beach is the power function deposition model. The internal friction angle of tailings decreases with the decrease of the weighted average particle size, and the internal friction angle of tailings decreases significantly when the weighted average particle size is less than 0.05 mm. The stability of tailings dams decreases with the decrease of the weighted average particle size, and the stability of dam decreases significantly when the weighted average particle size is less than 0.05 mm. The results of this study provide a reference for the boundary particle size of tailing sand for safe dam construction and coarse material-filled underground.

Key words: particle diameter; tailings; shear strength; tailings dam; stability

0 引言

上游法尾矿材料是特殊的人工材料, 由于尾矿在放矿过程中的沉积分选, 使得尾矿堆积坝中不同空间位置的粒径差异巨大。且随着选矿技术的提升和对矿石中伴生元素的回收, 矿石是越磨越细, 尾矿的细黏粒含量也越来越大。当前我国许多地下开采矿山采用粗粒尾砂进行井下充填, 剩下的细黏粒尾矿则排入尾矿坝, 这也导致了筑坝尾矿的粒径越来越细。因此为确保尾矿坝安全运行必须开展该类型尾矿坝的稳定性研究工作, 研究入库尾矿粒径对尾矿强度及坝体稳定性的影响。

目前已有部分学者^[1-4]关注到了粒径对尾矿力学特

性及坝体稳定性的影响, 也开展了一些研究, 但现有成果还没有解决尾矿入库粒径界限问题。本文以江西某铜矿尾矿及其堆积的尾矿坝为依托, 针对粒径对尾矿力学特性及尾矿坝稳定性的影响进行室内试验和数值模拟研究, 为解决此类问题提供科学依据及相关参考。

1 尾矿沉积规律

根据文献[5], 提出修正后的尾矿沉积模型:

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2017YFC0804601); 国家自然科学基金应急管理项目(51741410)

收稿日期: 2019-04-29

*通讯作者(E-mail: 1044752531@qq.com)

$$D_L = Ad_{cp}^{0.9} L^B Q_k^2 \quad , \quad (1)$$

式中, A , B 为尾矿参数。

对新尾矿库和老尾矿库的干滩面尾砂进行取样测试, 其中老尾矿库滩面为全尾排放时干滩沉积分布而成, 新尾矿库滩面为已经进行了一定提粗分级后尾矿排放时的干滩沉积分布而成。老、新尾矿库的加权平均粒径分别为 0.06, 0.045 mm, 将实测情况用式 (1) 进行拟合, 得到尾矿参数 $A=0.01$, $B=-0.45$ 。

$$D_L = 0.01d_{cp}^{0.9} L^{-0.45} Q_k^2 \quad . \quad (2)$$

用式 (2) 对尾矿新库进行拟合, 已知此时流量为 $Q_k=25$ L/s, 放矿原颗粒加权平均粒径 $d_{cp}=0.045$ mm, 得干滩面尾砂颗粒分布规律如图 1 所示。

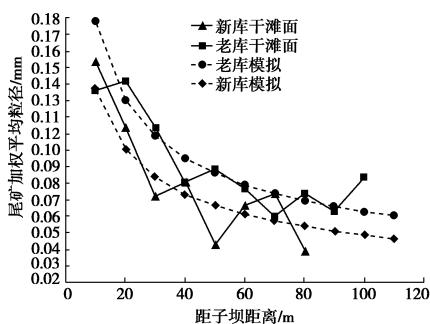


图 1 实测干滩面尾矿颗粒粒径变化规律图

Fig. 1 Variation of measured particle size of tailings in dry beach face

从图 1 中可以看出尾矿新库的拟合曲线较为吻合, 根据现场测量结果可知本文提出的修正沉积模型能较好地描述尾矿的沉积规律。

实际工程中需要将尾矿进行分级提粗用于井下充填以保证矿的安全稳定。本次研究分成了以下 5 种工况, 将全尾质量的 60%, 70%, 80%, 90%, 100% 分别用于分级提取粗尾砂, 分级界限为 30 μm , 提粗尾砂后产生的次生细矿泥和 40%~0 的全尾混合后再排入到尾矿库中。根据式 (2) 及全尾颗粒分布情况, 可计算在不同提粗分级比例条件下坝体不同位置的平均粒径分布情况, 如图 2 和图 3 所示。

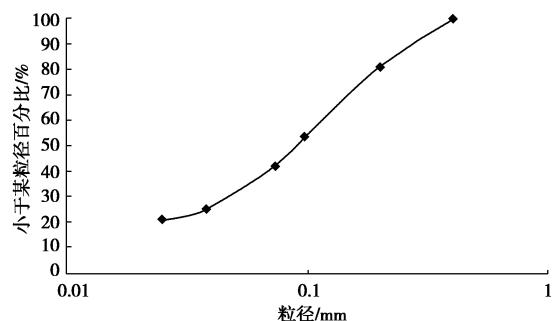


图 2 全尾矿颗粒级配

Fig. 2 Gradation of full tailings particles

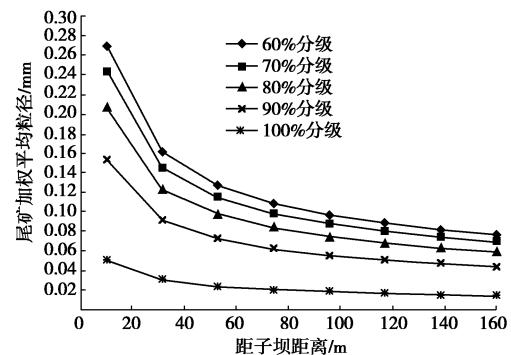


图 3 不同分级提粗条件下尾矿颗粒沿干滩面分布规律图

Fig. 3 Distribution patterns of tailings particles along dry beach surface under different grading conditions

本文划分了 6 个粒径组: ①0.2~0.4 mm, ②0.1~0.2 mm, ③0.08~0.1 mm, ④0.04~0.08 mm, ⑤0.03~0.04 mm, ⑥0~0.03 mm。现有如图 4 所示的工程, 在初期坝顶端进行放矿, 排矿流量 $Q_k=25$ L/s。坝长 250 m, 坝高 40 m, 堆积坝按照坡比 1:3.3 向上堆积, 根据图 3 给出的沉积分布规律, 已知粒径组来反推沉积距离, 最后得到该粒径组的沉积分布范围, 从而得到不同提粗分级比例条件下的概率剖面图。60% 提粗分级比例条件下尾矿坝的概率剖面图如图 4 所示, 70%~100% 提粗分级比例条件下其它情况的剖面图不再赘述。

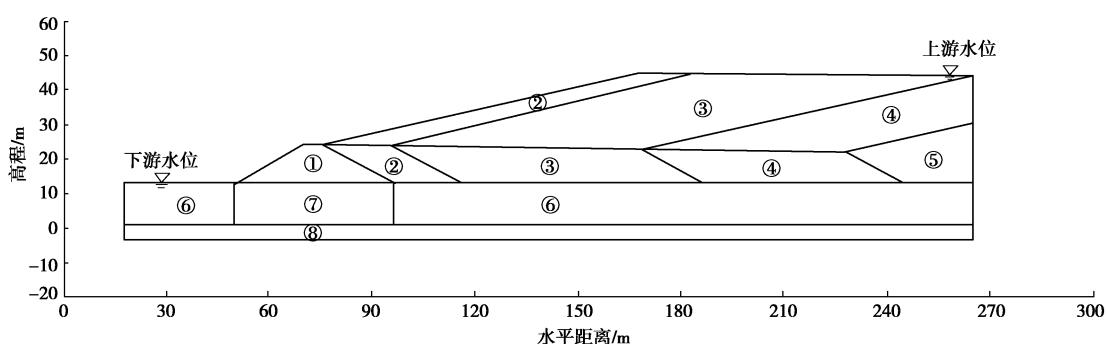


图 4 某尾矿坝达到标高 45 m 时尾矿坝概化剖面图

Fig. 4 Generalized section images of tailings dam at elevation of 45 m

2 粒径对尾矿强度影响的试验研究

将 144 个原状试样进行级配试验, 取制得标准尺寸, 剩余的原状尾矿样采用气流分级技术对细粒尾矿进行分级, 得到该尾矿样的平均粒径。采用三轴剪力仪进行了固结不排水三轴试验, 试验结果见图 5。

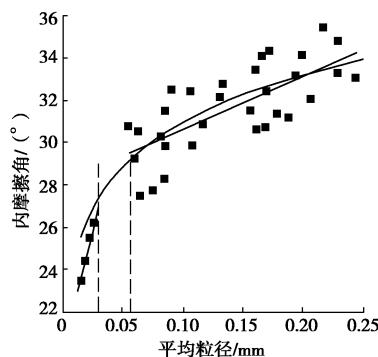


图 5 尾矿粒径对内摩擦角的影响

Fig. 5 Effects of tailings particle size on internal friction angle

从图 5 可以看出: 当粒径小于 0.05 mm 时, 内摩擦角受粒径的影响较为明显; 当粒径大于 0.05 mm 时, 内摩擦随粒径增大而增长的速度放缓。因此提粗分级的比例将直接影响坝体的稳定性。

根据图 5 提出了加权平均粒径对尾矿内摩擦角的影响模型:

$$\varphi = ad_{cp}^b, \quad (3)$$

式中, φ 为尾矿材料的内摩擦角, 单位为 (°), d_{cp} 为加权平均粒径, 单位为 mm, a , b 为尾矿材料参数。采用本文提出的影响模型对试验数据进行拟合, 得到拟合曲线:

$$\varphi = 39d_{cp}^{0.1}. \quad (4)$$

从图 5 可知粒径对内摩擦角的影响: 随粒径的增大, 内摩擦角增大速率趋缓, 尾矿加权平均粒径与尾矿中的黏粒含量成反比, 加权平均粒径越小, 黏粒含量越高, 颗粒之间的润滑作用加强, 内摩擦角越低。

3 粒径对尾矿坝稳定性的影响

3.1 浸润线的变化

对于尾矿坝的溃坝灾害和影响尾矿坝的稳定性来说, 水是重要的影响因素, 浸润线的变化很大程度上影响了坝体的稳定性。刘俊生等^[6]提出了尾矿等效粒径与渗透性的最佳拟合公式:

$$\begin{aligned} d_1 &= -0.1045d_{85} - 0.1271d_{60} + 0.5360d_{50} + \\ &\quad 0.2532d_{30} + 0.8074d_{20} - 0.5049d_{10} \\ &= 0.3451\sqrt{K}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中, d_1 为等效粒径, K 为渗透系数。

本文分成的 6 个粒径组, 式 (5) 中每个粒径组的 $d_{85} - d_{10}$ 分别用线性插值求得, 计算结果如表 1 所示。由于渗透性变化带来的浸润线的变化如图 6 所示。从图 6 中可以看出随提粗分级比例的提升, 坝体浸润线呈降低趋势, 与实际情况相符。

表 1 各粒径组的渗透系数和内摩擦角

Table 1 Permeability coefficients and internal friction angles of various particle size groups

粒径组/mm	d_1/mm	$K/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
0~0.03	0.008696	6.34957×10^{-8}	25.62
0.03~0.04	0.028702	6.9171×10^{-7}	27.89
0.04~0.07	0.043100	1.55978×10^{-6}	29.43
0.07~0.1	0.068903	3.98644×10^{-6}	30.65
0.1~0.2	0.114997	1.1104×10^{-5}	32.26
0.2~0.4	0.229993	4.4416×10^{-5}	34.57

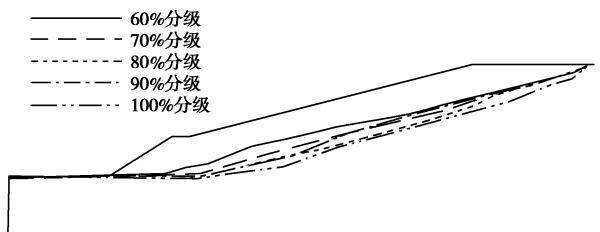


图 6 不同分级程度的浸润线变化

Fig. 6 Change of infiltration line at different grades

3.2 坝体稳定性变化

根据式 (4) 计算得出各粒径组内摩擦角如表 1 所示, 再结合表 1 中的渗透系数得出不同分级情况下的安全系数。结果见表 2 所示。本文研究了这五种假设工况条件下的尾矿坝的稳定性, 分析典型结果见图 7 所示。

表 2 1:3.3 堤积外边坡稳定性分析结果汇总表

Table 2 Stability analysis results of external slope of 1:3.3

方案	加权平均粒径 d_{cp}/mm	安全系数 F_s
方案 1: 60% 分级	0.095	1.221
方案 2: 70% 分级	0.085	1.216
方案 3: 80% 分级	0.071	1.217
方案 4: 90% 分级	0.051	1.206
方案 5: 100% 分级	0.015	1.154

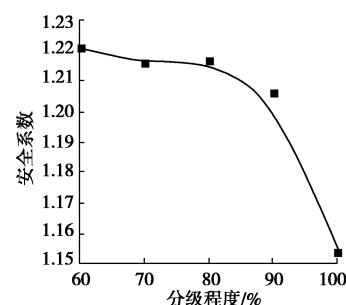


图 7 坝体安全系数与分级程度的关系

Fig. 7 Relationship between safety factor and graded degree

4 结 论

(1) 通过对尾矿排放沉积规律的研究, 提出了用滩长 L 和加权平均粒径 d_{cp} 的幂函数描述尾矿颗粒粒径沿滩长变化的沉积模型。尾矿加权平均粒径随着距离干滩顶部距离的增大呈现出非线性下降趋势, 下降速率越来越缓。

(2) 内摩擦角随着粒径的增加呈幂函数增加, 增长的趋势逐渐放缓。尾矿粒径小于 0.05 mm 增长趋势较快, 尾矿粒径大于 0.05 mm 时, 增长速度较慢。随着围压的增大抗剪强度衰减效应越明显。0.05 mm 可作为安全筑坝与井下充填的界限粒径。

(3) 通过对不同分级条件下的江西某铜矿尾矿坝稳定性分析, 得出 60% 分级到 90% 分级安全系数下降缓慢, 90% 分级到 100% 分级安全系数下降明显加大。尾矿提粗分级比例越高, 坝体浸润线越低, 稳定性越差。

(4) 尾矿沉积关系模型和加权平均对内摩擦角的影响模型可以较为准确地估算粒径对坝体稳定性的影响, 从而提供了解决尾矿坝的安全筑坝与井下充填之间矛盾的建议分级比例方法, 对于其它类型尾矿坝的安全筑坝同样具有重要参考价值。

参 考 文 献 :

[1] XU B, WANG Y. Stability analysis of the Lingshan gold mine

tailings dam under conditions of a raised dam height[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2015, 74(1): 151 – 161.

- [2] RICO M, BENITO G, SALGUEIRO A R, et al. Reported tailings dam failures: a review of the European incidents in the worldwide context[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152(2): 846 – 852.
- [3] BELKHATIR M, SCHANZ T, ARAB A. Effect of fines content and void ratio on the saturated hydraulic conductivity and undrained shear strength of sand–silt mixtures[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(6): 2469 – 2479.
- [4] PROSKIN S, SEGO D, ALOSTAZ M. Freeze–thaw and consolidation tests on Suncor mature fine tailings (MFT) [J]. Cold Regions Science & Technology, 2010, 63(3): 110 – 120.
- [5] 徐宏达. 上游式尾矿坝的沉积规律[J]. 中国矿山工程, 2003, 32(5): 40 – 43. (XU Hong-da. The law of deposition about upstream tailings dam[J]. China Mine Engineering, 2003, 32(5): 40 – 43. (in Chinese))
- [6] 刘俊生, 王勇升. 尾矿级配特征和渗透性关系研究[J]. 有色金属科学与工程, 1995, 9(3): 42 – 46. (LIU Jun-sheng, WANG Yong-sheng. Relationship between character of tailing gradation and permeability[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 1995, 9(3): 42 – 46. (in Chinese))

(责编: 明经平)