

# 采空区稳定性动态实时感知综合系统设计及实现

Design and Implementation of a Stability Dynamic Real-time Sensing Integrated System

高 进(大冶有色金属有限公司, 湖北 黄石 435005)

**摘要:**为确保使用空场法开采的矿山安全生产,通过对采空区进行监测掌握采空区是否处于稳定性的状态,在分析已有采空区监测系统优缺点的基础上,基于 Labview 软件开发采空区稳定性实时感知系统。该系统具有监测数据实时显示、自动报警、数据自动存储及回放等功能,与其他采空区监测系统相比,具有监测手段多样性、监测成本低、预报准确率较高、可扩展性强的特点,具有较强的实用性和推广应用的价值。

**关键词:**采空区监测;实时感知;自动报警;多手段验证

中图分类号: TD853

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2022)06-0060-04

**Abstract:** In order to ensure safety production, the monitoring of the goaf is based on the analysis of the existing goaf monitoring system. The system has real-time monitoring data display, automatic alarm, automatic data storage and playback. Compared with other goaf monitoring systems, the monitoring system has the characteristics of diversified monitoring means, low monitoring cost, high forecast accuracy and strong scalability.

**Key words:** goaf area monitoring; real-time perception; automatic alarm; multi-means verification

## 1 前言

使用空场法开采的矿山,矿房回采完毕后,遗留顶底板、间柱和矿柱共同维护采空区的稳定,随着开采时空的延续以及开采深度的增加,其空区的面积和体积持续增大,而顶底板和矿柱的自身的强度持续降低,在次生应力场以及外界扰动等多种因素作用下,采空区的稳定性不断减弱化,采空区的稳定性一旦突破支撑体强度临界状态,其极有可能产生雪崩式的垮落破坏,形成的空气冲击波,通过巷道、采空区传播,给作业的人员和设备设施带来灭顶之灾。2001年5月18日广西合浦县恒大石膏矿发生重大冒顶事故,事故导致29人死亡;2005年11月6日,河北省邢台县尚汪庄石膏矿区发生特大坍塌事故,事故导致37人死亡<sup>[1]</sup>。工程实践表明,采空区在失稳前有着明显的征兆<sup>[2]</sup>:征兆一,顶板和矿柱发生明显的位移,如开裂、鼓起、吐泥、掉碴、片帮脱落;征

兆二,顶板和矿柱的应力发生明显变化,应力值突然变大或变小;征兆三,岩体的声发射现象明显,当声音表现为低能级时表明岩体发生开裂,声音表现为高能级时表明岩体发生断裂,采空区随时可能发生冒落。采矿技术人员根据这些现象,使用多种监测仪器对采空区的稳定性进行实时监测,通过对监测仪器所获得的数据分析采空区的稳定性,判断采空区是否处于稳定性状态,并预测和预报采空的冒落大致时间,为作业人员和设备撤离至安全区赢得宝贵时间,以保证安全生产,避免生产安全事故的发生。

## 2 采空区稳定性分析

金属矿采空区稳定性的影响因素很多,根据相关资料及大量的现场实际观察和研究<sup>[3-5]</sup>,其影响因素及危害见表1、表2。

通过典型矿床开采简化的力学模型,具体如图1所示,根据层状顶板矿体构造特征,建立顶板简化分析模型,具体如图2所示,基于 Rössner 厚板理论,结合弹性力学相关理论,推导出固支和简支2种边界条件下,顶板的挠曲线方程与顶板内部最大应力表达式;以顶板抗拉强度作为破坏标准,结合顶板

[作者简介] 高进(1976-),男,本科,高级工程师,从事矿山采矿技术工作。

[引用格式] 高进.采空区稳定性动态实时感知综合系统设计及实现[J].中国矿山工程,2022,51(6):60-63+68.

最大应力推导出顶板安全厚度计算横型,为设计开采中采空区顶板安全厚度计算提供了理论依据。

表1 采空区稳定性影响因素

内在因素	外在因素
矿岩物理力学性质、岩石物质组成与抗风化能力	采空区上爰岩层厚度与爆破震动
矿岩完整性程度与自稳性	岩层隔水性能及水的弱化
岩层结构与断层构造分布情况	采空区自然环境风化
矿岩产状与节理裂隙发育程度	采空区地表作业设备大小与功率
采空区几何参数,包括跨度埋深空区高度与顶板暴露面积等	采空区岩层上方外力大小

表2 采空区危害形式、原因与范围

危害形式	发生原因	危害范围
冲击气浪	顶板垮塌	整个矿区地下作业人员、设施
矿震	垮落岩石造成的机械冲击和岩爆复合作用	整个矿区地下作业人员、设施
突水	采空区积水突然涌出	整个矿区地下作业人员、设施
串风	通风路线紊乱	整个矿区地下作业人员、设施
应力集中	采空区存留加剧岩爆的发生	局部作业人员
自燃	采空区内氧化物反应热虽得不到及时的扩散	局部作业人员

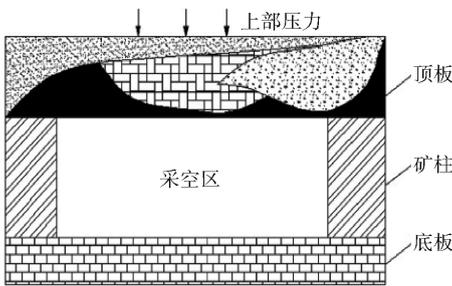
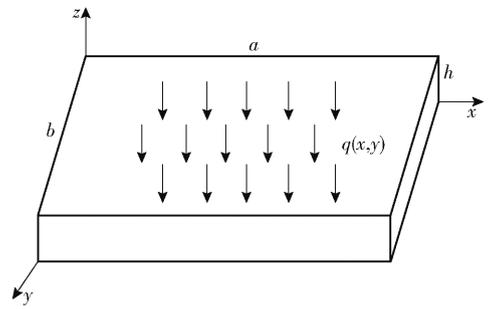


图1 典型矿床开采模型

### 3 采空区稳定性现状监测

采空区监测手段和监测仪器密切相关,最初采空区监测仪器是机械式位移和应力传感器,如机械式顶板离层仪和压力枕,技术人员在空区顶板和矿柱上安置这类监测仪器,定期到井下现场采集传感器数据,根据数据变化判断采空区的稳定性,这种监测不能及时完整反应采空区稳定性变化,容易发生漏报情况,且将技术人员置于较为危险的氛围中,易发生安全事故。最新的采空区监测仪器是三维激光



a—顶板长度; b—顶板宽度; h—顶板厚度;  $q(x, y)$ —顶板上部载荷

图2 顶板简化分析模型

扫描变形技术<sup>[6-7]</sup>,它快速精确又全面地扫描采空区,得到采空区的三维坐标,将多次记录的数据进行对比,即可求得采空区某点的位移值,并对变形区域进行标示,但其对单个大面积空区较为有效,且三维激光扫描摸仪价格昂贵,导致其的矿山的推广使用受限。现阶段,使用最为广泛是电子式位移、应力以及声发射监测仪器,将这些监测仪器所采集的数据通过有线、无线或光纤的方式传输到地表监测站<sup>[8-9]</sup>,技术人员在办公室就能掌握采空区的实时动态变化,其中位移监测和应力监测属于点监测范围,监测只能反应较小区域内岩体的位移和应力的变化情况,但其成本较低,这是大部分矿山采用这类监测手段。岩体的声发射监测属于面监测,能监测较大范围内岩体的稳定性状态<sup>[10-11]</sup>,但成本较高,且易受爆破和运输的外界条件的影响产生误报<sup>[12]</sup>,如何准确预报岩体破坏仍是当前研究课题之一,有条件的矿山为减少误报,采用两种监测系统相互验证,其中一套系统以声发射监测、另一套监测系统位移和应力监测<sup>[13-14]</sup>。这种方法极大的提高预报的准确率,但当其中一套系统报警时,需要人工验证另一系统数据,以避免发生误报,这种验证手段容易耽误宝贵的预警时间。如何实现采空区低成本、多手段的实时监测是技术人员关注的重点,虚拟仪器技术的出现为解决这类问题带来了实现可能性。

### 4 虚拟仪器的优点

虚拟仪器是传统仪器概念上的重大突破,它以计算机为硬件平台,以测试模块为基础单元,充分利用计算机软件的高效灵活的功能控制各类硬件的测试、测量和自动化应用,突破传统仪器在数据显示、处理、存储、显示、扩展方面的限制,最大限度的降低系统成本,增强系统的灵活性,扩展系统的功

能<sup>[15-16]</sup>, Labview 是一个标准的数据采集和仪器控制软件,采用图形化的编程语言,其语言程序为流程图和框图,方便快捷的实现仪器编程和数据采集系统间的联接,可以大大提高仪器系统的设计、测试的效率,虚拟仪器技术已广泛使用各类领域,技术人员在此方面做了有益的尝试,并获得一定成果。

## 5 采空区稳定性监测系统组成

监测系统由传感器模块、数据无线传输模块、数据接收模块以及数据处理中心模块构成,形成一个低成本、多手段的采空区实时监测系统。

### 5.1 传感器模块

充分分析现有采空区监测仪器,根据各类仪器的功能和特点,系统传感器模块由位移传感器、应力传感器、声发射传感器组成,其中位移传感器为电子式的多点位移计和顶板离层仪,应力传感器为电子式钻孔应力计,声发射传感器为声发射传感器探头

电子式多点位移计是测量钻孔内沿埋设方向任意两点间的相对位移的仪器,当钻孔发生位移时,位移计测杆产生位移,位移物理量转变为电信号输出。

数字式顶板离层仪是一种监测顶板岩层移动的专用监测仪器,将顶板的离层量转换为电信号输出。

电子式钻孔应力计由传感器本体和变送器组成,应力传感器采用应变测量技术,将应力传递到应变体上产生变形,应变计将变形量转换成电信号输出。

声发射传感器探头由压电陶瓷环和放大电路组成,压电陶瓷环将岩体的声信号转换为电信号,电信号经放大电路放后输出。

### 5.2 数据传输模块

各类传感器采集到的数据,通过信号屏蔽线与布置在采空区附近安全区的自动化采集仪相连接,采集仪通过内部无线发射模块,沿巷道内的 WiFi 节点,依次无线传输至地表监控中心。

### 5.3 数据接收模块

地表控制中心的无线数据接收器接收 WiFi 热点所传输的数据,经通讯电缆将电信号传送至数据采集板卡不同的通道。

### 5.4 数据处理及显示模块

LABVIEW 软件将接收到的各通道数据进行公式换算,将电信号还原成各类物理数据,并对数据进行实时显示、存储,在数据变化量超过预警值时进行报警。

监测系统组成如图 3 所示。

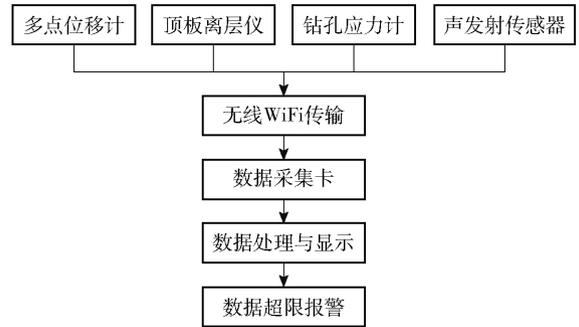


图3 监测系统组成

## 6 采空区稳定性监测系统功能及实现

系统软件主要部分由监控界面及各功能模块组成,具体如图 4 所示,系统功能分为用户登录、用户管理、监测数据显示、报警参数设置、实时报警、数据回放、数据存储,并将这些功能以菜单栏的形式展示。

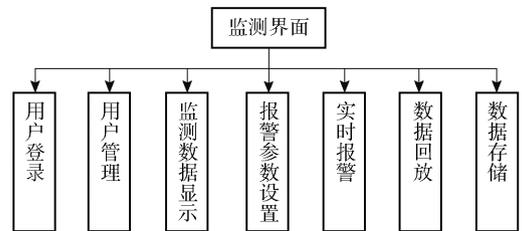


图4 监测系统界面组成

### 6.1 用户登录

登录人员在正确输入用户名和密码后,点击登陆,即可登陆到监测界面,点击退出则退出系统。在此界面中参数设置、用户管理、监测界面、回放数据、实时报警这些功能按钮都是灰色并禁用的,这是为了保护系统及数据安全,在未登陆之前不能进行这些操作。

### 6.2 用户管理

登录人员根据各自的权限和职能的不同分为管理人员和其他人员,只有管理员具有进行预警配置和人员管理的权限,其他人员只能观看浏览数据和回放数据。管理人员可以在成功登录系统后点击菜单栏的用户管理按钮,可以进行添加用户、删除用户、修改密码等操作,该界面显示已登录人员各自的用户名、登录密码以及上次登录时间,而其他人员没有用户管理权限而无法进行此项操作。

### 6.3 采空区稳定参数的实时感知显示

监测人员在成功登录后,点击菜单栏的监测界

面按钮,系统则由登录界面转换成监测界面,监测界面实时显示各类监测仪器监测数据的实时显示,数据的显示分为两种,一种为各类监测数值的实时显示,另一种则为监测数据值的曲线显示,为监测采空区稳定性分析提供最直观的依据。

#### 6.4 预警参数设计

为保证监测的准确以及严谨,只有管理人员才能在预警参数配置界面中对各监测参数设置预警参数,多点位移计和顶板离层仪的预警参数有2个指标,分别为总位移量和位移速率;钻孔应力计的预警参数有一个指标,即总应力变化值;声发射传感器有两个指标,分别为事件数和能量。将这些设置存储到数据库当中,作为预警的主要依据。

#### 6.5 系统报警

系统的警报分为两个层级,当系统中某一监测传感器的数据一旦超过预警值时,其在实时报警界面中的背景框就会显示为黄色,及时提醒相关人员密切注意其余监测项目的数据变化,当有2个监测指标超限时,报警背景框颜色变为红色,并发出声音报警,监测人员可密切关注多种监测仪器的数据变化,必要时通知井下人员及时撤离。

#### 6.6 数据回放

登录人员点击菜单栏的回放数据按钮,可对所有监控范围内的数据进行历史回放,便于分析采空区稳定性数据变化趋势和调查数据记录。根据数据变化趋势和评估采矿稳定性状况,在此界面可以输入某种具体的监测仪器,查询的起始时间以及结束时间,点击查询按钮,即可显示该可的监测数据以及数据变化曲线,点击报表按钮,可对任意时段间的回放数据进行报表生成,生成 word 文档,图文并茂,便于打印和讨论分析。

#### 6.7 数据存储

管理人员可以通过对数据的存储时间间隔加以设置,调节数据的存储量,并将各类监测数据通过以分时段命名的方式自动存储在计算机数据库中,以供日后查询和共享。

### 7 Labview 软件现场应用

Labview 软件在采空区稳定性动态实时感知综合系统应用。大宝山矿业有限公司在风井 630 m35 线、副井 571 m272 线;大冶市陈贵刘家畷铁矿都采用 Labview 软件,实现采空区稳定性动态实时感知,取得了真实可靠的监测参数,保证采场下向式回采

安全。

软件将模块化和按键式结合,软件的使用和操作更加人性化。各个功能模块一目了然,实时显示各种监测参数,并将其存储于数据库中,监测与控制能实现同步进行。

软件设计针对的范围广,不同的采空区规模深度和类型、不同监控范围均可使用本软件,只需要对代码进行少量的调整,软件扩展性强。

软件克服了人工监测方式效率低、误差大、费时费力,而且受监测空间的限制易产生安全事故等缺点,具有相互验证、高精度、自动采集传输数据并及时分析、处理预警、采集数据不必到现场等优点。

软件对监测数据进行实时曲线显示及分析,实现报表输出及历史数据查询、采空区稳定性安全评估、数据库信息共享等功能。

### 8 展望

随著矿山开采深度的进一步推进,采空区赋存的地质条件越来越复杂。同时深部岩石力学行为与浅部相比具有明显的不同,对深部复杂环境下的采空区稳定性实时在线监测预报等工程灾害防治具有重要意义。

不同手段对采空区稳定性在线监测预警方法研究,将在线监测数据与分析模型相融台,实现空区监测数据与在线分析管控平台的动态模拟将是未来研究的重要课题。

#### [参考文献]

- [1] 郭芳,张世雄,何皎云,等. 遥测技术在石膏矿采空区监测系统中的应用[J]. 露天采矿技术, 2007(5): 42-45.
- [2] 仲维光,王希磁,徐钦国,等. 石膏矿山采空区监测与治理[J]. 采矿技术, 2008,8(1):78-80.
- [3] 覃林,孙国权,李同鹏,等. 地下矿山采空区探测及综合治理研究与应用[J]. 金属矿山,2013,42(11):1-4.
- [4] 叶粤文,罗一志,黄应暨等. 高峰锡矿 100 号矿体地压监测与控制技术研究[J]. 矿业研究与开发, 1998, 18(2): 4-7.
- [5] 陈凯,杨小聪,张达. 采空区三维激光扫描变形监测系统[J]. 矿冶, 2012,21(1):60-63.
- [6] 陈凯,杨小聪,张达. 采空区三维激光扫描变形监测试验研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2012,64(5):1-5.

(下转第 68 页)