

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2023.01.003

尾砂分级综合利用对尾矿库安全稳定的影响

沈楼燕 卢建京

(中国瑞林工程技术股份有限公司, 南昌 330031)

摘 要: 开展尾砂分级综合利用是当下矿山资源综合利用的趋势。研究尾矿分级粒径的选取对尾矿库安全稳定的影响问题, 并阐明获得科学合理的尾矿分级粒径取值的技术路径。结果表明: 尾矿分级取走一定数量的粗粒尾矿对尾矿堆积筑坝及尾矿库排洪的安全稳定性产生一定的影响, 如果尾砂分级粒径选取不合理, 取走的粗粒尾矿数量超过安全范围, 造成细粒(包括黏性)尾砂占比增加, 可能导致尾矿堆积坝出现渗透变形破坏, 严重时甚至会造成尾矿坝坍塌失稳; 同时可能导致尾矿沉积滩面坡度变缓, 减少尾矿库的调洪库容, 降低尾矿库的排洪安全性。研究获得安全合理的尾矿分级粒径取值对于尾矿库的安全稳定性至关重要。为了实现这一目标, 必须以尾矿库的安全(包括尾矿坝的稳定安全和尾矿库的排洪安全)为中心展开一系列的研究论证工作, 才能确保尾砂分级粒径取值的科学、合理。主要研究内容包括: 研究分级后的尾矿物理力学特性变化情况、尾矿沉积滩平均坡度变化情况, 以及尾砂粒径改变之后, 对尾矿坝沉积分布规律产生的影响; 基于多种工况条件, 重新进行尾矿坝渗流分析计算、尾矿库调洪演算和尾矿坝稳定分析计算, 必要时还需要进行尾矿库溃坝试验研究。研究成果可指导国内外尾矿分级综合利用工程技术实践, 为确保尾矿分级综合利用之后的尾矿库仍处于安全稳定状态提供技术支撑。

关键词: 尾砂分级; 综合利用; 尾矿堆积坝; 渗流分析; 稳定分析计算; 防洪安全

中图分类号: TD98

文献标志码: A

文章编号: 1005-7854(2023)01-0009-06

Influence of tailings classification and its comprehensive utilization on the safety and stability of tailings pond

SHEN Lou-yan LU Jian-jing

(China Nerin Engineering Co. Ltd., Nanchang 330031, China)

Abstract: This is a trend of mine resources comprehensive utilization which conducts the classification and comprehensive utilization of tailings at present. This paper aims to study the influence of particle size selection of tailings in the classification on the safety and stability of tailings pond, and describe the technical path to obtain a scientific and reasonable particle size value of tailings in the classification. The study shows that the removal of a certain amount of coarse tailings by classification will have a certain impact on the safety and stability of tailings fill dam and tailings pond flood discharge. Improperly-selected particle size of tailings in the classification and the removal of coarse tailings exceeding safety range will result in an increase in the proportion of fine tailings(including viscous tailings), which may lead to seepage deformation and damage of tailings fill dam, and even cause the collapse and instability of the tailings dam in serious cases. Meanwhile, the slope of deposited tailings beach will become gentle due to the increase in the amount of fine tailings, which will reduce the flood control capacity and flood discharge safety of the tailings pond. Therefore, it is very important for the safety and stability of tailings pond to obtain a safe and reasonable particle size of tailings in the classification. In order to achieve this objective, it must focus on the safety of tailings pond(including the stability and safety of tailings dam and the flood

收稿日期: 2022-06-06

第一作者: 沈楼燕, 研究员, 博士后, 主要从事矿业工程科研及应用工作。E-mail: shenlouyan@nerin.com

discharge safety of tailings pond) to carry out a series of researches and demonstrations, so as to ensure scientific and reasonable value of tailings particle size in the classification. The main research includes the changes of physical and mechanical properties of tailings and the average slope change of the deposited tailings beach after classification, and the impact on the deposit distribution of tailings dam after changing the tailings particle size. Afterwards the seepage of tailings dam, flood control of the tailings pond and stability of tailings dam are re-analyzed and re-calculated under various working conditions. The dam break test and study of the tailings pond is also required if necessary. The research achievements of this paper can be used to guide the engineering practice of tailings classification and its comprehensive utilization at home and abroad, and provide technical support to ensure that the tailings pond is still in a safe and stable condition after tailings classification and comprehensive utilization.

Key words: tailings classification; comprehensive utilization; tailings fill dam; seepage analysis; stability analysis and calculation; safety of flood control

尾矿库是具有高势能的人造泥石流危险源,其潜在的溃坝危险性可能产生难以承受的后果和巨大的损失^[1-4]。建设和运行尾矿库,造成了生态破坏和环境污染,给周边地区带来了安全隐患^[5,6];新建尾矿库征地日益困难,建设成本居高不下;尾矿库环保和安全生产审批政策日趋严苛,也显著增加了矿山企业的成本。因此,加大尾矿综合利用,尽可能减少尾矿排放量,少建乃至免建尾矿库,是治理矿业环境、实现矿业可持续发展的重要途径,符合《中华人民共和国矿产资源法》和《中华人民共和国循环经济促进法》的基本要求。其中,尾砂分级综合利用就是当前尾矿资源综合利用的主要形式之一,即将尾矿中粗粒的尾砂分选出来,用于充填地下采矿的采空区^[7]、混凝土骨料或陶瓷建材等,从而减少尾矿的排放量,延长现有尾矿库的使用年限。但是,对粗粒尾砂的综合利用并非多多益善,粗粒的尾砂被取走将给现有尾矿库的安全稳定带来一系列问题,如果超出了临界比例,轻则造成尾矿堆积坝渗透破坏、调洪库容不足,重则造成尾矿库局部失稳、甚至溃坝等灾难。本文重点探讨了尾矿分级综合利用后可能带来的尾矿库安全隐患问题,并从工程设计实践的角度提出了应对措施。

1 尾砂分级综合利用可能衍生尾矿库不利问题

尾矿库建设初始,通常先采用土石材料构筑“初期坝”,然后采用尾矿水力冲填逐步堆积加高形成坝体,叫做“尾矿堆积坝”。这种尾矿堆积坝工艺筑坝成本经济,在我国广泛运用,约占全国尾矿坝数量的70%^[8]。

由于尾矿自身特性的差异性,不同粒径的尾砂在水力冲填筑坝过程中沉积固结时表现出不同的规

律,直接影响尾矿坝的稳定性。研究发现:细粒尾砂颗粒的电荷相互吸引,易在尾砂溶液中形成絮团,细颗粒在间隙中被吸附在一起,导致颗粒间空隙增大,保水能力增强,不利于尾矿坝的稳定^[9]。通过固结试验研究尾砂的压缩性与粒径的关系,发现除粒径小于0.075 mm的尾砂颗粒压缩性较好外,其它粒径压缩性区别不明显^[9]。当用于筑坝的尾砂粒径越来越小时,尾矿坝的渗透系数也越来越小,同时尾矿坝的浸润线也越来越高,在洪水工况下,细粒尾矿坝更有可能发生渗透破坏^[10]。漫顶溃坝研究和试验还发现:同样干燥或饱和的坝体,若由较大粒径的尾砂筑成,其溃决后产生的溃口较之于细粒坝体更窄、更深,下游泄砂量更少,溃坝时的洪峰流量更小;粒径越小的坝体,溃坝时下游泄砂量越大,溃坝后所产生的堆积滩越长越厚;而相同粒径的坝体,饱和坝体的溃坝泄砂量明显更大,堆积滩坡脚更大;同样条件下,饱和坝体的抗拖拽强度低于干坝^[11-16]。

上述研究成果可以得出如下结论:

1) 保有一定数量的粗粒尾砂对于降低尾矿坝的压缩沉降变形、降低尾矿坝的浸润线从而降低尾矿坝体的饱和度、提高尾矿坝的稳定性都是有益的。

2) 即使尾矿坝处于溃坝失稳状态下,粗粒尾砂含量高的尾矿坝体较之细粒尾砂含量高的坝体其溃坝后的下游泄砂量更少,溃坝时的洪峰流量更小,溃坝后所产生的堆积滩更短更薄,从而对下游环境的破坏程度和影响范围均更小。

《尾矿设施设计规范》(GB 50863—2013)对筑坝尾矿中的粗粒尾砂占比(业内通常指尾矿粒径 d 大于0.074 mm的粒径占比)有严格要求:“下游式或中线式尾矿筑坝分级后用于筑坝的 $d \geq 0.074$ mm尾矿颗粒含量不宜少于75%, $d \leq 0.02$ mm尾矿颗粒含量

不宜大于 10%……对于湿式尾矿库,当全尾矿颗粒极细($d < 0.074$ mm 含量大于 85%或 $d < 0.005$ mm 含量大于 15%)时,宜采用一次建坝”^[17]。

粗粒尾砂相比细粒尾砂更易渗透固结,也具有更好的强度,在水力冲填作用下形成尾矿堆积坝的“坝壳”和“硬层”部分,对于保障尾矿坝的稳定性起着至关重要的作用^[10]。开展尾砂分级综合利用后,粗粒尾砂被取走了一部分,可能给尾矿库带来如下的安全生产隐患和不利因素:

1)粗粒尾砂数量被减少后,入库尾矿平均粒径下降,含黏性尾矿增加,透水性变差。尾矿坝的渗透固结性能下降,造成浸润线抬升,可能会使得坝坡局部浸润线抬高、逸出、出现渗透变形破坏,发展严重时会造成尾矿堆积坝坍塌失稳^[10]。

2)粗粒尾砂数量被减少后,细粒尾砂占比增加,尾矿平均强度指标例如内摩擦角、容重等均会下降,不利于尾矿堆积坝体的稳定^[12]。

3)粗粒尾砂数量被减少后,尾矿沉积滩面坡度会变缓,在同等安全超高前提下,同比将减少尾矿库的调洪库容,降低尾矿库蓄洪调洪能力,影响尾矿库的排洪安全^[18]。

4)粗粒尾砂数量被减少后,为了确保尾矿坝坝坡稳定性,可能会倒逼放缓尾矿堆积坝筑坝外坡,会导致宝贵的尾矿库库容有一定的缩减,这与尾砂分级综合利用的初衷正好背道而驰。

综上所述,尾砂分级粒径的选取是个“两难”课题,一方面,若尾砂分级粒径的取值偏低,对尾矿综合利用有益,能减少排入尾矿库的尾矿量,但粗粒尾砂被取走对尾矿堆积坝的稳定是不利的;另一方面,若尾砂分级粒径的取值偏高,对尾矿堆积坝的稳定是有利的,但又不能充分实现尾矿的综合利用,与绿色矿业可持续发展战略相悖。既要充分实现尾砂分级综合利用,尽可能减少尾矿排放量,又不能因此对尾矿库安全稳定运行构成任何隐患和不利,因此,对粗粒径尾砂的获取有一个科学的“度”,尾砂分级粒径具体数值的选择需要进行科学的研究分析。

2 消除尾砂分级综合利用对尾矿库不利影响的对策研究

在许多矿山工程技术实践中,一般多由选矿或采矿工艺专业的工程师来承担尾矿分级粒径选取的研究工作,由于专业的局限性,往往专注于从尾矿综合利用的角度来开展研究,例如分级粗粒尾砂如

果用于地下采空区充填时,就会过于关注充填工艺所需的尾矿膏体性能要求,以此来确定尾砂分级粒径;又如分级粗粒尾砂若是外销用于水泥建材粗骨料,就会听从建材采购方提出的尾砂分级粒径要求。这些做法都忽略了一个重要的技术前提,即尾砂分级综合利用首先必须确保尾砂分级综合利用后的尾矿库安全运行,且不应为此牺牲尾矿库的库容。因此,事先充分研究论证科学合理的尾砂分级粒径取值,才能真正规避因尾砂分级粒径选取不当可能导致的尾矿库安全隐患和不利问题。笔者认为:尾砂分级粒径选取的研究工作应该始终围绕尾矿库的安全稳定开展,当取定了某个尾砂分级粒径数值后,相应必须开展的研究内容为:

1)基于取定的分级粒径数值,分析尾砂粒度组成和物理力学性质在尾矿分级之后的变化。重新计算分级后尾矿的粒径分布曲线、尾矿的平均粒径等;并重新检测由于尾矿分级导致的尾矿物理力学性能的变化,例如尾矿强度指标、黏滞力指标、容重指标、含水率及液、塑限等。

2)核算尾矿分级综合利用后的新入库尾矿量,重新计算尾矿库剩余的服务年限。

3)重新计算分级后的尾矿沉积滩平均坡度,比较分级前后的尾矿沉积滩平均坡度变化情况。

4)研究由于尾砂粒径改变之后,对尾矿坝沉积分布规律即尾矿坝沉积分层产生的影响。这与其后的防洪计算(特别是调洪演算)、尾矿坝渗流分析计算和尾矿坝稳定分析计算都密切相关。

5)重新进行尾矿库防洪安全研究论证。

(1)重新研究确定尾砂分级之后的尾矿库防洪标准。尾砂分级之后,通过前面开展的尾矿坝渗流分析计算和尾矿坝稳定分析计算,有可能分级之后的尾矿堆积坝外坝坡、终期堆积高程发生改变,尾矿坝坝体高度调整之后,相应存在调整尾矿库等级标准和尾矿库防洪标准的可能。

(2)重新研究确定洪水计算参数。如果尾矿坝堆积坝外坝坡、终期堆积高程发生改变,相应汇水面积、流域长、平均河槽比降等流域特征值参数及汇、产流参数可能发生变化;同时如果尾矿库防洪标准发生改变,相应暴雨参数也存在变化的可能。

(3)重新进行尾矿库洪水计算。前述的变化均有可能导致洪水计算结果发生改变。

(4)依据洪水计算的成果重新研究确定洪水全过程规律曲线。

(5)基于尾砂分级粒径改变导致的一系列变化

因素,以及新的洪水全过程规律曲线,分别选取自由泄流、半压力泄流和压力泄流三种不同的泄流流态,重新计算尾矿库的排洪系统泄漏能力是否能满足尾矿库安全排洪的要求^[19]。

(6)重新进行尾矿库调洪演算。需要按照以下三种工况分别进行调洪库容计算,绘制调洪库容曲线:a)尾砂粒径改变之前的尾矿库现状工况;b)尾砂粒径改变之后的尾矿库现状工况;c)尾砂粒径改变之后的终期尾矿库工况。采用水量平衡法重新进行调洪演算,目的是在确保满足尾矿库安全规程规范强制要求的尾矿坝最小干滩长度、最小安全超高值的前提下,复核现有排洪系统的实际泄流能力是否确保大于设计洪水泄流量,是否能安全排泄设计标准的洪水。

6)重新进行尾矿坝渗流分析计算。目的是重新确定坝体浸润线的位置、坝体和坝基的渗流量以及坝坡出逸段的水力坡降,作为坝体边坡稳定计算的依据^[20],也为分级之后的尾矿坝排渗工艺是否需要调整及如何调整提供依据。

尾矿坝渗流分析计算按照上述 a、b、c 三种工况分别进行,每种工况都考虑正常运行和洪水运行 2 种情况。

7)在尾矿坝渗流分析计算的成果基础上,重新进行尾矿坝稳定分析计算。同样按照前述的 a、b、c 三种工况分别进行,只是每种工况都考虑正常运行、洪水运行和特殊运行(添加地震荷载)3 种情况。计算方法分别采用瑞典圆弧法和简化毕肖普法^[12]。对于三等及三等以上的尾矿库,其尾砂分级之后的尾矿坝重新进行稳定分析计算时,笔者强烈推荐采用 2 种业内主流的尾矿坝稳定计算软件分别进行计算,互为校验。

8)必要时重新进行尾矿坝溃坝试验研究。

依据《国家安全监管总局等七部门关于印发深入开展尾矿库综合治理行动方案的通知》(安监总管一〔2013〕58号)要求:“(四)加强对“头顶库”的治理。……按下游 1 公里距离计算,确定坝下有居民、学校、厂矿及重要设施的尾矿库。要进行风险评估论证,研究制定治理和预防事故的对策措施。……要根据尾矿库坝高、库容量、服务年限和下游居民数量情况,科学制定居民搬迁计划。”基于这个文件,拥有“头顶库”且在尾矿库下游 1 公里距离内有居民、学校、厂矿及重要设施的矿山企业纷纷开展尾矿坝溃坝模型试验。尾矿坝溃坝模型试验是基于假设“头顶库”溃坝后,对下游环境及

生命财产的影响破坏范围及程度开展研究,为制定科学治理和预防事故的对策提供依据。研究手段通常采用实体模型试验和计算机软件数值模型相结合,互为验证^[21-23]。该项研究工作主要针对“头顶库”,所以第 8)条研究内容是选择项,不是必选项。

上述研究分析的结果必须同时满足以下三个安全要求:1)尾砂分级后的尾矿库防洪论证结果是安全的;2)尾砂分级后的尾矿坝渗流分析计算是安全的;3)尾砂分级后的尾矿坝稳定计算分析结果满足国家现行尾矿库安全规程规范的要求。此时才能得出结论:研究假定的尾砂分级粒径取值是合理的。否则,必须重新假定一个尾砂分级粒径数值,重复上述第 1~8 步骤的分析和计算工作,直至三个安全要求全部满足为止。因此,尾砂分级粒径合理数值的最终取定是一个假设-研究验证-再假设-再研究验证的循环论证过程。笔者建议上述分析和计算工作由专业的尾矿库工程技术人员来承担,且应具备水工、水文和环境岩土专业背景。

3 结语

尾砂分级综合利用是践行我国资源综合利用国策、发展绿色矿山的有效举措之一。在开展尾砂分级综合利用工程时,应始终以确保尾砂分级后的尾矿库安全稳定运行为首要目标,合理取定尾砂分级粒径。

参考文献

- [1] 徐宏达. 我国尾矿库病害事故统计分析[J]. 工业建筑, 2001, 31(1): 69-71.
XU H D. Statistical analyses of tailing reservoir disease accidents in China [J]. Industrial Construction, 2001, 31(1): 69-71.
- [2] 王峰, 杨勇, 王宇驰, 等. 基于 Geo-studio 的尾矿库加高扩容后坝体稳定性分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2022, 74(5): 90-98.
WANG F, YANG Y, WANG Y C, et al. Stability analysis of tailings dam after heightening and capacity expansion based on Geo-studio [J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2022, 74(5): 90-98.
- [3] 陶东良, 王硕, 吴蒙蒙, 等. 某加高扩容尾矿库三维静力敏感性及地震反应数值分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2022, 74(4): 79-87.
TAO D L, WANG S, WU M M, et al. Three dimensional static sensitivity and seismic response numerical analysis of a tailings pond with increased

- storage capacity [J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2022, 74(4): 79-87.
- [4] 沈楼燕. 小型尾矿库安全管理[J]. *劳动保护*, 2008(4): 100-101.
SHEN L Y. On safety management of small-sized pond[J]. *Labour Protection*, 2008(4): 100-102.
- [5] 印万忠, 李丽匣. 尾矿的综合利用与尾矿库的管理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
YIN W Z, LI L X. Comprehensive utilization of tailings and management of tailings pond [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.
- [6] 孟跃辉, 倪文, 张玉燕. 我国尾矿综合利用发展现状及前景[J]. *中国矿山工程*, 2010, 39(5): 4-9.
MENG Y H, NI W, ZHANG Y Y. Current state of ore tailings reusing and its future development in China[J]. *China Mine Engineering*, 2010, 39(5): 4-9.
- [7] 刘殿华, 吴贤振. 全尾砂充填技术的应用与发展[J]. *世界有色金属*, 2012(8): 44-45.
LIU D H, WU X Z. Application and development of total tailings filling technology [J]. *World Nonferrous Metals*, 2012(8): 44-45.
- [8] 魏作安, 沈楼燕, 李东伟, 等. 探讨尾矿库设计领域中存在的问题[J]. *中国矿业*, 2003, 12(3): 60-61, 65.
WEI Z A, SHEN L Y, LI D W, et al. Study on problems facing the design of tailing dam[J]. *China Mining Magazine*, 2003, 12(3): 60-61, 65.
- [9] 郭顺. 尾砂的沉积固结规律与尾矿库溃坝风险性研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2020.
GUO S. Study on the rules of deposition and consolidation of tailings and the risk of dam break of tailings pond[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2020.
- [10] 湛伟. 细粒砂尾矿坝渗流稳定性分析[D]. 衡阳: 南华大学, 2017.
CHEN W. Analysis on seepage stability of fine tailings dam[D]. Hengyang: University of South China, 2017.
- [11] 胡虎. 不同粒径尾砂筑坝对尾矿漫顶溃坝的影响研究[J]. *城市建筑*, 2019(29): 116-117.
HU H. Study on influence of dam constructed by tailing of different sizes on dam break due to flooding[J]. *Urbanism and Architecture*, 2019(29): 116-117.
- [12] 姚嗣伟, 乐志强, 张年龙, 等. 付冲沟尾矿库细粒尾砂堆存研究[J]. *现代矿业*, 2021, 37(2): 73-76.
YAO S W, LE Z Q, ZHANG N L, et al. Study on fine tailings storage in Fuchonggou tailings reservoir[J]. *Modern Mining*, 2021, 37(2): 73-76.
- [13] 秦华礼, 马池香. 水对尾矿坝稳定性的作用机理研究[J]. *金属矿山*, 2008(10): 116-118.
QIN H L, MA C X. Mechanism of water effect on the stability of tailing dam [J]. *Metal Mine*, 2008(10): 116-118.
- [14] 郑欣, 秦华礼, 许开立. 导致尾矿坝溃坝的因素分析[J]. *中国安全生产科学技术*, 2008, 4(1): 51-54.
ZHENG X, QIN H L, XU K L. Analysis of the factors inducing the tailing dam falling[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2008, 4(1): 51-54.
- [15] 李全明, 王云海, 张兴凯, 等. 尾矿库溃坝因素分析及风险指标体系研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2008, 4(3): 50-53.
LI Q M, WANG Y H, ZHANG X K, et al. Analysis of disastrous factors concerning tailing dam failing and research on risk index system[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2008, 4(3): 50-53.
- [16] 袁兵, 王飞跃, 金永健, 等. 尾矿坝的液化判别研究[J]. *中国安全科学学报*, 2007, 17(6): 166-171.
YUAN B, WANG F Y, JIN Y J, et al. Study on liquefaction evaluation of tailing dam [J]. *China Safety Science Journal*, 2007, 17(6): 166-171.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 尾矿设施设计规范: GB 50863—2013 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development, PRC, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, PRC. Code for design of tailings facilities: GB 50863 — 2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [18] 张祖刚, 毕兵兵, 黄保平, 等. 梅山尾矿分级回收综合利用研究与生产实践[J]. *化工矿物与加工*, 2018, 32(2): 62-66.
ZHANG Z G, BI B B, HUANG B P, et al. Comprehensive utilization and production practice of classification and recovery of tailings in Meishan[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2018, 32(2): 62-66.
- [19] 梁忠民, 钟平安, 华家鹏. 水文水利计算[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
LIANG Z M, ZHONG P A, HUA J P. Hydrological and hydraulic calculation[M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 2008.