

基于光纤传感的石膏矿地面塌陷监测预警系统

汤志刚, 蔡承刚, 王艳红, 魏广庆, 张 振, 景佳俊

Monitoring and warning system for ground subsidence of gypsum mine based on fiber sensing

TANG Zhigang, CAI Chenggang, WANG Yanhong, WEI Guangqing, ZHANG Zhen, and JING Jiajun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202108034>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

综合勘察方法在蒙华铁路石膏矿采空区选线勘察中的应用

Application of comprehensive survey methods in the gypsum mine goaf for Mengxi-Huazhong railway route selection

谢猛 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 58-64

基于“3S”技术的地质灾害监测预警系统在我国应用现状

Review on geological disaster monitoring and early warning system based on “3S” technology in China

张凯翔 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 1-11

山东平邑“12·25”石膏矿坍塌事故救灾中的水文地质保障

§{suggestArticle.titleEn}

常允新, 徐希强, 王振涛, 杨培杰, 刘洪亮, 张永伟 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(1): 67-71

基于普适型仪器的滑坡监测预警初探——以甘肃兰州岷县三处滑坡为例

Application of universal geo-hazard monitoring instruments in landslides and early warning of three landslides in Gansu Province: a case study in Minxian County and Lanzhou City of Gansu Province

侯圣山, 李昂, 陈亮, 冯振, 王立朝, 曹鹏, 刘军友, 郑浩, 李阳光, 黄鑫, 郭伟, 魏新平 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 47-53

2004—2018年北京市突发地质灾害时空分布特点和监测预警状况

Temporal-spatial distribution and monitoring and early warning of sudden geological disasters in Beijing during the period of 2004 to 2018

程素珍, 路璐, 翟淑花, 张长敏, 郝春燕, 任凯珍 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 38-46

基于虚拟参考站技术的滑坡高精度位移监测系统设计与实践

Design and practice of high precision landslide displacement monitoring system based on VRS

张鸣之, 湛兵, 赵文, 袁旭东, 李宏祥 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 54-59



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202108034

汤志刚, 蔡承刚, 王艳红, 等. 基于光纤传感的石膏矿地面塌陷监测预警系统 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(5): 93-101.
TANG Zhigang, CAI Chenggang, WANG Yanhong, *et al.* Monitoring and warning system for ground subsidence of gypsum mine based on fiber sensing[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5): 93-101.

基于光纤传感的石膏矿地面塌陷监测预警系统

汤志刚¹, 蔡承刚¹, 王艳红², 魏广庆³, 张 振³, 景佳俊¹

(1. 江苏省地质矿产局第五地质大队, 江苏徐州 221004; 2. 江苏省地质矿产勘查局, 江苏南京 210018; 3. 南京大学(苏州)高新技术研究院, 江苏苏州 215128)

摘要:近年来,江苏省邳州市北部石膏矿区发生了 20 多起采空塌陷灾害。由于传统的采空区地表土体变形监测方法均难以满足采空区地面塌陷监测超前预报的要求,为解决石膏矿区采空塌陷监测预警机制缺乏的问题,邳北石膏矿区开展了基于光纤传感技术的监测预警工作。根据前期调查分析和数值模拟等成果推导石膏矿地面塌陷机理,并采用光纤传感器对采空区上覆松散层底部含水层地下水动态监测、深部岩土体位移监测及微震监测。在监测过程中,当水位变动幅度、岩土体位移突然超出正常波动值时或接收到较强震动信号时触发报警,在地面塌陷发生前期进行有效的预警,为防灾减灾工作提供充足的准备时间。通过监测预警工作的实施,验证了这些监测预警手段的有效性,可以为矿区地面塌陷地质灾害的监测、预报以及防治提供数据基础与科学依据,也可为石膏矿和其它类似条件的地面塌陷地质灾害防治和监测预警工作提供参考。

关键词: 光纤传感; 石膏矿; 地面塌陷; 监测预警。

中图分类号: P642.26 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2022)05-0093-09

Monitoring and warning system for ground subsidence of gypsum mine based on fiber sensing

TANG Zhigang¹, CAI Chenggang¹, WANG Yanhong², WEI Guangqing³, ZHANG Zhen³, JING Jiajun¹

(1. Party 5 Jiangsu Bureau of Geology and Mineral Resources, Xuzhou, Jiangsu 221004, China;

2. Jiangsu Bureau of Geology and Mineral Resources, Nanjing, Jiangsu 210018, China;

3. Nanjing University (Suzhou) High and New Technology Research Institute, Suzhou, Jiangsu 215128, China)

Abstract: In recent years, the mined-out area resulting in more than 20 goaf collapse disasters in the north Pizhou, Jiangsu Province. The traditional monitoring method of surface soil deformation is difficult to meet the requirement of advance prediction of surface subsidence. In order to solve the lack of monitoring and early warning mechanism of mined-out subsidence in gypsum mining area, a monitoring and early warning system based on fiber sensing technology was developed in this area. According to the results of preliminary investigation, analysis and numerical simulation, the ground collapse mechanism of gypsum mine is deduced, dynamic monitoring of groundwater level, displacement of deep rock and soil mass and microseismic monitoring of bottom aquifer above loose layer were monitored by optical fiber sensor, in the course of monitoring, the alarm will be triggered when the fluctuation of water level and the displacement of rock and soil suddenly

收稿日期: 2021-08-31; **修订日期:** 2021-09-22 **投稿网址:** <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 江苏省地质矿产勘查局科研项目(2019KY06)

第一作者: 汤志刚(1983-),男,安徽萧县人,硕士,高级工程师,主要从事水文地质、工程地质、环境地质和地质灾害防治工作。

E-mail: tangzhigangrw@163.com

exceed the normal fluctuation value or when a strong vibration signal is received, and the effective early warning will be carried out in the early stage of the ground collapse, and can provide adequate lead time for disaster prevention and mitigation efforts. Through the implementation of monitoring and early-warning work, the validity of these monitoring and early-warning means has been verified, which can provide data basis and scientific basis for the monitoring, prediction and prevention of ground subsidence in mining areas, it can also provide reference for prevention, control, monitoring and early warning of ground collapse geological disaster in gypsum mine and other similar conditions.

Keywords: fiber sensing; gypsum mine; ground subsidence; monitoring and early warning.

0 引言

石膏是江苏省邳州市北部地区的优势矿产资源,已有数十年的开采历史。石膏矿开采引起的采空塌陷风险隐患给矿区人民的生命、财产安全构成较大的威胁。为保障该类区域的生态可持续发展,许多科技人员对石膏矿采空区的稳定性、地面塌陷机理和监测预警方法等方面进行了大量的研究,如:邱洋等^[1]、张求才等^[2]、李明等^[3]、夏开宗等^[4]、陈从新^[5]从石膏矿矿柱稳定性、护顶层及上覆岩层的力学性质和冒落规律方面对石膏矿采空区稳定性和塌陷机理进行了研究,闫士民等^[6]、刘爱斌等^[7]、周丹等^[8]等人对邳北石膏矿区采空塌陷特征、稳定性分区、监测预警和灾害防治等方面进行了分析研究,卢毅等^[9]、郑茂兴等^[10]、汤志刚等^[11]对石膏矿区等地面变形特征及监测监控技术等方面进行了研究。如何基于现有理论研究选择合适监测技术,建立一套实时有效的石膏矿采空塌陷监测预警系统是当今重任。

石膏矿采空区监测现主要采用经纬仪、水准仪和全站仪或 GPS 等方法获取地表变形,是塌陷发生后的表现监测,难以满足采空区监测超前预报、长期和实时在线的要求。近年来,国内外学者尝试采用钻孔埋入长期稳定性高的光纤传感器和传感光缆来获取深部土层的变形、水压、温度等多场信息分布,为深部岩土工程监测提供一种新思路。目前,光纤监测技术在工程技术领域发展迅速,同时逐渐在地质灾害监测预警过程中发挥重要作用^[12-21]。但是由于石膏矿的开采方式、塌陷机理和地表变形特征等因素的影响,光纤监测技术在石膏矿区地质灾害监测预警方面的研究尚较少。

文中在前人对石膏矿采空塌陷特征、采空区稳定性、塌陷机理和地面变形监测等研究的基础上,基于光纤传感技术,使用多种传感器开展邳州市北部石膏矿区采空塌陷地质灾害监测预警探索,进行塌陷机理研究并验证光纤传感技术在石膏矿区采空塌陷地质灾害监测预警的有效性。

1 矿区概况

邳北石膏矿区位于邳州市北部,呈北西向条带状横跨邢楼、岔河、四户、邹庄和铁富五个镇,面积约 47.3 km²。

邳北石膏矿区是江苏省重要石膏产地,其查明资源总量超过 44×10⁸ t,其中控制的储量达 16×10⁸ t,居华东地区之首,矿床埋藏浅,开采技术条件简单,自 1984 年第一家石膏矿投产后,30 多年来,随着石膏矿的大量开采,引发了严重的采空塌陷。自 2005 年 3 月发生第一起采空塌陷起,邳州石膏矿区连续多年都有采空塌陷灾害发生,至今已发生 23 处采空塌陷,由于塌陷频率不断加快,规模不断扩大,造成矿井报废、土地损毁等严重后果,对矿区人民的生命及财产安全威胁较大。

2 矿区地质条件

2.1 地质、构造

矿区大地构造位置处于中朝准地台—淮河台坳—淮北台陷褶皱—徐州—(宿县)弧形断褶带—四户凹陷。区域地层主要有:太古界泰山群片麻岩,上元古界青白口系土门群—震旦系石英砂岩、石英岩及页岩,震旦系赵圩组—张渠组碳酸盐岩,寒武系—奥陶系碳酸盐岩与碎屑岩,中生界白垩系青山组—王氏组碎屑岩及火山碎屑岩,古近系官庄组—大汶口组含盐碎屑岩沉积为主。第四系广泛分布,厚度 40~45 m 不等。

2.2 工程地质条件

全新统(0~4 m)岩性以灰黄、褐黄色亚黏土、粉质黏土为主,底部为灰黑色黏土;中上更新统(4~27 m)岩性主要为棕黄、褐黄色含钙质结核黏土,局部含较多的铁锰结核,中下部夹中—细砂层;下更新统(27~40 m)岩性为棕褐色黏土、粗砂、砾石层。

石膏矿赋存于古近系大汶口组下段地层中,根据石膏矿层分布特征,可分为 3 个含膏岩带(层),编号为 I、II、III,其中 III 膏带是整个矿区开采矿层,矿区内顶板埋深 46~152 m,膏层厚 12.15~14.05 m。矿层的顶

板主要为泥岩、砂质泥岩、含膏泥岩,局部地段有粉砂岩、细砂岩及含砾砂岩。矿层底板岩性为泥岩。石膏

矿区主要岩土体力学性质指标见表 1。

表 1 矿区岩土层的物理性质指标

Table 1 Physical properties indexes of rock and soil

时代	岩性	密度/(g·cm ⁻³)	孔隙比	内摩擦角/(°)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
Q	粉质黏土	2.09 ~ 2.12	0.46 ~ 0.55	28	—	—
	含钙质结核黏土	2.01 ~ 2.02	0.67 ~ 0.68	17 ~ 29	—	—
	中砂	1.94	0.58	40	—	—
	粗砂	2.13	0.37	44	—	—
E	泥岩、含膏泥岩	2.38 ~ 2.42	—	34 ~ 36	4.4 ~ 13.0	0.44 ~ 0.64
	含砾砂岩	2.46 ~ 2.70	—	37 ~ 44	3.26 ~ 10.6	0.30 ~ 0.87
	膏岩	2.26 ~ 2.48	—	38 ~ 39	19.76 ~ 36.87	0.44 ~ 1.76

2.3 水文地质条件

矿区及周边地下水主要为松散岩类孔隙水,赋存于全新统及上更新统一中更新统砂层和砾石层中,局部具承压性质。第四系孔隙含水层其上部岩性为全新统棕黄色粉质黏土中夹的砂层,富水性相对较弱,单井涌水量小于 40 m³/d;中部为中更新统粉质黏土中夹的砂层或含砾砂层,富水性中等;底部局部地段为厚 1 ~ 5 m 的中更新统粗砂和砾石层,富水性较好。据部分矿段钻孔抽水试验结果:降深 2.86 ~ 6.84 m,涌水量 556.8 ~ 749.95 m³/d,单位涌水量 1.17 ~ 2.597 L/s·m,渗透系数 2.73 ~ 13.0 m/d。

3 塌陷机理分析及预警参量选取

3.1 塌陷历史

邳北石膏矿开采以来共发生过地面塌陷 23 次,发育了面状地面塌陷和点状整体塌陷两种表现形式(图 1)。其中点状整体塌陷发生时,塌陷坑平面近圆形,塌陷稳定后至今未继续塌陷。面状地面塌陷发生后,周边先后发生多次塌陷且范围逐渐扩大,最终连为一体。

3.2 塌陷机理分析

石膏矿被开采以后,采空区上覆岩层和地表由下至上产生连续的移动、变形和非连续的破坏(开裂、冒落等),最终造成地面塌陷^[22]。

邳州石膏矿区各矿山均采用房柱式开采,采场的稳定依靠留设的连续矿柱和预留的石膏护顶层及护底石膏层来维持平衡。王波等^[23]根据石膏矿典型的工程地质条件,利用 MatDEM 建立了采空区离散元模型,研究了矿房数量、矿房尺寸、矿柱宽度以及护顶层厚度对采空区塌陷特征的影响,通过分析土体的充填状态、岩土体扰动和热量生成情况等,可以更直观的认识采空区塌



(a) 面状塌陷



(b) 点状塌陷

图 1 矿区地面塌陷现状

Fig. 1 Current collapse in mining area

陷的动态过程,揭示了采空塌陷特征和机理,为本次石膏矿采空区地面塌陷监测设计和预测预报提供参考。根据模拟分析,地面塌陷发生时,塌陷前先出现顶板冒落,随后采空区上覆第四系松散层底含水通过采空区顶板裂隙渗入矿房,造成塌陷附近地下水位急剧下降,塌陷发生后上覆岩土体对采空区和破裂顶板进行充填,阻止了地下水的继续漏失,同时地下水位慢慢恢复,塌陷稳定后恢复常态。在顶板冒落、上覆岩土体垮落时,会同时产生振动波和岩土体位移。

3.3 预警参量选取及技术方法

根据石膏矿区地面塌陷过程和机理分析可知在塌陷开始到结束过程中,采空区上覆第四系松散层底含水水位会产生剧烈波动,同时产生上覆岩土体位移和振动波,因此以上述参量的变化作为地面塌陷监测预警的重要监测对象。

采用点式高精光纤光栅技术进行地下水位、岩土

体位移实时在线监测、采用微震传感器对塌陷区振动信号进行监测预警、采用光纤地质灾害报警器进行现场突发塌陷实时预警,其关键之一在于相关传感器的布设。针对采空区地面塌陷的特点,通过光纤不同的空间埋设方式,在土层中通过钻孔方式垂向植入光纤传感器,以获取各土层土体的变形、水压信息;在不同深度、不同范围内布设振动传感器。将一维的传感器件建成多维多参量监测网络,获取塌陷区立体变形场。在各监测点基础上建立地面塌陷监测网,利用自动化监测设备对监测点进行测量,达到准确掌握矿区地面的变形情况及地下水位动态情况,根据地面沉降量、水位下降幅度以及塌陷区振动信号,判断地面塌陷可能发生的情况,同时达到科学分析与预报预警的目的。

4 光纤传感监测系统

4.1 工作原理

布拉格光纤光栅(FBG)传感器是通过改变光纤芯区折射率,使其产生小的周期性调制而形成。当温度或应力发生改变时,光纤产生轴向应变,应变使得光栅周

期变大,同时光纤芯层和包层半径变小,通过光弹性效应改变了光纤的折射率,从而引起光栅波长偏移。利用应变与光栅波长偏移量的线性关系,通过计算得出被测结构应变量。可对沿光纤的轴向应变进行分布式监测,并具有分布式、长距离、精度高和耐久性长等特点。利用新型应变、应力、位移和温度等分布式光纤传感器件和采集终端,集成应用于各类工程的分布式光纤监测系统,适用于各类工程检测与监测。

4.2 监测系统建设

4.2.1 石膏矿地面塌陷监测系统

(1)系统架构

石膏矿地面塌陷无线监测系统利用光纤布拉格光栅(FBG)、物联网、互联网和数据库等技术,采用 3G、4G 无线技术实现对监测对象的数据实时监测和处理,采用互联网技术实现数据报送、发布和异常数据告警,采用 SQLite 数据库实现了数据本地化保存和管理,为自动化监测提供依据支持。

基于传感技术的石膏矿塌陷多参量监测整体系统架构见图 2。

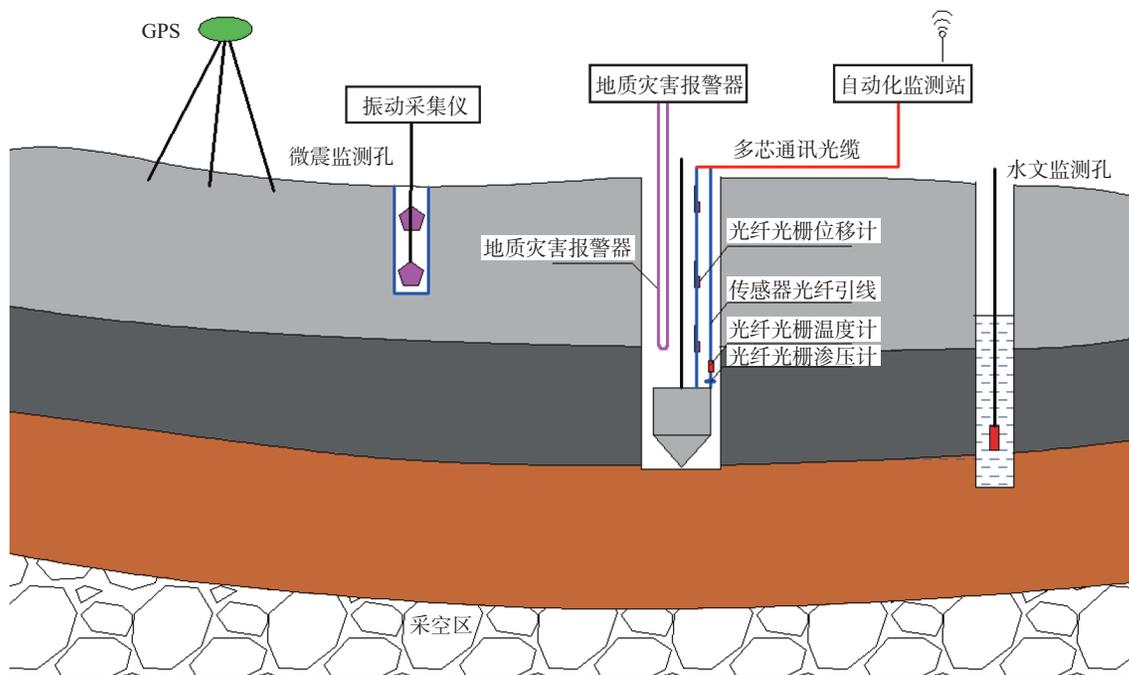


图 2 基于光纤传感技术的石膏矿地面塌陷多参量监测系统架构图

Fig. 2 Framework of multi-parameter monitoring system for ground subsidence of gypsum mine based on fiber sensing technology

(2)监测方案

①塌陷区竖向变形及渗压监测

钻孔监测主要是分为两个方面监测,第一是地表塌陷实时监测,通过在钻孔中串联三个光纤光栅位

移计实现,渗水压力变化通过在钻孔底部布设一个光纤光栅渗压计实现;第二个是现场预警报警装置,通过在钻孔中布设地质灾害报警器来实现。所有传感器通过配重导头下放至钻孔内,然后采用砂石料

回填钻孔并保证钻孔回填密实, 具体布设方案如图 3 所示。

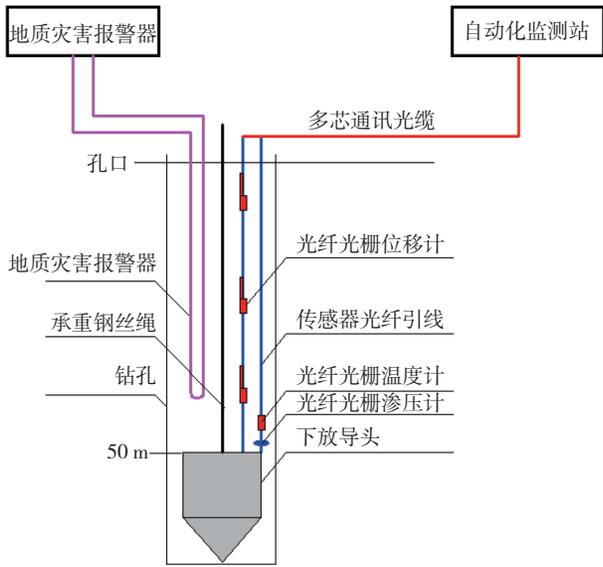


图 3 钻孔监测布设示意图

Fig. 3 Schematic diagram of borehole monitoring arrangement

在同一钻孔内布设三类传感器器件, 在光纤传感器布设前光纤光栅位移计串联形成一个 U 型回路; 将光纤光栅渗压计和光纤光栅温度计串联成一个 U 型回路; 将地质灾害报警器串联成 U 型回路; 所有的传感器通过配重导头自重下放至钻孔中, 光纤综合监测孔布设如图 3 所示。

为了实现采空塌陷的准确预测, 采用时间序列分析法和应变一维分布模型对实测的应变、位移和含水层

孔隙水压力等参量进行分析, 进而实现对覆岩变形的预测。

② 塌陷区微震信号监测

塌陷区微震信号监测采用振动传感器, 将传感器通过钻孔直埋的方式埋设于监测区域内, 每个测点安装 4 个振动传感器, 4 个传感器共用一个振动采集仪, 测点布设如图 4 所示。

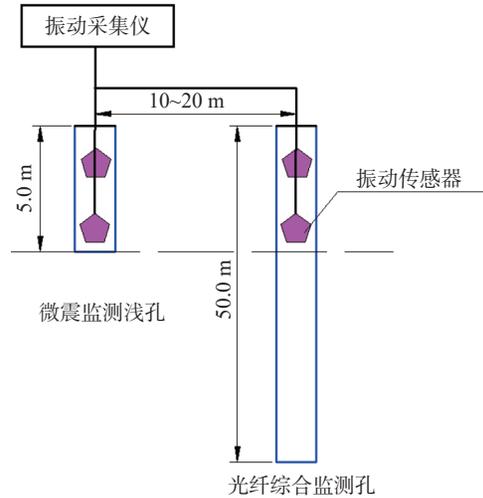


图 4 振动传感器测点布设示意图

Fig. 4 Schematic diagram of measuring point arrangement of vibration sensor

本监测系统集成主要是通过传感器、引线、解调设备和客户端来实现。将三个钻孔的光纤光栅传感器集中在一个监测站, 通过无线传输至客户端, 来实现地面塌陷实时监测, 形成实时监测系统, 如图 5 所示。

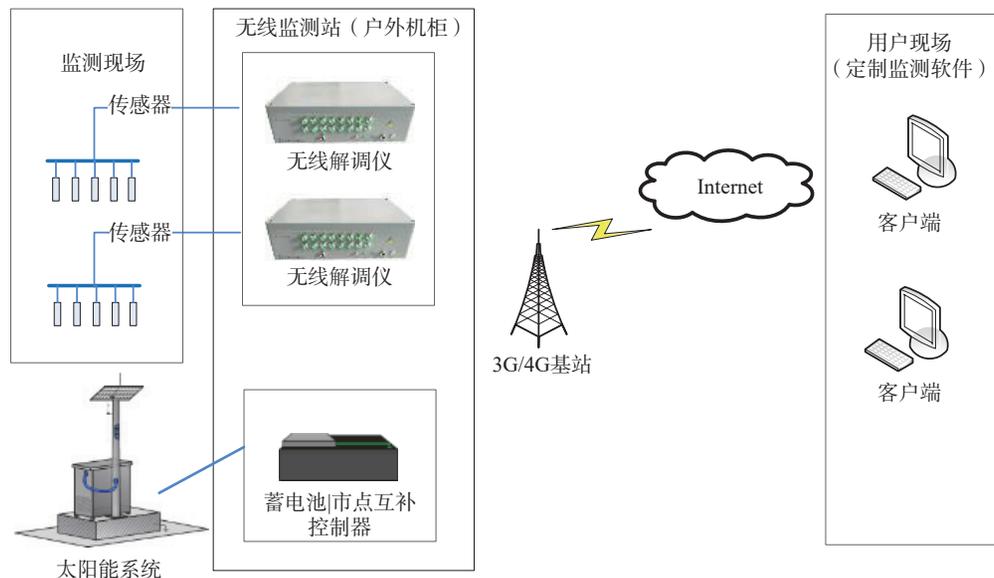


图 5 无线自动化监测系统架构

Fig. 5 Wireless automation monitoring system architecture

(3) 监测点布设

① 监测点布设依据

根据技术路线和研究方法,本次主要采用光纤竖向位移监测、微震监测、地下水监测等多种手段进行监测预警。根据本次选定的示范区采空区、基岩、第四系、含水层、顶板岩性等资料综合分析研究,主要工作量布设如下:

变形、渗压、温度、微震光纤监测点主要选定 3 个监测点,分别监测 3 种不同类型塌陷,一个布设在采空区露头附近,已发生的两个塌陷点之间,一个布设在前期监理过程中发现的地质灾害隐患点上,直接监测隐患点变化情况,一个布设在塌陷变形外围,靠近前期塌陷且后期可能发生大面积变形的区域。

地下水监测点有两个作用:首先是对前期布设的光纤监测孔进行验证渗流场监测效果,通过抽水试验,使周边渗流场发生变化,监测光纤对渗流场变化的观测效果,拟对 90~350 m 不同观测半径下进行观测;第二是塌陷过程中底含水首先向采空区渗漏,通过观测底含水水位变化推测采空区地面塌陷发生时间。综合三个光纤监测点的位置,结合抽水试验半径,选择布设 6 个地下水监测点,对底含水水位进行监测。

② 监测点布设

已实施监测工程分两期,其中第一期主要布设第四系底含水(埋深 38~41 m)水位监测点 6 个,孔深约 45 m;第二期布设光纤纵向位移和渗流变化、温度监测点、微震监测点 3 个,孔深均为 50 m。监测点布设及基本信息见图 6、图 7 和表 2。



图 6 第一期水位监测点布设图

Fig. 6 Layout of water level monitoring points at phase I

4.3 监测系统成果

4.3.1 地下水位监测

第一期监测项目自运行以来效果良好,监测数据未



图 7 第二期光纤监测点布设布设图

Fig. 7 Layout of phase II optical fiber monitoring points

表 2 主要监测工程量统计表

Table 2 Statistical table of main monitored quantities

期次(年月)	序号	孔位编号	孔深/m	备注
第一期 (2018年12月)	1	DXSW01	44	底含水水位监测孔
	2	DXSW02	46	
	3	DXSW03	45	
	4	DXSW04	45	
	5	DXSW05	45	
	6	DXSW06	45	
第二期 (2019年10月)	7	GXJC01	50	变形、渗压、温度、微震监测孔
	8	GXJC02	50	
	9	GXJC03	50	

出现中断或错误报警情况,已成功处理监测数据近 10 万条,成功预测了 2019 年 2 月 8 日 17:45 采空区地面塌陷一次。

2019 年 2 月 8 日 7:08, DXSW03 孔发出预警,技术人员第一时间对监测数据进行了监控,发现地下水位于当日 7:08 开始异常下降, 8:39 达到最低点,水位降幅 70 cm,之后水位逐渐恢复,至 17:10 监测数据基本恢复至原水位线附近。DXSW02 同时出现了水位小幅下降,降幅 0.8 cm,二者下降趋势表现一致(图 8)。

根据监测数据分析推测,7:08 采空区顶板开始垮落、第四系底部含水层地下水位急剧下降,至 8:39 采空区顶板及上覆松散层垮落、充填堵塞漏水点使水位达到最低点后逐渐恢复,塌陷结束后地下水位逐渐恢复正常。同时,根据监测孔位置及地下水位变化情况,预计可能塌陷点在 DXSW02、DXSW03 两孔之间,靠近 DXSW03 孔位置,类型为点状塌陷,直径较小。预警信号发出后,对该区域进行了人员疏散和巡查。至 14:00 时,在 DXSW03 东侧 135 m 处发生塌陷;至 18:00 时,塌

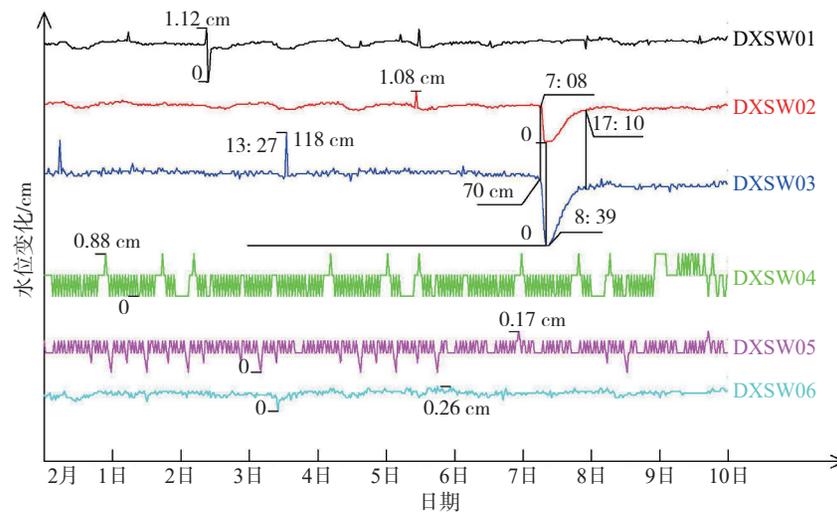


图 8 水位变化监测数据曲线图(2019年2月1—10日)

Fig. 8 Monitoring data curve of water level (1—10 Feb, 2019)

陷基本结束。塌陷结束后经现场踏勘查明地面塌陷坑形态近圆形,直径约 20 m,深度约 10 m,积水深度约 7~8 m(图 9),与预测情况基本一致。



图 9 塌陷坑现场照片

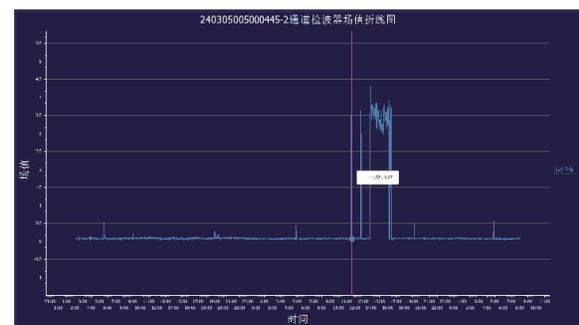
Fig. 9 Site photo of collapse pit

4.3.2 微震监测

第二期监测项目自运行以来效果良好,监测数据未出现中断或错误报警情况,监测点密度为 2 s 取得一个监测数值,已成功处理监测数据近 60 万条,成功预测了 2020 年 5 月 31 日 13:23 时临区采空塌陷一次。

本次塌陷点位于监测区东北向 1.5 km 处,隶属于山东省兰陵县。振动传感器在 11:37 接收到异常信号(图 10a),推测石膏矿护顶层逐渐脱落、顶板变形并开始零星冒落,振动传感器捕捉了本次震动并触发报警;13:23 时之后顶板完全破坏垮塌、塌陷开始并发展到地表,此过程中振动传感器接收到大量异常信号;异常信

号在 16:23 结束(图 10b),推测塌陷全部结束,塌陷岩土体进入压密阶段。



(a) 振动采集仪11:37发现异常位置



(b) 振动采集仪16:23地下异常结束

图 10 振动采集仪异常数据始末

Fig. 10 Anomalous data from monitoring sites

5 结语

通过对邳州北部石膏矿区地面塌陷监测数据计算分析,验证了理论分析和数值模拟过程中对塌陷过程和塌陷机理分析的准确性、科学性,同时可以看出光纤传感技术、多参量监测系统是行之有效的,能够有效监测

到相关参量的变化情况,可有效监测矿区内塌陷的发生,并为矿区地面塌陷地质灾害的监测、预警、防治提供科学依据。结合矿区塌陷特征,主要得到以下几方面的认识:

(1)第四系底部含水层监测点的水位变化对塌陷初期较为敏感,但监测范围相对较小,可作为矿区地面塌陷监测预警的良好参量,能够为区内人员疏散撤离提供充足时间;同时,地下水位的变化情况可以反映出塌陷过程中的开始、充填和结束等阶段特征。

(2)振动传感器可以有效接收到较大范围内采空区顶板断裂、塌落时产生的振动波并发出预警信号;钻孔内振动传感器的布设应考虑地表振动的影响,应将其布置于钻孔深部,以消除地表浅层振动造成监测数据的噪点波动。

(3)对于不同类型的采空塌陷,不同位置、不同深度的岩土体变形存在较大差别。采用钻孔内光纤监测技术可以得到钻孔内岩土体位移情况和随时间的变化规律。但钻孔内岩土体位移光纤传感器的监测范围较小,不能有效监测到远处塌陷造成的岩土体位移情况,后期应改进其布设方法。

(4)在后期监测工作中,通过多点、多参量监测数据的接收、处理,可以推测出塌陷位置、类型和范围等,做为提前预警疏散的范围依据。

参考文献(References):

- [1] 邹洋,李夕兵,赵国彦,等.石膏矿采空区上覆岩层冒落规律与危险性评价[J].*中国安全科学学报*,2011,21(2):101-108. [ZOU Yang, LI Xibing, ZHAO Guoyan, et al. Study on the caving laws of overlying strata in gypsum mine goaf and its risk assessment [J]. *China Safety Science Journal*, 2011, 21(2): 101-108. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 章求才,贺桂成,黄炳香,等.浅埋石膏矿顶板破断机理及应用研究[J].*采矿与安全工程学报*,2018,35(4):773-779. [ZHANG Qiucan, HE Guicheng, HUANG Bingxiang, et al. Investigation on the fracture mechanism of the immediate roof in shallow buried gypsum mine and its application [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(4): 773-779. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 李明,郑怀昌,刘志河,等.石膏长期强度对采空区稳定性的影响分析[J].*化工矿物与加工*,2010,39(2):21-23. [LI Ming, ZHENG Huaichang, LIU Zhihe, et al. Effect analysis of the long-term strength of gypsum on mine goaf stability [J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2010, 39(2): 21-23. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 夏开宗,陈从新,刘秀敏,等.石膏矿矿柱-护顶层支撑体

系的流变力学模型分析[J].*岩土力学*,2017,38(10):2923-2930. [XIA Kaizong, CHEN Congxin, LIU Xiumin, et al. Rheological mechanical model of pillar-protective roof supporting system in gypsum mines [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(10): 2923-2930. (in Chinese with English abstract)]

- [5] 陈从新.石膏矿采空区稳定性的数值模拟研究报告[R].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2015. [CHEN Congxin. Study report on numerical simulation of the stability of gypsummine goaf [R]. Wuhan: Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)]
- [6] 闫士民,李乐功,刘保业.江苏邳州石膏矿区采矿地面塌陷易发性模糊综合评判[J].*地质学报*,2014,38(2):334-338. [YAN Shimin, LI Legong, LIU Baoye. Fuzzy comprehensive evaluation on susceptibility of mining surface collapse in Pizhou gypsum mine in Jiangsu [J]. *Journal of Geology*, 2014, 38(2): 334-338. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 刘爱斌,景佳俊,周丹,等.石膏矿区采空地面塌陷易发性分区与监测预警研究[J].*中国地质调查*,2017,4(6):76-82. [LIU Aibin, JING Jiajun, ZHOU Dan, et al. Research on susceptibility zones and monitoring and early warning of ground collapse in gypsum mining area [J]. *Geological Survey of China*, 2017, 4(6): 76-82. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 周丹,景佳俊,邢雪.江苏省邳州石膏矿区采空地面塌陷发育特征与防治对策研究[J].*中国地质调查*,2018,5(4):99-106. [ZHOU Dan, JING Jiajun, XING Xue. Study on the development characteristics and control countermeasure of ground collapse in gypsum mining area of Pizhou, Jiangsu Province [J]. *Geological Survey of China*, 2018, 5(4): 99-106. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 卢毅,施斌,于军,等.地面变形分布式光纤监测模型试验研究[J].*工程地质学报*,2015,23(5):896-901. [LU Yi, SHI Bin, YU Jun, et al. Model test on distributed optical fiber monitoring of land subsidence and ground fissures [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, 23(5): 896-901. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 郑茂兴,于广.监测监控技术在石膏矿采空区的应用[J].*化工矿物与加工*,2012,41(9):44-46. [ZHENG Maoxing, YU Guang. Application of monitoring technique in mined-out area of gypsum mine [J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2012, 41(9): 44-46. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 汤志刚,景佳俊,颜士顺,等.基于InSAR监测数据的石膏矿采空塌陷特征分析——以邳州平台矿和希州矿为例[J].*中国地质调查*,2020,7(4):112-117. [TANG Zhigang, JING Jiajun, YAN Shishun, et al. Analysis of gob collapse characteristics in gypsum mine based on InSAR

- monitoring data: A case study of Pizhou Pingtai and Xizhou mine [J]. *Geological Survey of China*, 2020, 7(4): 112 - 117. (in Chinese with English abstract)
- [12] 顾春生,袁骏.基于光纤光栅传感技术的覆岩破坏模型试验 [J]. *煤炭技术*, 2016, 35(3): 84 - 86. [GU Chunsheng, YUAN Jun. Model test of overlying rock failure based on fiber Bragg grating sensing technology [J]. *Coal Technology*, 2016, 35(3): 84 - 86. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 顾春生,杨伟峰.基于光纤传感技术的降雨边坡模型试验 [J]. *金属矿山*, 2017(2): 141 - 144. [GU Chunsheng, YANG Weifeng. Model test of landslide failure under rainfall based on optical sensing technology [J]. *Metal Mine*, 2017(2): 141 - 144. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 卢毅,施斌,席均,等.基于BOTDR的地裂缝分布式光纤监测技术研究 [J]. *工程地质学报*, 2014, 22(1): 8 - 13. [LU Yi, SHI Bin, XI Jun, et al. Field study of botdr-based distributed monitoring technology for ground fissures [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(1): 8 - 13. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 刘苏平,施斌,张诚成,等.连云港徐圩地面沉降BOTDR监测与评价 [J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(5): 158 - 164. [LIU Suping, SHI Bin, ZHANG Chengcheng, et al. Monitoring and evaluation of land subsidence based on BOTDR in Xuwei near Lianyungang [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(5): 158 - 164. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 吴静红,姜洪涛,苏晶文,等.基于DFOS的苏州第四纪沉积层变形及地面沉降监测分析 [J]. *工程地质学报*, 2016, 24(1): 56 - 63. [WU Jinghong, JIANG Hongtao, SU Jingwen, et al. Dfos-based monitoring on quaternary sediments deformation and land subsidence in Suzhou, China [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(1): 56 - 63. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 施斌,徐洪钟,张丹,等.BOTDR应变监测技术应用在大型基础工程健康诊断中的可行性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(3): 493 - 499. [SHI Bin, XU Hongzhong, ZHANG Dan, et al. Feasibility study on application of botdr to health monitoring for large infrastructure engineering [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(3): 493 - 499. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 施斌.论大地感知系统与大地感知工程 [J]. *工程地质学报*, 2017, 25(3): 582 - 591. [SHI Bin. On the ground sensing system and ground sensing engineering [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(3): 582 - 591. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 徐洪钟,周元,张丹.基于GIS的岩溶塌陷分布式光纤监测系统的研发 [J]. *水文地质工程地质*, 2011, 38(3): 120 - 123. [XU Hongzhong, ZHOU Yuan, ZHANG Dan. Development of Karst collapse monitoring system using distributed optical fiber sensor based on GIS [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(3): 120 - 123. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 冯亚伟,毛宁利,李卫利.山东荆泉地区岩溶地面塌陷预警分区研究 [J/OL]. *中国岩溶*, 2022: 1 - 16. (2022-07-27). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1157.P.20220727.0841.002.html>. [FENG Yawei, MAO Ningli, LI Weili. Study on early warning zoning of Karst collapse in Jingquan area of Shandong Province [J/OL]. *Carsologica Sinica*, 2022: 1 - 16. (2022-07-27). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1157.P.20220727.0841.002.html>. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 周正,李大华,廖云平,等.重庆中梁山岩溶地面塌陷特征及形成机理 [J]. *中国岩溶*, 2022, 41(1): 67 - 78. [ZHOU Zheng, LI Dahua, LIAO Yunping, et al. Characteristics and formation mechanism of Karst ground collapse in Zhongliangshan area, Chongqing [J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(1): 67 - 78. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 何国清,杨伦,凌赓娣,等.矿山开采沉降学 [M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1991. [HE Guoqing, YANG Lun, LING Gengdi, et al. Mining subsidence theory [M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Publisher, 1991. (in chinese)]
- [23] 王波,蔡承刚,汤志刚,等.石膏矿采空区地面塌陷特征的离散元模拟 [J]. *矿业研究与开发*, 2021, 41(7): 71 - 78. [WANG Bo, CAI Chenggang, TANG Zhigang, et al. Discrete element simulation of ground collapse characteristics in goaf of gypsum mine [J]. *Mining Research and Development*, 2021, 41(7): 71 - 78. (in Chinese with English abstract)]