

尾矿坝安全研究方法综述

刘 迪, 李俊平

(西安建筑科技大学 材料与矿资学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 尾矿坝安全研究能为现场的安全监管提供重要的理论依据和技术支持。广泛调研尾矿坝溃坝机理研究、稳定性分析方法、安全监测技术、安全预测预警方法等 4 方面的国内外现状, 得出稳定性分析的应用在现场的安全监管中起着重要作用, 实时安全监测预警是尾矿坝安全研究中的发展方向之一。尾矿坝稳定性研究应融合尾矿物理力学指标、监测指标、环境影响因素, 综合应用定值计算、数值分析、不确定性分析等方法, 定量分析各影响因子对尾矿坝稳定性的影响程度。合理应用稳定性分析方法、研究可靠监测技术与科学预警方法, 实现尾矿坝运行安全的实时监测预警, 将是尾矿坝安全研究发展的必然趋势。

关键词: 尾矿坝; 安全; 稳定性分析; 监测; 预警

中图分类号: X931

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)06-0910-09

Review on the research methods of tailings dam safety

LIU Di, LI Junping

(School of Materials and Mineral Resources, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Tailings dam safety research can provide an important theoretical basis and technical support for the safety supervision on-site. Extensive survey from the tailings dam unstability mechanism, stability analysis, safety monitoring, prediction and pre-warning four aspects, and obtains that the applications of tailings dam stability analysis join to play an important role in safety management and control on-site. The real time safety monitoring and pre-warning is one of the development directions of the tailings dam safety. The research on stability analysis should integrate physical and mechanical indexes, monitoring indexes, environmental impact indexes, using fixed value calculation, numerical analysis, uncertainty analysis methods comprehensively, quantitatively analyzing the influence on tailings dam stability by various influencing factors. Using stability analysis method rationally and researching reliable monitoring technology and scientific pre-warning methods may realize the real time safety monitoring and pre-warning of tailings dam. It will be an inevitable development trend for application on-site of the tailings dam safety.

Key words: tailings dam; safety; stability analysis; monitoring; pre-warning

尾矿是选矿分选作业的产物之一, 通过堆积处理形成的尾矿坝是重大危险源。尾矿坝溃坝事故往往带来巨大的灾害, 近年来的若干起重大溃坝事故, 无一不造成大量人员伤亡、财产损失和对环境的不良影响。随着国家对安全与环境问题的高度重视, 对于尾矿坝的安全监管也提出了更高的要求。为了加强尾矿坝的安全管理, 保障其运行安全, 近年来国内外作了诸多尾矿坝安全方面的研究, 同时, 许多新的技术和方法被应用于现场, 诸如尾矿坝安全监测技术等, 对于降低尾矿坝安全隐患的风险程度、避免事故发生, 保证尾矿坝安全运行发挥了重要作用。

本文通过广泛调研尾矿坝溃坝机理研究、稳定性分析方法、安全监测技术、安全预测预警方法等 4 个方面的研究成果及其应用特点, 提出了尾矿坝安全研究方法面向现场应用的新需求及发展趋势。

1 尾矿坝的溃坝机理研究现状

尾矿坝溃坝机理研究的重点是分析溃坝原因与溃坝事故演化过程, 能为尾矿坝运行安全监管、控制溃坝风险提供重要的理论依据。

在国外, 大量研究表明了溃坝事故原因是多方面的, 在尾矿坝溃坝机理研究方面, 国外学者

主要采用事故调查与统计分析、试验研究、数值模拟等方法与手段，通过分析事故参数与坝体结构特征的关系、尾矿物理力学指标变异性和不确定性、尾矿坝静力学与动力学特征，得出尾矿坝结构特征^[1]、地震液化^[2]、静态液化^[3]、渗流^[4-5]等因素是导致溃坝的主要原因，并重点研究了地震液化、渗流与坝基失稳等要素导致溃坝的动态演化过程等等。国内学者也积极开展了大量研究，何学秋等^[6]采用理论分析与实验研究相结合的方法，根据流变力学的观点，分析了尾矿坝加载过程中的流变特性以及坝体所受应力大于筑坝材料长期强度的溃坝机理；郑欣等^[7]通过分析尾矿坝溃坝模式、溃坝路径、溃坝原因，建立了尾矿坝溃坝风险评价指标体系；李全明等^[8]采用物理模型试验与数值模拟结合的方法，分析了洪水漫顶、地震液化、渗流、泥石流、坝基失稳、增高扩容等因素导致溃坝的演化过程，得出了坝体位移、浸润线高度等失稳特征参数的变化规律等等。

国内外研究表明尾矿坝的溃坝机理是一个复杂的科学问题，需要建立针对诸多导致坝体失稳成因的研究体系。在影响尾矿坝稳定性的诸多影响因素中，物理力学指标(包括尾矿颗粒大小与级配、孔隙比、容重、内摩擦角、粘聚力、渗透系数等)反应尾矿的力学特性，是采用数学、物理模型分析尾矿坝失稳变化特征的基础参数，而且具有不确定性；采用自动化手段监测的安全指标(包括浸润线、干滩长度、坝体位移、降雨量与库水

位等)，随其数据量的增长而构成大数据分析范畴，充分、有效分析尾矿坝监测数据，挖掘潜在规律对于尾矿坝失稳机理研究也至关重要；由于环境因素的影响，尾矿坝受动、静交变荷载，一些因素诸如洪水、地震等对于尾矿坝的作用和影响是不确定的，从而使得环境因素的影响对于尾矿坝稳定性分析是不可或缺的。因此，综合考虑尾矿物理力学指标、尾矿坝监测指标和环境影响指标，建立尾矿坝稳定性分析与评价体系，定量分析物理力学指标、监测指标与环境影响指标变化对于尾矿坝稳定性的影响程度，深度挖掘尾矿坝失稳的潜在规律是尾矿坝溃坝机理研究中的重要方向，其中的诸多问题有待于深入研究。

2 尾矿坝的稳定性分析方法研究现状

尾矿坝稳定性分析研究起步很早，在现场应用中一直发挥着重要作用，目前对于尾矿坝稳定性分析的方法主要有极限平衡法、数值分析法和不确定性分析法。极限平衡法由于其计算简单、实用性强的特点，在工程实践中应用比较广泛。随着计算机软件技术的发展，数值分析法作为一种应用基础研究，出现了诸多有益成果，并被越来越多的被应用于工程实践中。不确定性分析方法有着动态计算、计算方法选择性强的优势，对于具体工程问题，有着特殊应用需要。将以上 3 类稳定性分析的计算方法、特点及代表性应用归纳见表 1。

表 1 尾矿坝稳定性分析方法及特点
Tab. 1 The method of tailings dam stability analysis and its characteristics

分类	计算方法	方法特点	代表性应用
极限平衡法	瑞典圆弧法、毕肖普法、简布法等	假设均匀土体在特定地质断面下的定值计算，不考虑物理指标的变异性和不确定性	基于稳定性分析进行尾矿坝设计及优化、加固和加高扩容技术研究
数值分析法	有限元法、离散元法、快速拉格朗日分析法等	考虑边坡岩土体的不均匀性和不连续性，应用计算机求数值解	分析干滩长度、降雨量、浸润线深度、库水位等参数与坝体稳定性之间的关系，以及特殊工况下尾矿坝稳定性
不确定性分析法	蒙特卡罗法、可靠性指标法、统计矩法、随机有限元法等	考虑物理力学指标的变异性和不确定性，针对参数变化以安全系数等稳定性指标为基础进行连续、动态计算	分析尾矿坝可靠度，并分析物理力学指标、坝高、浸润线对稳定性的敏感程度；研究监测指标的不确定性处理方法

近年来，尾矿坝稳定性分析方面的应用研究较多。极限平衡法应用研究方面，林树彬^[9]采用极

限平衡法，基于稳定性分析进行尾矿坝设计研究；肖慧^[10]、黄伟^[11]采用极限平衡法，基于稳定性分

析进行坝体加固和加高扩容方案分析。数值分析法应用研究方面,柴军瑞^[12]等依据三维渗流理论,通过三维有限元计算进行尾矿坝渗流场分析;宋传旺^[13]等建立了基于 Mohr-Coulomb 准则的分析模型,结合强度折减法,利用有限元计算软件 MIDAS 分析了尾矿坝稳定性;陈承等^[14]等利用 GEO Studio 的 SEEP/W 模块建立了坝坡渗流场模型,进行不同强度降雨条件下的坝坡稳定性分析;冉小小等^[15]利用 ABAQUS 建立了 2 维尾矿坝稳定性分析模型,分析了不同降雨量和地震条件下的尾矿坝稳定性情况;李亮等^[16]采用 FLAC 2D 模拟分析了尾矿坝安全系数随平均坡度和浸润线深度变化的情况;刘洋等^[17]针对尾矿静力液化特性,建立了尾矿砂的弹塑性本构模型,利用 FLAC 模拟尾矿砂的静力液化特性来分析尾矿坝整体稳定性;张铎等^[18]采用基于有限差分与离散元的离散—连续耦合分析方法,模拟了潜在滑移面在充填前后的变化情况;霍紫玮^[19]、吴龙梁^[20]、尹光志^[21]等模拟分析了泥石流、洪水、地震等特殊工况条件下的尾矿坝稳定性。不确定性分析法应用研究方面,张超^[22]、黄英华^[23]、张岳安^[24]等研究了尾矿坝可靠度分析方法,分析了容重、内摩擦角、粘聚力等物理参数,以及坝高、浸润线埋深、干滩长度等结构参数对坝体稳定性的敏感性;董陇军等^[25]在尾矿坝地震稳定性分析中提出了不确定性分析的新方法,利用盲数运算将安全系数用区间表示,并附加取值概率来表示尾矿坝安全的可能性;王肖霞^[26]研究了尾矿坝监测信息的不确定性处理方法,建立了监测指标与风险模态间的复杂映射关系并用于尾矿坝风险评价;陈建宏^[27]采用 Fellenies 方法,利用 SLIDE 软件模拟了不同工况下坝体稳定性,得出了安全系数的变化范围及坝体破坏概率;张津嘉^[28]结合神经网络与蒙特卡罗方法,分析了尾矿坝在不同工况下的可靠性;王飞跃^[29]建立了模糊随机可靠度分析模型,分析了尾矿坝在不同工况条件下的可靠度等等。

以上尾矿坝稳定性分析的应用研究中,极限平衡法在现场应用最为广泛,其实质是将影响尾矿坝稳定性的各物理力学指标用确定性的数学模型加以描述,用安全系数定量表示尾矿坝的失稳破坏特征,有着固有的缺陷;数值分析方法考虑岩土体的不均匀性和不连续性,可通过计算机求解而不受限于问题的复杂性;由于受选矿工艺及充填工艺等过程因素的影响,尾矿组成、颗粒大小、级配的变化都会使得尾矿物理力学指标具有

不确定性,不确定性分析法可以弥补这一缺陷,适用于尾矿坝稳定性在时空上的变化分析。但目前的不确定性分析研究仍以尾矿坝稳定性的可靠度分析为主,部分敏感性分析研究独立分析了物理力学指标、浸润线深度、干滩长度等参数对坝体稳定性的影响程度,但缺乏对于各类因素不确定性的综合考虑。因此,面向现场应用的尾矿坝稳定性分析将趋于精细化,即对于工程实践中的具体问题,将以上 3 种方法按照问题的需求恰当结合,考虑尾矿物理力学指标的不确定性,以定量手段分析坝体位移、干滩长度、浸润线、库水位等重要参数对坝体稳定性的影响程度,或者它们之间内在的关联关系,辨识尾矿坝运行安全主控因素,以此来建立尾矿坝稳定性分析模型将更适用于现场应用。

3 尾矿坝监测技术研究现状

尾矿坝安全监测技术的发展对于提高尾矿坝安全控制水平十分重要。在国外,美国、意大利等国最早开始研究尾矿坝安全监测技术,并逐步取得了许多研究成果。诸如意大利建立了世界领先的大坝安全监测预报模型,美国首次通过集中处理坝体监测数据实现了自动化控制等等。随着无线传感器、计算机及其软件技术、网络通信和数据库技术的发展,尾矿坝安全监测也进入了自动化阶段^[30]。国内的尾矿坝安全监测发展较晚,2000 年以后,随着电子传感技术、高精度测量仪器仪表、网络通信技术的发展及向各行业渗透,矿业工程领域也系统地研究了尾矿坝渗流监测、位移监测、浸润线监测等技术,并初步研发了尾矿坝监测系统,能够对尾矿坝监测指标进行实时监测,并在现场检验中逐步完善,在近年来成功应用于工程实践^[31]。目前我国尾矿坝安全监测指标主要有浸润线、库水位、干滩长度、坝体位移、降雨量等,针对这些重要监测指标的监测技术涵盖了仪器仪表、网络通信、电子传感、数据库等技术,可实现对于所有监测数据的实时采集、传输、处理、存储与显示,初步形成一个完整的监测技术体系^[32]。

伴随着测量仪器、传感技术、计算机技术、通信技术与自动化技术的进步和发展,尾矿坝监测系统在硬件方面可实现各监测指标的连续自动化、实时性和高精度检测。在软件方面,目前的监测设备实现了数据采集、传输和存储,对于数据的处理局限于简单的预处理,而随着时间的积累,

某些重要参数监测数据序列隐含着尾矿坝稳定性变化特征规律。因此，以尾矿坝安全监测数据为分析对象，以数据深度分析为基础手段，将稳定性计算结果与监测数据分析结果相结合，分析坝体稳定性指标和监测指标之间的关联特征，以此作为尾矿坝安全预警分析的依据，实现基于实时监测的尾矿坝稳定性分析与安全预警，将能为现场的风险评估及控制提供重要的决策依据。

4 尾矿坝安全预测预警方法研究现状

4.1 尾矿坝安全预测方法研究现状

近年来，在尾矿坝安全预测方面也出现了一些有益成果。王姝等^[33]通过建立回归分析模型，分析坝高、库容、边坡比等结构参数与事故发生可能性之间的内在关联关系，利用 SPSS 软件计算预测事故发生的可能性；王云海等^[34]建立了支持向量机回归预测模型，以坝顶高程、滩顶高程、干滩长度、库水位等参数的时间序列为分析样本，预测浸润线埋深并取得了较好的预测精度；王飞跃等^[35]通过分析影响浸润线的因素，通过多项式拟合得出了浸润线矩阵，可用于预测洪水工况的浸润线深度来进行稳定性分析；王永强等^[36]利用相似实验分析了溃坝泥石流的冲击压力、泥深和流速的变化规律，并预测出其最大值。邓静等^[37]针对坝体垂直位移的不确定性，以坝体位移监测数据为分析对象建立灰色预测模型，将坝体垂直位移的预测应用于工程实践中；聂志丹等^[38]通过应用案例中分别应用坝高倍数估算法、经验公式法（泥石流预测公式和水库溃坝预测公式）和 2 维模拟法，得出水库溃坝模式更适用于洪水漫顶型溃坝，而泥石流模式更适用于饱和失稳溃坝。聂娜

娜等^[39]以滩顶高程、库水位、浸润线、干滩长度几个参数的监测数据为分析样本，建立了果蝇优化广义回归神经网络模型，用来预测尾矿坝安全系数，取得了较准确的预测结果等等。

以上研究采用统计分析、经验公式计算、相似实验分析、智能计算、灰色系统建模等方法，以浸润埋深、安全系数、坝体位移、事故发生可能性为计算结果实现了尾矿坝的安全预测，对于尾矿坝安全研究起到了一定的积极的作用。在目前已有的 2 类尾矿坝预测中，对于尾矿坝监测指标的预测以浸润线埋深为主，其应用特点表现为实时或短周期，可以不考虑尾矿物理学指标的不确定性，但对于安全系数预测和溃坝可能性预测，由于受物理学参数值不确定性的影响，尾矿坝稳定性分析结果在时空上有所变化，所以仅仅考虑尾矿坝结构参数和监测参数是不够的，应充分考虑尾矿物理学指标及其不确定性，在此基础上，将稳定性指标预测结果纳入尾矿坝的风险评价指标体系将更适合于现场应用。

4.2 尾矿坝安全预警方法研究现状

尾矿坝安全预警是以尾矿坝运行期间的安全检测为基础，以数据处理为基础手段，将定量分析、计算与处理方法应用于尾矿坝运行异常分析的技术性研究，对于推动安全关口前移有着重要意义。近年来，随着安全预警理论发展及其在各行各业中的应用和渗透，尾矿坝安全预警已经成为尾矿坝安全研究中的重要方向之一。目前的尾矿坝安全预警方法究其特点，可分为尾矿坝稳定性预警、监测预警与综合预警等 3 类，将这 3 类尾矿坝安全预警方法的计算方法、方法特点及应用特点归纳见表 2。

表 2 尾矿坝安全预警方法及特点
Tab. 2 The method of tailings dam safety pre-warning and its characteristics

分类	计算方法	方法特点	应用特点
稳定性预警	极限平衡法、数值分析法等	通过分析影响因子对坝体稳定性的影响，依据安全系数进行预警	分析影响因子对坝体稳定性的影响程度，对于安全系数计算结果，依据相关规程设定值划分预警等级。
监测预警	统计分析、灰色系统分析、智能计算方法、分形分析等	利用尾矿监测数据，通过数学建模建立预警模型。	对于安全监测指标，如浸润线、干滩长度、坝体位移等监测数据进行处理，通过设定预警阈值或依据相关规程实现安全预警。
综合预警	不确定分析方法	通过研究尾矿坝安全预警基础理论，建立尾矿坝安全预警指标体系。	研究溃坝机理或溃坝事故模式，建立综合性尾矿坝安全预警指标体系。

稳定性预警研究方面,梁彤彤^[40]、雷丁丁^[41]、史松海等^[42]都通过尾矿坝稳定性计算,分析了不同浸润线深度时的尾矿坝稳定性情况,以浸润线作为预警指标,以安全系数划分预警等级实现了预警应用。监测预警研究方面,李航^[43]以浸润线监测数据为分析对象,建立了灰色预测模型,通过预测值与实际监测值的比对来划分预警等级,实现了尾矿坝安全预警;胡珊^[44]等建立了灰色预测模型,实现了浸润线趋势预测预警;林雪松等^[45]依据干滩长度和浸润线深度计算尾矿坝安全系数,依据安全系数划分等级来进行安全预警;宋传旺等^[46]依据分形理论,采用分形维数预测坝体竖向位移,实现坝体位移的超前预警;黄磊等^[47]基于三维GIS尾矿坝监测系统,实现了坝体位移、浸润线、库水位和水情异常等参数的预警;肖圣博^[48]、杨波^[49]、廖文景^[50]基于尾矿坝安全监测系统的功能,研究了依据相关技术规范划分预警等级,以坝体位移、干滩长度、浸润线埋深等参数作为预警指标进行安全预警的方法等等。综合预警研究方面,吴宗之^[51]、梅国栋^[52]等从自然、固有和人为等3个方面因素出发,以渗透破坏、洪水漫顶、和地震液化等3方面事故类型作为一级指标纵向分析,建立了尾矿坝安全预警指标体系,依据预警指标的不同,提出了指标预警、统计预警、模型预警等预警阈值确定及预警等级划分方法;谢旭阳等^[53]从尾矿坝固有安全、地质条件、气象条件、人为因素等4个方面分析了尾矿库灾害的影响因素,建立了尾矿坝区域预警指标体系,并确定了各个预警指标的取值范围,为尾矿坝运行过程中的异常分析提供了依据等等。

此外,随着尾矿坝安全监测技术的日渐成熟,一些学者设计开发了基于在线安全监测的尾矿坝预警系统,进一步提高了现场安全管控的信息化水平。郑立安^[54]将ZigBee无线网络技术应用到尾矿坝安全监测中,实现了坝体位移、浸润线、干滩、库水位、坝体应力5个参数的数据采集与传输,并在此基础上开发了安全预警软件,实现了以上5个参数的安全预警。刘正强^[55]基于尾矿坝在线监测系统,研发了尾矿坝预警软件系统,能够实现与在线监测系统联机,实时采集干滩长度、坝体位移、浸润线、雨量、渗流量、库水位等参数的监测数据,监视各参数监测数据并显示统计

参数,并具备语音、短信报警功能,取得了较好的现场应用效果。

由以上分析,尾矿坝监测及日常的人工检测为其安全分析提供了充分的数据基础,而目前大部分的预警方法只针对单个监测指标依据相关规范中的警戒值进行预警,如浸润线预警、库水位预警、坝体位移预警等,或将稳定性指标与监测指标结合,以逻辑嵌套的方式进行组合预警,缺乏对于各类数据的深度分析,并未定量分析稳定性指标与尾矿坝失稳致灾因子之间的关联关系。因此,研究尾矿坝安全预警理论,充分结合尾矿物理力学指标、监测指标、环境影响指标,定量分析各类指标对稳定性指标的影响程度,构建尾矿坝预警指标与方法体系。基于此,研发具备在线监测、分析、评价和预警功能的尾矿库溃坝风险预警系统以提高其可操作性,以此实现及时、合理准确的预警分析将是尾矿坝安全预警满足于现场应用的必然发展趋势。

5 结论

(1)尾矿坝稳定性分析将趋于精细化。尾矿坝失稳机理研究表明导致尾矿坝失稳的原因具有多样性和不确定性,应充分考虑尾矿物理力学指标、监测指标、环境因素,以及诸因素的不确定性,定量分析致灾因子变化对于尾矿坝稳定性的影响程度,深度分析不同工况下尾矿坝失稳变化规律对于现场的安全管控更具指导意义。

(2)合理应用稳定性分析方法在尾矿坝安全分析中至关重要。尾矿坝稳定性分析方法中,极限平衡法、数值分析法与不确定性分析法各有其优点和应用适用性,在工程实践中,尾矿坝稳定性在时间和空间上具有不确定性。因此,充分考虑各类因素构成分析参数的不确定性,将以上方法组合建模,动态、定量分析尾矿坝稳定性及其变化规律在实际应用中更具适用性。

(3)可靠监测与科学预警将成为尾矿坝安全研究中的重要组成部分。在可靠安全监测技术的支撑下,研究尾矿坝安全预警基础理论,构建尾矿坝安全预警指标及方法体系,结合稳定性分析、统计分析数值分析等方法,合理量化预警指标进行异常分析,实现在线监测、分析、评价和预警,对尾矿坝运行安全风险的实时监测与控制,是现场安全监管发展的必然趋势。

参考文献 References

- [1] 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.
- [2] SEED H B. Evaluation of soil liquefaction effects on level ground during earthquake [C]. // *Liquefaction Problems in Geotechnical engineering*. Philadelphia: PA ASCE National Convention, 1976.
- [3] FOURIE A B, BLIGHT G E, PAPAGEORGIOU G. Static liquefaction as a possible explanation the merrispruit tailings dam failure [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2001, 38:707-719.
- [4] ZANDARIN M T, OLDECOP L A, RODRIGUEZ R, et al. The role of capillary water in the stability of tailing dams [J]. *Engineering, Geology*, 2009, 105(1): 108-118.
- [5] VAEZI G F, Sanders R S, Masliyah J H. Flocculation kinetics and aggregate structure of kaolinite mixtures in laminar tube flow [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011, 355(1):96-105.
- [6] 何学秋,王云海,梅国栋. 基于流变-突变理论的尾矿坝溃坝机理及预警准则研究[J]. *中国安全科学学报*, 2012, 22(9): 74-77.
HE Xueqiu, WANG Yunhai, MEI Guodong. Study on mechanism and forecasting criterion of tailings dam-break based on the theory of rheology mutation [J]. *China Safety Science Journal*, 2012, 22(9): 74-77.
- [7] 郑欣,许开立,魏勇. 尾矿坝溃坝致灾机理研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2008, 4(5): 8-11.
ZHENG Xin, XU Kaili, WEI Yong. Study on the disaster causing mechanism of the tailings dam falling [J]. *Journal of safety Science and technology*, 2008, 4(5): 8-11.
- [8] 李全明,张兴凯,王云海,等. 尾矿库溃坝风险指标体系及风险评估模型研究[J]. *水利学报*, 2009, 40(8): 989-991.
LI Quanming, ZHANG Xingkai, WANG Yunhai, et al. Risk index system and evaluation model for failure of tailings dams [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(8):989-991.
- [9] 林树彬. 白石嶂3#尾矿库库坝设计技术研究[D]. 广州:华南理工大学, 2011.
LIN Shubin. Critical technical problems research in the design of the Baishizhang No.3 tailings dam [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [10] 肖慧. 金山店锡冶山尾矿坝稳定性及加固研究[D]. 武汉:武汉科技大学, 2010.
XIAO Hui. The stability analysis and reinforcement of Xi Ye Shan tailings dam in Jin Shan Dian [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2010.
- [11] 黄伟. 吴坑里尾矿库坝体加高扩容稳定性分析[D]. 长沙:中南大学, 2014.
HUANG Wei. The stability analysis on elevated and expanded Wukengli tailings dam [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [12] 柴军瑞,李守义,李康宏,等. 米箭沟尾矿坝加高方案渗流场数值分析[J]. *岩土力学*, 2015, 26(6): 973-977.
CHAI Junrui, LI Shouyi, LI Kanghong, et al. Numerical analysis of seepage field in Mijiangou tailings dam to be designed to increase the dam height [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 26(6):973-977.
- [13] 宋传旺,于广明. 基于应力场与渗流场耦合的尾矿坝稳定性[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2013, 32(5):602-605.
SONG Chuanwang, YU Guangming. Stability of tailings dam under coupled stress and seepage field [J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2013, 32(5):602-605.
- [14] 陈承,程三建,张亮. 降雨对良山太平尾矿坝稳定性影响分析[J]. *有色金属科学与工程*, 2015, 6(2): 94-94.
CHEN Cheng, CHENG Sanjian, ZHANG Liang. Stability analysis of tailings dam in view of rainfall [J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2015, 6(2):94-94.
- [15] 冉小小,万玲,魏作安. 采用ABAQUS对鱼祖乍尾矿坝数值模拟及稳定性分析[J]. *固体力学学报*, 2013, 33(S): 306-312.
RAN Xiaoxiao, WAN Ling, WEI Zuoan. Numerical Simulation and stability analysis of Yuzuzha tailings dam by ABAQUS [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2013, 33(S): 306-312.
- [16] 李亮,褚雪松. 浸润线深度对尾矿坝稳定性分析的影响研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2011, 7(11): 20-23.
LI Liang, CHU Xuesong. Study on the effect of phreatic line depth on the evaluation of slope stability for tailing dam [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2011, 7(11):20-23.
- [17] 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): 1158-1167.
- LIU Yang, ZHAO Xuetong, WU Shunchuan. Analysis of static liquefaction and numerical simulation for tailings pond under high depositing rates[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1158-1167.
- [18] 张铎, 刘洋, 吴顺川, 等. 基于离散-连续耦合的尾矿坝边坡破坏机理分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1473-1476.
- ZHANG Duo, LIU Yang, WU Shunchuan. Failure mechanism analysis of tailing dams based on coupled discrete and continuous method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1473-1476.
- [19] 霍紫玮. 尾矿坝溃决的数值模拟及应用研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道学院, 2012.
- HUO Ziwei. Study on numerical simulation of the tailings dam failure and its application[D]. Shijiazhuang: Shi Jiazhuan Railway University, 2012.
- [20] 吴龙梁, 黄崧, 经晶, 等. 尾矿坝特殊工况动力稳定性分析[J]. 广东工业大学学报, 2015, 32(2): 28-31.
- WU Longliang, HUANG Song, JING Jing, et al. Dynamic stability analysis of the tailings dam under special working condition[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2015, 32(2): 28-31.
- [21] 尹光志, 李愿, 魏作安, 等. 洪水工况下尾矿库浸润线变化规律及稳定性分析[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(3): 72-75.
- YIN Guangzhi, LI Yuan, WEI Zuoan, et al. Regularity of the saturation lines' change and stability analysis of tailings dam in the condition of flood[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(3): 72-75.
- [22] 张超, 杨春和, 徐卫亚. 尾矿坝稳定性的可靠度分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1706-1710.
- ZHANG Chao, YANG Chunhe, XU Yawei. Reliability analysis of tailings dam stability[J]. Rock and soil mechanics, 2004, 25(11): 1706-1710.
- [23] 黄英华, 徐必根, 刘小林. 尾矿坝抗滑稳定性及影响因素敏感度分析研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2009, 61(4): 41-43.
- HUANG Yinghua, XU Bigen, LIU Xiaolin. Study on the slide stability of tailings dam and sensitivity analysis of influencing factors[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2009, 61(4): 41-43.
- [24] 张岳安, 周科平. 浸润线埋深对尾矿坝稳定性的指标满意度敏感性分析[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(10): 93-97.
- ZHANG Yuean, ZHOU Keping. Sensibility analysis of saturation line depth to tailings dam stability with Index satisfaction degree[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(10): 93-97.
- [25] 董陇军, 赵国彦, 官凤强, 等. 尾矿坝地震稳定性分析的区间模型及应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(1): 164-167.
- DONG Longjun, ZHAO Guoyan, GONG Fengqiang, et al. Interval analysis model of tailings dam seismic stability and its application[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(1): 164-167.
- [26] 王肖霞. 尾矿坝安全监测不确定性信息的处理及风险评估技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2014.
- WANG Xiaoxia. Research on uncertainty information processing and risk assessment in safety monitoring of tailings dam[D]. Taiyuan: North University of China, 2014.
- [27] 陈建宏, 张涛, 曾向农, 等. 尾矿坝边坡稳定性仿真建模与安全分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2008, 39(4): 635-639.
- CHEN Jianhong, ZHANG Tao, ZENG Xiangnong, et al. Slope stability simulation modeling and safety analysis of tailings dam[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2008, 39(4): 635-639.
- [28] 张津嘉. 基于神经网络的尾矿坝稳定性可靠度分析及影响因素研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
- ZHANG Jinjia. Reliability analysis and influence factors of tailings dam stability based on Neural Network [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011.
- [29] 王飞跃. 基于不确定性理论的尾矿坝稳定性分析及综合评价研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- WANG Feiyue. Research on stability analysis and comprehensive assessment of the tailing dam based on the uncertainty theory[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [30] YU G M, SONG C W. Applications of online monitoring technology for tailings dam of digital mine[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(3): 604-609.
- [31] 李青石, 李庶林, 陈际经. 试论尾矿库安全监测的现状 & 前景[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(1): 99-103.
- LI Qingshi, LI Shulin, CHEN Jijing. Discussion on the situation and prospect of safeguard for tailing pond

- [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(1):99-103.
- [32] 于广明,宋传旺,吴艳霞,等. 尾矿坝的工程特性和安全监测信息化关键问题研究[J]. 岩土工程学报, 2011,33(S1):49-52.
- YU Guangming, SONG Chuanwang, WU Yanxia, et al. Engineering characteristics and key problems of security monitoring informatization for tailings dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1):49-52.
- [33] 王姝,柴建设. 基于社会科学统计程序(SPSS)回归性分析的尾矿库事故预测模型[J]. 中国安全科学学报, 2008,18(12): 35-39.
- WANG Shu, CHAI Jianshe. Accident prediction model for tailings reservoir based on regression analysis of SPSS[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(12): 35-39.
- [34] 王云海,李娟,李春民. 尾矿坝浸润线数据挖掘预测模型的样本选取研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2009,5(5): 9-13.
- WANG Yunhai, LI Juan, LI Chunming. Research of selecting the training samples for the infiltration route prediction model in tailing[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2009, 5(5): 9-13.
- [35] 王飞跃,杨铠腾,徐志胜,等. 基于浸润线矩阵的尾矿坝稳定性分析[J]. 岩土力学, 2009,30(3):840-844.
- WANG Feiyue, YANG Kaiteng, XU Zhisheng, et al. Stability analysis of tailings dam based on saturation line matrix[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3):840-844.
- [36] 王永强,张继春. 基于相似试验的尾矿库溃坝泥石流预测分析[J]. 中国安全科学学报, 2012,22(12): 70-75.
- WANG Yongqiang, ZHANG Jichun. Tailings dam-break debris flow prediction analysis based on similar tests[J]. China Safety Science Journal, 2012,22(12): 70-75.
- [37] 邓静,盛建龙,黎矩宏. 基于GM(1,1)模型的尾矿坝坝体垂直位移预测[J]. 安全与环境工程, 2013,20(1): 143-146.
- DENG Jing, SHENG Jianlong, LI Juhong. Vertical displacement prediction of tailings dam based on GM(1,1)[J]. Safety and Environmental Engineering, 2013,20(1): 143-146.
- [38] 聂志丹,刘剑,陈平,等. 尾矿库溃坝环境风险预测方法实例研究[J]. 环境科学与技术, 2014,37(120): 550-554.
- NIE Zhidan, LIU Jian, CHEN Ping, et al. A case study on environmental risk assessment method of mine tailings collapse[J]. Environmental Science & Technology, 2014,37(120):550-554.
- [39] 聂娜娜,王英博,王铭泽. FOA 优化 GRNN 网络的尾矿库安全预测[J]. 中国安全生产科学技术, 2014,10(8): 39-43.
- NIE Nana, WANG Yingbo, WANG Mingze. Safety prediction of mine tailing reservoir based on FOA-GRNN algorithm[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014,10(8): 39-43.
- [40] 梁彤彤. 尾矿库内水位对尾矿坝稳定性影响分析及其预警研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2010.
- LIANG Xingxing. Research on analysis and pre-warning for the influence of water level on the stability of tailings dam [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010.
- [41] 雷丁丁,李龙福,许乔峰. 尾矿坝浸润线预警研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2014,66(4): 79-82.
- LEI Dingding, LI Longfu, XU Qiaofeng. Study on early warning of tailings dam saturation line[J]. Non-ferrous Metals(Mining Section), 2014,66(4): 79-82.
- [42] 史松海. 尾矿坝汛期坝体浸润线监测预警值研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2013, 65(6):66-70.
- SHI Songmei. Research on early-warning value of saturation line monitoring for tailings dam in flood season [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2013, 65(6):66-70.
- [43] 李航. 尾矿库坝体稳定性及其灾变预警机制研究[D]. 大连:大连交通大学, 2011.
- LI Hang. Study on the stability of tailing dam and disaster early-warning mechanism [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2011.
- [44] 胡珊,胡军. 基于灰系统的尾矿坝浸润线预警系统[J]. 计算机工程与设计, 2011,32(6):2197-2200.
- HU Shan, HU Jun. Tailings dam saturation line early alarming system based on grey system[J]. Computer Engineering and Design, 2011,32(6):2197-2200.
- [45] 林雪松,陈殿强,何峰. 尾矿坝浸润线干滩监测预警值的计算[J]. 水资源与水工程学报, 2014,25(4):65-68.
- LIN Xuesong, CHEN Dianqiang, HE Feng. Calculation of monitoring warning value of tailing dam's seepage line and dry beach[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2014, 25(4):65-68.
- [46] 宋传旺,于广明,李亮. 基于R/S分析法的尾矿坝坝体位移趋势研究[J]. 矿业研究与开发, 2014,34(6): 41-43.
- SONG Chuanwang, YU Guangming, LI Liang. Study on displacement tendency of tailings dam based on R/S analysis method[J]. Mining R & D, 2014, 34(6): 41-43.
- [47] 黄磊,苗放,王梦雪. 区域尾矿库安全监测预警系统设计与构建[J]. 中国安全科学学报, 2013,23(12): 146-150.
- HUANG Lei, MIAO Fang, WANG Mengxue. Design-

- ning and setting up a monitoring and early warning system for tailings ponds in a region[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(12):146-150.
- [48] 肖圣博. 尾矿库在线安全监测技术及其预警方法研究[D]. 长春:吉林大学, 2013.
- XIAO Shengbo. Tailings dam online safety monitoring technology and study on its early warning method[D]. Chuanchun: Jilin University, 2013.
- [49] 杨波. 尾矿库在线安全监测及预警关键技术研究[D]. 武汉:中国地质大学, 2010.
- YANG Bo. Research on the key technologies of tailings pond online safety monitoring and pre-warning[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2010.
- [50] 廖文景, 皇甫凯龙, 何易, 等. 尾矿库实时监控与安全分析及预警耦合系统[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(8):158-160.
- LIAO Wenjing, HUANG Pu Kailong, HE Yi, et al. Integrated real-time monitoring, analyzing and analyzing pre-warning system for tailings reservoir[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(8):158-160.
- [51] 吴宗之, 梅国栋. 尾矿库溃坝预警体系及预警方法研究[J]. 金属矿山, 2014(12): 198-202.
- WU Zongzhi, MEI Guodong. Study on early-warning system and method for tailings dam failure[J]. Metal Mine, 2014(12): 198-202.
- [52] 梅国栋. 尾矿库溃坝机理及在线监测预警方法研究[D]. 北京:北京科技大学, 2014.
- MEI Guodong. Research on mechanism and online early-warning method for tailings dam failure[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2014.
- [53] 谢旭阳, 王云海, 张兴凯, 等. 尾矿库区域预警指标体系的建立[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(5): 167-170.
- XIE Xuyang, WANG Yunhai, ZHANG Xingkai, et al. Establishment of regional pre-warning index system for tailing reservoirs[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(5): 167-170.
- [54] 郑立安. 基于 ZigBee 技术的尾矿坝体安全监测预警系统研究与设计[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.
- ZHENG Lian. Design of tailings dam body security monitoring and early warning systems based on ZigBee technology[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011.
- [55] 刘正强, 罗文斌. 安全在线监测预警系统在金山店铁矿锡冶山尾矿库的应用[J]. 金属材料与冶金工程, 2014, 42(1): 49-55.
- LIU Zhengqiang, LUO Wenbin. Application of safety online monitoring and early warning system in Xiyeshan tailings dam of Jinshandian iron mine[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2014, 42(1): 49-55.

(编辑 沈 波)

(上接第 874 页)

- [8] 张瑞海. 海南岛传统聚落水环境的生态营造研究[D]. 海口:海南大学, 2017.
- ZHANG Ruihai. Ecological construction of traditional settlement water environment in hainan island[D]. Haikou: Hainan University, 2017.
- [9] 谢丹. 琼北乡村聚落空间形态解析[D]. 海口:海南大学, 2015.
- XIE Dan. Study on spatial morphology of rural settlement in northern hainan[D]. Haikou: Hainan University, 2015.
- [10] 彭一刚. 传统村镇聚落景观分析[M]. 中国建筑工业出版社, 1994.
- PENG Yigang. Analysis on the landscape of traditional villages and towns[M]. China Architecture & Building Press, 1994.
- [11] 王昀. 传统聚落结构中的空间概念[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.
- WANG Yun. The concept of space in traditional settlement structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [12] 沈尧. 以图论为背景的传统民居聚落外部空间量化分析的应用探析[J]. 小城镇建设, 2011, 12:73-77.
- SHEN Yao. Application of quantitative analysis of external space in traditional residential settlement based on graph theory[J]. Development of Small Cities & Towns, 2011, 12:73-77.
- [13] 文运, 赵书彬, 张娟. 乡村旅游发展下海口乡村聚落景观的变化——以美社村为例[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2014, 32(2): 171-176.
- WEN Yun, ZHAO Shubin, ZHANG Juan. Changes of rural landscape under rural tourism development——Take meishe village as an example[J]. Natural Science Journal of Hainan University, 2014, 32(2): 171-176.

(编辑 吴海西)