

doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2023.01.016

我国尾矿库安全监测技术发展综述

沈楼燕¹, 李连通¹, 张超², 罗嗣海³,

(1. 中国瑞林工程技术股份有限公司, 南昌 330031;

2. 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, 武汉 430071;

3. 南昌航空大学, 南昌 330063)

摘要:我国尾矿库数量、尾矿库灾害事故发生频次均居世界前列。尾矿库安全监测技术能及时测量并提供反映尾矿库安全运行状况的第一手信息和数据,能管控尾矿库当前运行状况,评估预测未来风险发展,从而科学地指导尾矿库生产运行,预防和减少发生事故灾害和环境污染。随着我国对尾矿库安全的日益重视,尾矿库安全监测的重要性日益提升,尾矿库安全监测技术也随之迅速发展。我国尾矿库安全监测技术发展经历了初级阶段、中级阶段和高级阶段,而尾矿库安全监测技术标准也相应逐步发展和完善,从最初的标准缺失到标准体系逐步构建,对标准的推广使用也从机械照搬、教条主义发展到因地制宜、理论联系实际;从人工监测、自动化监测逐步发展智能监测,监测效率和监测精度日益提升;监测设备也随着社会和经济的发展而日新月异,新的科技成果不断纳入。目前,我国尾矿库安全监测技术已进入一个良好的发展时期,在全国范围内构建了一个强大的国家级尾矿库安全生产在线监测监控与预警大平台,为尾矿库灾害及时诊断和安全预警提供强大技术支撑,最大限度地消除尾矿库灾害事故的发生。

关键词:尾矿库;安全监测;技术发展;在线监测;安全预警

中图分类号:TD926.4

文献标志码:A

文章编号:2095-1744(2023)01-0121-06

Review on the Development of Safety Monitoring Technology for Tailings Pond in China

SHEN Louyan¹, LI Liantong¹, ZHANG Chao², LUO Sihai³

(1. China Nerin Engineering Co., Ltd., Nanchang 330031, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

3. Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: The number of tailings pond and frequency of disaster accidents of tailings ponds in China are ranked among the top in the world. The safety monitoring technology of tailings pond can be used to provide first-hand information and data reflecting the safety status of tailings pond in time, which can control the current operation of tailings pond, assess and predict the future risk development, guide the production operation of tailings pond in a scientific way, and prevent and reduce accidents, disasters and environmental pollution. With the increasing attention to the safety of tailings pond in China, the importance of safety monitoring of tailings pond is increasing, subsequently, the safety monitoring technology of tailings pond is also developing rapidly. The development of safety monitoring technology of tailings pond in China has gone through three stages: initial stage, middle stage and advanced stage. The standards on safety monitoring technology of tailings pond have also been gradually developed

收稿日期:2022-06-20

作者简介:沈楼燕(1970—),女,研究员,博士后,主要从事尾矿工程和尾矿资源综合利用科研及工程应用。

引用格式:沈楼燕,李连通,张超.我国尾矿库安全监测技术发展综述[J].有色金属工程,2023,13(1):121-126.

SHEN Louyan, LI Liantong, ZHANG Chao. Review on the Development of Safety Monitoring Technology for Tailings Pond in China[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(1): 121-126.

and improved, the technology is developed from the initial lack of standards to the gradual construction of the standard system. The promotion and application of standards have also developed from mechanical copying and dogmatism to adapting to local conditions and integrating theory with practice. The monitoring has been gradually developed from manual monitoring and automatic monitoring to intelligent monitoring, accordingly improving the monitoring efficiency and accuracy. The monitoring equipment is also changing with the development of society and economy, moreover, new scientific and technological achievements are also constantly incorporated. At present, China's safety monitoring technology of tailings pond has entered a good development period. A powerful national-level online monitoring and early warning platform for safety production of tailings pond has been built nationwide, providing strong technical support for the timely diagnosis and safety early warning of tailings pond disasters, and eliminating the occurrence of tailings pond disasters and accidents to the maximum.

Key words: tailings pond; safety monitoring; technology development; on-line monitoring; early warning of safety

中国是世界上尾矿库数量最多、灾害事故发生率最高的国家之一^[1]。近年来我国发生了多起尾矿库安全事故,造成社会和环境恶劣影响的主要有广西南丹、广东信宜、山西襄汾、辽宁海城等恶性尾矿库溃坝事故^[2],这些溃坝事故带给了人们关于尾矿库安全问题的警示。有文献统计分析显示,尾矿库灾害仅次于核武器爆炸、地震、霍乱、洪水等,排列在全球重大灾害种类的第18位^[3]。尾矿库事故对下游地区人民生产和财产造成的破坏力是惊人的,包括直接和间接造成严重的生态环境污染问题^[4]。我国应急管理部门多年来一直把四等及四等以上的尾矿库列为应急管理工作中的“重大危险源”^[5]。由此可见,本着预防为主、防患于未然的安全生产管控原则,加强尾矿库安全监测工作特别是大力发展尾矿库安全监测技术是我国尾矿库应急管理工作的重中之重。尾矿库安全监测既是矿山企业构建尾矿库安全预警体系的重点内容,又是政府安全生产职能管理部门重点监管的内容之一^[6]。随着我国对尾矿库安全的日益重视,尾矿库安全监测的重要性日益提升,尾矿库安全监测技术也随之迅速发展。

1 尾矿库安全监测技术发展的初级阶段

建国之后至20世纪90年代初期,整整40多年期间,我国一直缺乏适用于尾矿库的国家技术标准和行业技术标准。1949年至1979年期间,技术力量强的冶金甲级大设计院各自编撰并油印尾矿库设计手册,主要供内部使用。技术力量弱的设计院就参考这些大设计院主编的尾矿库设计手册,这个阶段的尾矿库安全监测技术工作主要参照水利行业土石坝安全监测的做法,并没有依据尾矿库自身的工程特点来制定相应的安全监测技术要求。但是尾矿库与水利行业土石坝并不完全相同,首先尾矿库内

的尾矿粒径与选矿厂磨矿工艺密切相关,大部分尾矿颗粒偏细,尾矿堆积坝高会随着时间推移而不断变化,尾矿坝与水库的土石坝结构相比存在较大的不同^[7],同时尾矿库排洪系统工作特点与水库的排洪系统也存在很大的不同,因此,两者的安全监测系统存在较大的差别。

1980年4月,冶金工业出版社出版了《尾矿设施设计参考资料》(业内俗称“蓝皮书”),该书的面世对我国尾矿库工程设计和尾矿库安全监测方案设计起到相对权威的指导作用,书中第十一章第二节提出要对尾矿坝和排水管等主要构筑物进行系统而经常的观测,观测内容主要有尾矿坝变形、固结、孔隙水压力、浸润线、渗透流量和排水管的土压力等,并详细阐述了观测的目的、设备、布置和周期等。但该书也指出当时的尾矿库观测方法不成体系、观测经验不够成熟,主要参考水库观测方法和经验,在设计实践中应结合尾矿库具体情况因地制宜^[8]。该书对于尾矿库安全监测的描述内容存在如下局限性:1)观测研究对象仅限于土坝和排水管,实践中还包括碾压堆石坝、碾压土石混合坝、浆砌石坝等多种尾矿坝坝型;除了排水管,排洪构筑物还包括排水斜槽、排水井、排洪隧洞、溢洪道、截洪沟等,观测范围过于狭窄。2)对于安全性极其重要的尾矿水力冲填堆积坝的安全监测技术未作明确要求,该书仅在第十一章第一节中选录了云锡公司尾矿设施维护管理办法(草案)供参考,该管理办法仅关注尾矿坝的坝体变形观测、浸润线观测数据的收集整理及抄告,事实上,尾矿堆积坝面的干滩长度、尾矿堆积坝坝顶安全超高、库区水位等观测数据对于分析判别尾矿堆积坝的安全稳定性都至关重要,应制定严格而全面的安全监测及预警报告制度,而不是可有可无。

1984年5月19日,原国家水利电力部发布的《碾压式土石坝设计规范》(SDJ 218—1984)对土石

坝坝型的尾矿坝安全监测起到了一定的指南作用。

由于初期阶段尾矿库安全监测内容主要为由坝体位移、孔隙水压力、浸润线和排水管的土压力,因此,这个阶段的尾矿库安全监测手段都是人工埋设观测点、人工间隔一段周期进行观测、人工读取和整理观测成果,具体的监测手段为:1)坝体位移变化通过经纬仪测量目标角度变化、通过水准仪测量标高度差变化、通过测沉器/棒测量坝体沉降高度变化;2)孔隙水压力变化采用测压管式孔隙水压力计或压力水管式孔隙水压力计测量;3)浸润线高低通过测压管直接观测;4)排水管的土压力值采用土压计测量。此阶段监测手段过于单一,监测设备的精度及测量过程过于繁琐,且测量数据会产生一定误差。对于经纬仪、水准仪等精密仪器的使用需要专业人员,还需多人员协调参与。因此,初级阶段尾矿库安全监测作业效率低下,每个周期测量的数据间隔时间过大,数据失去连续性,对坝体安全分析失去一定意义。

2 尾矿库安全监测技术发展的中级阶段

1990—2009年,国家陆续出台了一些与尾矿库安全监测相关或者可供借鉴的标准和法规,尾矿库安全监测标准和法规体系初见雏形,使得尾矿库安全监测工作基本步入了规范发展的轨道,主要有:

1990年12月30日,原国家建设部发文,将《选矿厂尾矿设施设计规范》(ZBJ 1—1990)批准为行业标准,这是我国有色金属行业第一部关于尾矿设施工程设计的行业标准,具有里程碑式的意义,适用于金属非金属矿山尾矿设施,铝厂赤泥库和电厂灰渣库可参照执行。这部设计规范中第3.5.9条明确规定:“4级及4级以上的尾矿坝,应设置坝体位移和坝体浸润线的观测设施。必要时还宜设置孔隙水压力、渗透水量及其浑浊度的观测设施”。

1995年11月2日,原中国有色金属工业总公司发布的《尾矿设施施工及验收规程》(YS5 418—1995)是强制性行业标准,该规范第2.7章节“观测设备设置”要求:“尾矿库观测设备的设置应纳入施工计划,适时进行”。同时对观测标点的埋设、测压管等观测设备的敷设、观测设备的保护、所有观测设备的详细空间位置和安装的记录、施工期观测记录及其资料整理等,都有详细的要求。这是国内第一部涉及尾矿库安全监测设备的施工及验收方面的行业规范。

1996年11月20日,原中国有色金属工业总公司发布了行业标准《岩土工程监测规范》(YS 5229—1996),该规范旨在“统一岩土工程监测中的技术要求”,“适用与建筑物……、尾矿坝和中小型水库坝体等工程施工和运营阶段的检测”。该规范重点阐述位移和变形、土压力和孔隙水压力的监测技术要求。

2000年11月6日,原国家经济贸易委员会颁布的《尾矿库安全管理规定》和原国家安全生产监督管理局2005年12月7日发布的《尾矿库安全技术规程》(AQ 2006—2005),都分别从尾矿库生产运行、防洪安全检查、尾矿坝安全检查、尾矿库库区安全检查等方面阐述了对尾矿库安全监测的具体要求,其中防洪安全监测要素包括库内水位、干滩长度、干滩坡度、滩顶高程、尾矿坝安全超高等;排洪构筑物安全监测要素包括排水井、排水斜槽、排水涵管、排水隧洞、溢洪道、截洪沟等;尾矿坝安全监测要素包括尾矿坝的位移及变形、坝体纵横向裂缝、坝前水位、尾矿坝浸润线、初期坝和堆积坝的坝坡、坝体是否有滑坡、坝体浸润线溢出点位置和溢出范围及形态、坝体排渗设施、坝体渗透量、坝面保护措施(坝肩截水沟和坝面排水沟)等;尾矿库库区监测要素包括周边山体稳定性,库区是否有违章建筑、违章施工和违章采选作业等情况,是否有违章爆破、采石和建筑,违章进行尾矿回采、取水,是否有外来尾矿、废石、废水和废弃物排入,放牧和开垦等。这两份技术标准极大地拓展和丰富了尾矿库安全监测的内容,不再局限于监测尾矿坝体和排洪构筑物,而是把整个尾矿库库区当做一个系统工程来进行安全监测,这样更加全面和科学。

这个时期,除了有色金属行业,其他行业也纷纷出台了相关的监测规程规范,可供尾矿库安全监测工作借鉴使用,例如国家水利部、电力工业部发布的水利行业标准《土石坝安全监测技术规范》(SL 60—1994)和《降水量观测规范》(SL 21—2006)。需要特别提出的是,《土石坝安全监测技术规范》(SL 60—1994)虽然是水利行业标准,但它第一次在其“条文说明”里明确提出水力冲填坝、尾矿坝属于土石坝类型。该规范除了关注传统的坝体变形监测、渗流监测和压应力监测,专门增补了一个章节细致阐述了“水文、气象监测”,主要观测内容有波浪监测、坝前(及库区)泥沙监测、冰冻监测(包括冻结深度、冰盖位移、静冰压力和冻冰压力)等。

原国家经济贸易委员会2001年2月12日发布的电力行业标准《碾压式土石坝施工规范》

(DL/T 5129—2001)、国家水利部 2002 年 1 月 28 日发布的《碾压式土石坝设计规范》(SL 274—2001)(代替 SDJ 218—1984 和 SDJ 218—1984 修改和补充规定)、国家发展和改革委员会 2007 年 12 月 3 日发布的电力行业标准《碾压式土石坝设计规范》(DL/T 5395—2007)(代替 SL 274—2001)以及原国家技术监督局 1991 年 5 月 5 日分别发布的《国家一、二等水准测量规范》(GB 12897—1991)和《国家三、四等水准测量规范》(GB 12898—1991);还有原国家建设部和质量监督检验检疫总局 2002 年 1 月 10 日联合发布的《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)和原国家建设部 2007 年 10 月 25 日发布的《工程测量规范》(GB 50026—2007),这些国家/行业技术标准对当时的尾矿库安全监测技术不断完善、持续发展起到了重要作用。

这个时期的尾矿库安全监测技术较之初期阶段取得了一定的进步,主要是监测设备和监测手段的创新,在线监测系统也初步建立了模型,例如监测设备从过去的经纬仪、水准仪等转为更为智能的全站仪,从人工读数水位计升级为示数水位计、自动测报水位计和遥感水位计等;监测手段也尝试从人工全站仪开展位移监测发展为自动全站仪计算机一体化,全站仪能自动瞄准、读数、数据传输至计算机进行处理。相比初级阶段监测内容的不全面、不完善,本阶段加入防洪监测部分使整个监测系统更加科学和全面。防洪监测部分包括库内水位、干滩长度、干滩坡度、滩顶高程、尾矿坝安全超高、降雨量等,库水位监测采用超声波液位计或雷达液位计测量;干滩长度、干滩坡度、滩顶高程、尾矿坝安全超高等监测量采用超声测距传感器结合库水位测量通过数学计算得出;降雨量采用翻斗式雨量计或容栅式雨量计进行测量。此阶段,随着通信行业 and 智能仪表行业的发展,各监测部分通过光纤通信将传感器采集的数据经交换机汇总至计算机进行分析、计算,形成早期的在线监测模式。初期的自动化在线监测模式已经在部分矿山尾矿库安全监测工程中展开实践,因有线通信施工成本高、后期维护困难,尚未成为主流监测模式^[9-11]。

3 尾矿库安全监测技术发展的高级阶段

尾矿库传统人工监测手段由于自身的局限性及受外界多因素制约和影响,不可避免地存在一定的客观和主观误差,并且信息传导不及时,无法满足日

益提升的尾矿库安全生产管控要求,有时甚至会误导和贻误尾矿库的安全生产管理工作。随着我国对尾矿库安全生产的重视日益提升,对尾矿库在线监测技术的需求日益迫切。尾矿库在线监测系统是利用现代电子、信息、通信及计算机技术,实现对尾矿库监测指标数据实时、自动、连续采集、传输、管理及分析的监测技术^[12]。系统建立综合性的监管平台,依托智能的软件系统,当尾矿库监控内容出现异常时,及时预报预警,提醒企业尽快启动相应的处理措施及预案,保障尾矿库的安全运行。

在这样的背景下,2010 年 9 月 6 日,原国家安全生产监督管总局发布了国家安全生产行业标准《尾矿库安全监测技术规范》(AQ 2030—2010)(以下简称“AQ2010”)。该规范明确规定:三等及以上的尾矿库应安装在线监测系统;在线监测系统应具备数据自动采集、传输、存储、处理分析及综合预警等功能,并能确保在线监测不受各种气候条件干扰。同时明确规定了在线监测系统的基本功能和性能要求、系统设计、安装和调试和运行管理等。

该规范还明确了一个概念:安装了在线监测系统的尾矿库,同时还必须设置人工观测设施,以便将人工观测与在线监测的成果互为校验、同步比测。

AQ2010 的发布标志着我国尾矿库在线安全监测工作就此拉开帷幕并且发展迅猛,标志着我国尾矿库安全监测技术进入了高级发展阶段。在各级政府安全生产监管部门的强力推进下,远远突破了 AQ2010 规范的界定,全国大部分省市五等以上的尾矿库全部上马了在线安全监测系统,使得各级政府安全生产监管部门从宏观和微观两个层面掌握了辖区内的尾矿库安全运行状况,有利于加强对各企业尾矿库的监督管理,增强各方对尾矿库灾害的预警及应急能力,避免因尾矿库安全事故造成环境污染,保障尾矿库周边人民群众生命财产安全。但是,在快速推广尾矿库在线安全监测系统的过程中,毕竟是新生事物,在线监测系统的实施细则有待完善,验收的标准也尚未健全,政府管理者和矿山企业的经验均不足,技术中介的水平良莠不齐,使得部分尾矿库在线安全监测系统存在监测方案不合理甚至是错误的,在线监测获取的数据没有代表性,不能真实反映尾矿库的安全状况;有些尾矿库在线监测系统因为传感器等监测设备缺陷或损坏,运行一段时间后即告失效;相当一部分矿山企业,缺乏能对监测数据进行有效分析、发现并指出尾矿库运行问题的管理人员,使得尾矿库在线监测系统形同虚设;最为

重要的是,当时国内对尾矿库在线安全监测项目的预警等级划分、预警等级判定和预警阈值缺乏统一的、科学的规定,使得对尾矿库安全状况的预警判定缺乏依据,难以操作。

基于上述尾矿库在线安全监测工作中的不足和乱象,2015年5月11日,国家住房和城乡建设部、国家质量监督检验检疫总局联合发布了《尾矿库在线安全监测系统工程技术规范》(GB 51108—2015)(以下简称“规范 GB 51108—2015”),该规范旨在“统一尾矿库在线安全监测系统工程技术要求,保证监测质量,做到安全适用、技术先进、经济合理、保护环境、运行可靠”。

该规范第3.1.4条对尾矿库在线监测项目及监测等级的选择依据做了明确规定。第3.4.2条就湿排尾矿库、干式堆存尾矿库、尾矿库的混凝土坝、浆砌石坝及挡水坝的安全监测项目分别做了详细规定。第7.1.2条对尾矿库在线监测系统平台的功能和性能做了明确规定,如必须有效远程控制与管理监测设备,必须具备数据的采集、建库、处理、分析、预警、信息发布、信息输出和人工安全监测接口等功能,还能应对尾矿库扩容增高后的监测工作需要。第8.1.3条将尾矿库安全监测预警从低到高分为“黄色预警、橙色预警、红色预警三个等级”;第8.1.4条强调“尾矿库安全状况预警应由尾矿库安全监测项目的最高预警等级确定”,并对尾矿库安全监测项目的预警等级和预警阈值都做了详细的规定。

2020年10月11日,国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会联合发布了《尾矿库安全规程》(GB 39496—2020),重新对尾矿库在线安全监测预警等级划分和预警等级的判定做出了规定,第5.5.4条将尾矿库安全监测预警由低到高依次“分为蓝色预警、黄色预警、橙色预警、红色预警四个等级”,并对各监测项目、尾矿库安全状况各级预警等级的判定做出了详细的规定,特别指出:“一尾矿库安全状况预警等级应由尾矿库安全监测项目的最高预警等级确定”。

在高级阶段这个时期,随着技术的快速发展,尾矿库安全在线监测系统在技术方面已非常成熟,可完全实现自动化监测,并结合调洪演算模型对尾矿库安全预警有着重要意义。同时此阶段,在规范AQ2010和规范GB 51108—2015的明确要求下,尾矿库在线安全监测项目应根据设计级别、尾矿坝筑坝方式来确定,不同的尾矿库针对自己的实际情况

监测部分也有了更为具体的要求,表面位移监测、内部位移监测、浸润线监测、干滩监测等监测点位的设置的数量、位置等要求都更为详细。安全监测手段在此阶段也有所进步,主要体现在监测方法和系统架构两个方面,1)监测方法:自动化全站仪测量表面位移变为GNSS接受机;内部水平位移可采用固定式测斜仪;干滩长度测量从估算方式转变为AI智能摄像机计算方式等。2)系统架构:从传感器+数据采集基站+服务器的建设模式转变为物联网传感器+云服务+终端模式。新的系统架构从有线通信转变为无线通信,解决了传统模式前期投入高、后期维护困难、资源利用率低等问题。新架构下监测数据查看相比传统模式不再局限唯一的PC机,而是在云服务技术支持下,实现多账号多终端随时随地查看的功能,更方便矿企管理人员对尾矿库安全的高效监管。

随着尾矿库监测技术标准的不断发布和大力推行,促进了监测手段的日益提升,使得我国尾矿库在线安全监测工作日渐规范,在线安全监测工作精准度日益提升,截至2021年,我国在运行的尾矿库全部实现了尾矿库在线安全监测系统并网,构建了一个强大的全国范围内尾矿库安全生产在线监测监控与预警大平台,显著提升了我国尾矿库的安全管理与监控水平。

4 结语

从我国尾矿库安全监测技术发展的历史沿革可以看到,安全监测技术标准的构建和不断完善,才是安全监测技术手段发展的内生动力,更是安全监测实践的科学指南,因此,不断完善和提升尾矿库安全监测技术标准,才能真正实现我国尾矿库安全监测工作的“技术先进、安全适用、经济合理、保护环境”,为尾矿库灾害的及时诊断和安全预警提供强大技术支撑,最大限度地消除尾矿库灾害事故的发生。

参考文献:

- [1] 田文旗,薛剑光.尾矿库安全技术与管理[M].北京:煤炭工业出版社,2006.
TIAN Wenqi, XUE Jianguang. Safety technology and management of tailings pond[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2006.
- [2] 沈楼燕.小型尾矿库安全管理[J].劳动保护,2008(4): 100-101.
SHEN Louyan. On safety management of small-sized pond[J]. Labour Protection, 2008(4): 100-102.

- [3] 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 Hongda. Statistical analysis of tailing reservoir disease accidents in China[J]. Industrial Construction, 2001, 31(1): 69-71.
- [4] 张培安. 浅谈尾矿库的安全技术管理[J]. 有色矿山, 2003, 32(2): 32-35.
ZHANG Peian. Discussion on the safety management of tailing dams[J]. Nonferrous Mines, 2003, 32(2): 32-35.
- [5] 丁军明, 黄德镛, 李雄, 等. 尾矿库危险源辨识及事故预防[J]. 矿业快报, 2006, 25(7): 24-27.
DING Junming, HUANG Deyong, LI Xiong, et al. Identification of hazard sources of tailings dam and precautionary measures for accidents [J]. Express Information of Mining Industry, 2006, 25(7): 24-27.
- [6] 田文旗. 政府和企业对尾矿库安全管理重点[J]. 劳动保护, 2003(9): 20-21.
TIAN Wenqi. Key points of government and enterprises on safety management of tailings pond[J]. Labor Protection, 2003(9): 20-21.
- [7] 张健. 尾矿库安全监测预警系统设计[J]. 安全, 2019, 40(3): 65-67.
ZHANG Jian. Safety monitoring and early warning system of tailings reservoir[J]. Safety, 2019, 40(3): 65-67.
- [8] 《尾矿设施设计参考资料》编写组. 尾矿设施设计参考资料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1980.
Authoring Team of References on Design of Tailings Facilities. References on design of tailings facilities[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1980.
- [9] 王久平. 尾矿库安全监测系统研究与实现[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013.
WANG Jiuping. Research and implementation of tailings dam safety monitoring[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2013.
- [10] 胡军. 自动化安全监测系统在尾矿坝中的应用[J]. 工业安全与环保, 2010, 36(11): 43-45.
HU Jun. Application of automatic safety monitoring system in the tailings dam[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2010, 36(11): 43-45.
- [11] 刘高峰. 尖山铁矿尾矿库安全自动监测系统设计[J]. 现代矿业, 2009, 25(8): 118-120.
LIU Gaofeng. Design of automatic safety monitoring system of tailings pond in Jianshan iron mine[J]. Modern Mining, 2009, 25(8): 118-120.
- [12] 余万一, 张达, 冀虎. 基于 SaaS 的尾矿库安全在线监测系统的设计及应用[J]. 有色金属(矿山部分), 2020, 72(6): 101-106.
YU Wanyi, ZHANG Da, JI Hu. Design and application of safety online monitoring system for tailings pond based on SaaS [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2020, 72(6): 101-106.

(编辑 郭文晶)