◆产业赋能与业态融合◆

磷石膏库安全在线监测系统的设计与实际应用

王海羽

（云天化集团有限责任公司，云南 昆明 650228）

［摘 要］磷石膏库安全问题一直是磷化工企业及应急管理部门关注的重点。随着磷石膏堆存量不断增加，磷石膏库安全管理面临严峻挑战，以传统方式开展的安全管理工作无法充分防范化解安全风险。介绍大箐磷石膏库安全在线监测系统的设计情况，包括系统构架、监测项目布设、精度指标、预警分析及预警处置，以及其实际应用情况。

［关键词］磷石膏库；安全管理；在线监测系统；设计；应用
［中图分类号］X936 ［文献标志码］B ［文章编号］2097-4566（2024）06-0077-04

Design and practical application of online safety monitoring system for phosphogypsum stack

WANG Haiyu
（*Yuntianhua Group Co., Ltd., Kunming* 650228, *China*）

Abstract: The safety issues of phosphogypsum stack have always been a focus of attention for phosphorus chemical enterprises and ministry of emergency managements. With the continuous increase of storage capacity, the safety management of phosphogypsum stack faces severe challenges, traditional safety management work can't fully prevent and resolve safety risks. The design of the online safety monitoring system for the Daqing phosphogypsum stack is introduced, including system architecture, monitoring project deployment, accuracy indicators, early warning analysis and disposal, and the practical application status is introduced.

Key words: phosphogypsum stack; safety management; online safety monitoring system; design; application

0 引言

磷石膏是指以磷矿石为原料，采用湿法制取磷酸过程中产生的，以硫酸钙为主要成分的化工副产物。每生产P_2O_5 1 t产生磷石膏4.55～5.00 t[1]。目前，全球每年产生磷石膏近3亿t，我国每年产生约0.8亿t[2]，大部分采取堆存方式储存于磷石膏库中。

近年来，国家对磷石膏库安全管理工作日益加强，发布、更新了《尾矿库安全监督管理规定》（国家安全生产监督管理总局令第38号）、《磷石膏库安全技术规程》（AQ 2059—2016）[3]、《尾矿库安全规程》（GB 39496—2020）[4]、《尾矿库在线安全监测系统工程技术规范》（GB 51108—2015）[5]等有关安全管理的法规及规范要求，针对目前磷石膏库在线监测系统存在的监测内容不全、运行不稳定、仅有数值显示而无实际预警功能等弊端，要求磷化工企业建设完整、可靠的磷石膏库在线监测系统，为磷石膏库安全运行创造条件。以下介绍大箐磷石膏库安全在线监测系统的设计及实际应用情况，以期为行业提供参考。

1 大箐磷石膏库现场概况

大箐磷石膏库属于山谷型堆场，采用上游式筑坝法。初始坝主体为土坝，坝高30 m，全长约385 m，坝顶宽度5 m，总库容约4 930.25万m^3，有效库容约4 190.71万m^3。设计有23级堆积坝，总坝高145 m。

2 在线监测系统设计

2.1 在线监测系统架构

根据安全监测规范要求和实际需要，大箐磷石膏库在线监测系统包括表面位移、内部位移、浸润线、水位、降雨量和视频图像等数据采集传输系统，数据分析处理系统，数据发布系统及风险预警系统。磷石膏库在线监测系统架构如图1所示。

（1）数据采集系统：通过观测棱镜-测量机器人、分层沉降仪、渗压计、雷达水位计、雨量计、流量计、摄像头等数据采集设备，实现各监测数据采集功能，通过有线、无线的数据传输方式，实现

［收稿日期］2023-11-06
［作者简介］王海羽（1986-），男，云南玉溪人，注册安全工程师，长期从事企业安全环保管理工作。E-mail:49476949@qq.com

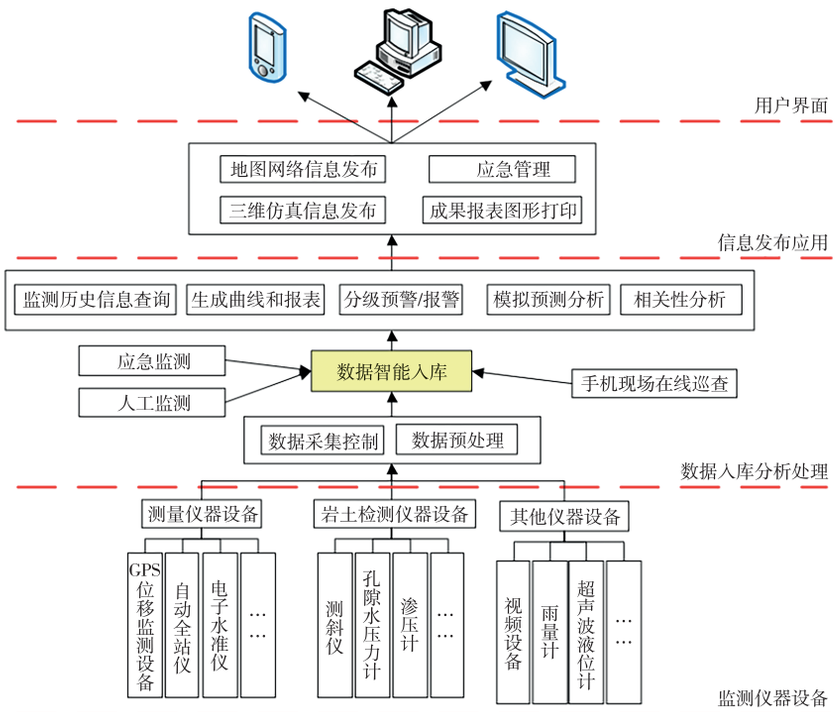

图 1　磷石膏库在线监测系统架构

数据转发与传输，数据传输至监控中心计算机，实现数据的接收、存储。

（2）数据分析处理系统及风险预警系统：系统利用专业软件对接收到的各监测数据进行处理、分析，自动绘制为曲线图，并进行相关过程曲线分析，同时，各项数据自动与预设的安全阈值进行比较，及时发现异常情况。

（3）数据发布系统：经系统分析、比对、确认后的预警信息在监控中心计算机的在线监测系统界面进行提醒，并在中控室内发出声光报警，同时从预警模块获取异常信息，通过自有的短信平台将报警信息推送给预先录入的安全管理人员。

2.2　各监测项目布设

（1）坝体表面位移监测：坝体表面监测横剖面选在最大坝高、有排水管通过、地质条件变化较大的地段及尾矿库运行有异常反应处[6]，每 30 ~ 60 m 高度差布设 1 条监测纵剖面，在水工坝、初期坝和子坝上布设共计 28 个表面位移观测棱镜，采用自动测量机器人自动采集表面位移数据，实施坝体表面位移在线监测，数据采集频次为 5 次/d。水平位移监测精度 1 ~ 3 mm；沉降位移监测精度 2 ~ 3 mm。

（2）坝体内部位移监测：在水工坝和初期坝各选取一个断面，共布设 4 孔、12 个监测点位。采用土体测斜方法监测水平位移，采用分层沉降仪监测沉降位移，实施坝体内部位移在线监测，数据采集频次为每 20 min 1 次。水平位移测量精度为 0.2 mm，竖向位移测量精度优于最大测量值的 0.5%，分辨率为最大测量值的 0.2%。

（3）浸润线监测：在水工坝、初期坝和子坝，监测孔间距 20 ~ 40 m 处，各选取一个断面，分别设置 3 个断面，共计布设 23 个浸润线观测孔，每个孔内安装 1 套智能型渗压计，实施浸润线在线监测，数据采集频次为每 20 min 1 次。

（4）库水位监测：在回水库、回水竖井共计布设 2 个脉冲型雷达水位计，实施库水位在线监测，数据采集频次为每 20 min 1 次，测量误差小于 8 mm。

（5）降雨量监测：在水工坝布设 1 个虹吸式雨量计，实施降雨量在线监测，数据采集频次每 20 min 1 次，测量误差小于 0.1 mm。

（6）渗流量监测：在初期坝脚布设 1 个电磁流量计，实施渗流量在线监测，数据采集频次为每 20 min 1 次。

（7）干滩监测：在子坝侧山体布设 1 套视频监测，结合图像分析软件，实施干滩监测，数据采集频次为 1 次/d。

（8）视频监控：在回水库、堆积区、服务区、

回水泵房等位置共计布设 15 台高清摄像机，实现磷石膏堆场的干滩观测及库区实时视频监控。

2.3　预警分析

当在线监测系统采集到异常变化，监测数据经分析判断无误后，能够自动进行预警等级的判别，并根据预警级别以短信形式推送至预设的管理人员。对于日常巡查信息、人工上传监测信息、人工输入预警信息，系统也能够自动实现相应级别的预警。

安全监测预警由低级到高级分为蓝色预警、黄色预警、橙色预警、红色预警 4 个等级，由设计单位给出各监测项目各级预警阈值确定。各监测项目及尾矿库安全状况各级预警等级的判定符合下列规定：当同类监测项目的监测点达到 4 个蓝色预警时，该项目为黄色预警；达到 3 个黄色预警时，该项目为橙色预警；达到 2 个橙色预警时，该项目为红色预警；当监测项目达到 4 个蓝色预警时，计为 1 项监测项目黄色预警；达到 3 项黄色预警时，计为 1 项监测项目橙色预警；当监测项目达到 2 项橙色预警时，计为 1 项监测项目红色预警；安全状况预警由安全监测项目的最高预警等级确定。

各监测点预警阈值及预警规则如表 1 所示。

表 1　各监测点预警阈值及预警规则

监测对象	预警阈值及预警规则	预警等级
表面位移、内部位移监测点	水平方向上连续 5 d 平均位移速率超过 1.8 mm/d 且位移方向基本一致；5 d 累计位移超过 12.0 mm，期间平均位移速率超过 1.5 mm/d 且方向一致并未见收敛。垂直方向上按水平方向的 2 倍值控制	蓝色预警
	水平方向上连续 5 d 平均位移速率超过 2.0 mm/d 且位移方向基本一致；5 d 累计位移超过 16.0 mm，期间平均位移速率超过 1.8 mm/d 且方向一致并未见收敛。垂直方向上按水平方向的 2 倍值控制	黄色预警
	水平方向上连续 5 d 平均位移速率超过 3.0 mm/d 且位移方向基本一致；5 d 累计位移超过 20.0 mm，期间平均位移速率超过 2.0 mm/d 且方向一致并未见收敛。垂直方向上按水平方向的 2 倍值控制	橙色预警
	水平方向上连续 5 d 平均位移速率超过 4.5 mm/d 且位移方向基本一致；5 d 累计位移超过 30.0 mm，期间平均位移速率超过 3.0 mm/d 且方向一致并未见收敛。垂直方向上按水平方向的 2 倍值控制	红色预警
浸润线监测点	取红色预警值的 1.3 倍（以标高为 1 965 m 的 SJ01–01 点位为例，为 14.01 m）	蓝色预警
	取红色预警值的 1.2 倍（以 SJ01–01 点位为例，为 12.94 m）	黄色预警
	取红色预警值的 1.1 倍（以 SJ01–01 点位为例，为 11.86 m）	橙色预警
	监测值≤节点流量平衡法迭代计算值（以水位至孔口绝对高度计，以 SJ01–01 点位为例，为 10.78 m）	红色预警
库水位监测点	监测值≥1 966 m（以高程计，回水库点位）	蓝色预警
	监测值≥1 968 m（以高程计，回水库点位）	黄色预警
	监测值≥1 970 m（以高程计，回水库点位）	橙色预警
	监测值≥1 972 m（以高程计，回水库点位）	红色预警
降雨量监测点	12 h 内降雨量≥50 mm，或者已达 50 mm 以上且降雨可能持续	蓝色预警
	6 h 内降雨量≥50 mm，或者已达 50 mm 以上且降雨可能持续	黄色预警
	3 h 内降雨量≥50 mm，或者已达 50 mm 以上且降雨可能持续	橙色预警
	3 h 内降雨量≥100 mm，或者已达 100 mm 以上且降雨可能持续	红色预警
干滩长度监测点	干滩长度监测值≤150 m	蓝色预警
	干滩长度监测值≤100 m	黄色预警
	干滩长度监测值≤85 m	橙色预警
	干滩长度监测值≤70 m	红色预警

2.4　预警处置

主管人员接收到在线监测系统预警信息推送后，应立即安排测量人员现场核验，核验预警属实后，组织安全、生产、地质、工程、测量等人员对预警信息进行分析，判定危险程度，采取警戒、人员撤离、暂停生产、增加竖井进水量、加大生产回用水量、工程抢险等一种或多种措施，并在在线监测系统中闭环处理预警信息。

3　在线监测系统实际应用

于 2023 年 8 月 1—31 日，对在线监测系统数据进行统计。

（1）表面位移数据分析：通过对水工坝 01 断面 3 个表面位移监测点某一时段数据进行统计分析，X、Y、Z 轴方向连续 5 d 平均位移速率未超过 1.8 mm/d，5 d 累计位移未超过 12.0 mm，平均位移速率未超过 1.5 mm/d。未达到表 1 中的预警阈值。

（2）内部位移数据分析：通过对水工坝 01 号内部位移监测点的某一时段数据进行统计分析，Y、Z 方向连续 5 d 平均位移速率未超过 1.8 mm/d，5 d 累计位移未超过 12.0 mm，平均位移速率未超过 1.5 mm/d，未达到表 1 中的预警阈值。

（3）浸润线数据分析：通过对水工坝 01 断面

3 个浸润线监测点统计分析，其浸润线高度分别为 17.78、24.37、13.81 m，未达到预警阈值。

（4）回水库水位数据分析：回水库水位监测点水位大于 1 963 m，小于 1 966 m，未达到表 1 中的预警阈值。

（5）降雨量数据分析：降雨量监测点日降雨量均 < 45 mm，未达到表 1 中的预警阈值。

（6）干滩长度监测数据分析：8 月，干滩长度监测点每日干滩长度均大于 300 m，未达到表 1 中的预警阈值。

通过对 15 个视频监测点进行查看，大箐磷石膏库坝体未见明显裂缝、塌陷、变形、涌水、冲刷等异常现象，堆积区滩面平整、放浆均匀，无磷石膏以外的介质入库，回水泵房运行平稳，截排洪系统运行正常，周边山体无滑坡、塌方、泥石流等情况，库区周边无爆破、采石、挖土等影响库区稳定的活动。

4　结论

（1）大箐磷石膏库安全在线监测系统可满足《磷石膏库安全技术规程》《尾矿库在线安全监测系统工程技术规范》等相关国家法律法规及标准规范要求，可实现磷石膏库位移、浸润线、库区水位、降雨量等关键数据的在线实时监测及预警，且采用了大量高精度的测量设备及更先进的运算方法，表面位移、内部位移、渗流量、库水位、降雨量等监测点精度均高于国家标准要求。

（2）大箐磷石膏库各在线安全参数运行稳定，证实磷石膏堆场各项安全参数都处于可控状态，磷石膏库安全稳定。

（3）通过建设和使用安全在线监测系统，可大大提升各级管理人员获取磷石膏库相关信息的效率和准确性，从而降低运营成本、优化资源配置、提升团队协作水平并降低沟通成本。

［参考文献］

［1］ 唐英年，杨玉凤，李殿琴.国内外磷石膏的开发与利用［J］.辽宁建材，1995(4)：28–30.

［2］ 邓华，侯硕旻，李中军，等.磷石膏综合利用现状及展望［J］.无机盐工业，2024，56(1)：1–8.

［3］ 国家安全生产监督管理总局.磷石膏库安全技术规程：AQ 2059—2016［S］.北京：煤炭工业出版社，2017.

［4］ 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会.尾矿库安全规程：GB 39496—2020［S］.北京：中国标准出版社，2020.

［5］ 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.尾矿库在线安全监测系统工程技术规范：GB 51108—2015［S］.北京：中国计划出版社，2016.

［6］ 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.

（上接第 52 页）

在硅产业链方面，通过将低附加值的含硅物料，生产具有高附加值的轮胎级白炭黑、电子级四氟化硅、高纯硅烷、高纯硅、硅碳负极等产品，并通过先进技术引领行业健康环保发展，实现绿色可持续发展。

在磷产业链方面，通过黄磷得到的三氯化磷、五氧化二磷、多聚磷酸，是电池材料六氟磷酸锂、六氟磷酸钠、二氟磷酸锂的主要原料；而磷酸、磷酸一铵是磷酸铁锂的主要原料。磷化工企业依托丰富的磷矿资源和副产氟资源，与氟化工企业在高值氟产品生产技术方面紧密协同合作，打通磷、氟系新能源材料产业链，降本增效，助力磷氟企业实现延链强链补链。

此外，通过磷氟企业协作，加速解决磷企业缺少氟生产技术、市场等关键问题，并集聚双方人才力量，融合协作，助推磷企业攻关解决氟回收率低、大量磷石膏处理利用成本高等行业卡脖子问题。

总之，在“双碳”背景下，磷氟协同发展涉及国家粮食安全、产业链附加值的递增和行业健康可持续发展。我国以绿色发展为导向，通过氟化工、磷化工在资源链上的首尾贯通，着力加强关键核心技术攻关，协同创新，补强产业链，提高资源和能源利用效率，进而实现产业链、供应链、价值链的延伸和提升。

［参考文献］

［1］ WILL R K. The benefits of isolating & utilizing fluorine from phosphate operations ［J］. Procedia Engineering，2016，138：267–272.

［2］ 刘帅杰.磷、氟化工产业的协同发展研究［J］.现代化工，2024，44(3)：1–4.

［3］ 许效天，孟俊峰，罗耀军.浅谈我国磷矿伴生氟资源的综合利用［J］.安徽化工，2007，33(5)：12–13.

［4］ 张永明.磷矿加工中副产氟硅酸制氢氟酸工艺技术及最新研究进展［J］.河南化工，2023(9)：12–15.

［5］ 刘帅杰.磷矿伴生氟资源生产氟化氢的前景分析［J］.磷肥与复肥，2023，38(6)：31–36.