

北京西山地区采空塌陷特征及监测方法探讨

黄来源

(北京市地质研究所, 北京 100120)

【摘要】 北京地区采空塌陷灾害主要分布于北京西山地区, 造成地面的沉降或者陷落, 进一步造成地面建筑破坏, 公路、铁路、管线等线状工程扭曲损毁, 农田、林地损毁, 甚至造成人员伤亡。近年来, 随着国家和地方政府产业政策的逐步调整, 北京市逐步关停了所有小窑及大部分乡镇煤矿, 但历史遗留的地下采空仍然威胁着人民群众的生命财产安全, 介绍了国内外对采空塌陷灾害进行监测的几种技术方法, 尝试探讨了适合于北京市西山地区的采空塌陷监测技术方法, 为首都的防灾减灾提供参考。

【关键词】 西山地区; 采空塌陷; 深孔位移监测; 静力水准监测; PS-InSAR。

【中图分类号】 P 694

【文献标识码】 A

doi: 10. 3969/j. issn. 1007-2993. 2011. 06. 005

Characteristics and Monitoring Methods of Ground Subsidence in the Gob Area of Beijing West Mountain Areas

Huang Laiyuan¹

(Beijing Institute of Geology, Beijing 100120, China)

【Abstract】 The gob area of Beijing are mainly located in the Beijing west mountain areas, resulting in ground subsidence, surface deformation, causing further damage to the ground buildings, roads, railways, pipelines and other linear projects distorted, damaged farmland, forest damage, and even casualties, etc. In recent years, with national and local government industrial policy of gradual adjustment, Beijing gradually shut down all small coal mine, and most of the towns, but the historical legacy of underground mined is still threatening people's lives and property, this paper describes several technical methods for disaster monitoring at home and abroad, attempts to explore technical methods to monitor mining collapse, which is suitable for the Beijing west mountain areas, this will provide a reference for the capital disaster prevention and mitigation.

【Key words】 the Beijing west mountain areas; ground subsidence in gob area; deep hole displacement monitoring; static level monitoring; PS-InSar

0 引言

北京地区的采空塌陷的形成主要与长期以来的地下采煤密切相关, 北京地区采矿历史或者说采煤历史可以追溯到辽代, 采空塌陷的形成主要是由于古代、近代和现代的地下采煤活动形成的地下采空区塌落, 造成地面的沉降或者陷落, 进一步造成地面建筑破坏, 公路、铁路、管线等线状工程扭曲损毁, 农田、林地损毁, 甚至造成人员伤亡。

近年来, 随着国家和地方政府产业政策的逐步调整, 北京市逐步关停了西山地区所有小窑及大部分乡镇煤矿, 地面塌陷的灾害的发生有所缓解, 但历史采煤遗留的地下采空仍然威胁着北京市西山地区

的人民生命财产安全和产业经济发展, 采空塌陷灾害的防治工作仍然任重而道远。

本文介绍了北京地区采空塌陷的分布特征, 分析采空塌陷灾害的危害特点, 根据采空塌陷灾害的发展过程和各类技术方法的特点, 介绍了几种国内外用于采空塌陷监测的技术方法和仪器, 提出了适用于北京地区的采空塌陷监测方案, 还介绍了国内外采空塌陷监测系统的一些应用情况。

1 北京地区采空塌陷分布特征

北京西山地区的煤系地层主要为石炭系、二叠系、侏罗系地层, 长期以来的地下采煤活动形成的地下采空一般分布在这些煤系地层中, 地下采空垂直

方向上由地表至地下一600m均有分布,地下采空的形成时间上经历辽、金、明、清及近现代。

由于地下采空陷落而形成的地表变形,主要分布于北京市的房山区、门头沟区,海淀区和丰台区也有零星分布,涉及四个区县,数十个乡镇,地貌单元上跨越了山前平原、低山丘陵、中高山地貌^[1]。由于地下采空陷落而形成的地表变形的主要形式为地面沉降、地面塌陷、地裂缝、山体陷落,本文将四种不同程度的地面变形统称为采空塌陷灾害。

北京地区采空塌陷主要分布在西山地区门头沟区与房山区的交界区域的南北两侧(百花山向斜两翼),包括门头沟区的张家村、吕家村一带,房山区的蒲洼、史家营、大安山一带;另外门头沟的清水、斋堂和房山区的周口店、南窖一带也有分布;门头沟区政府所在地门城镇的采空塌陷灾害最为突出。

据《北京地质灾害》一书数据,北京市西山地区(除门城镇)采空区面积36.92 km²,其中浅部小窑采空区6.52 km²,深部国矿采空区30.4 km²。历史老窑及近现代小窑形成的采空深度多小于100 m,国矿采空区深度集中在100 m至600 m。

门城镇镇域面积33 km²,采空区面积就达到了14.4 km²,接近全镇面积的一半,其中浅部小窑采空区0.9 km²,深部国矿采空区13.5 km²。历史老窑及近现代小窑形成的采空深度多小于80 m,矿采空区深度集中在100 m至800 m,平均300 m。

2 采空塌陷的危害情况

采空塌陷危害的形成主要归结历史老窑的开采、近现代小窑的无序开采以及国有矿山存在非法越界开采和违反安全规程开采,这些无序存在的地下采空,一旦发生陷落,就会危及地表基础设施、人居和自然环境甚至人民群众的生命,造成难以挽回的损失。

2.1 危害建筑物的安全

采空塌陷经常对地表建筑物造成危害,包括普通住宅、文物古建、公共建筑等,据不完全统计,近几十年采空塌陷造成各类房屋破坏达1万多间^[1],搬迁居民点37处,耗资约2858万元。采空塌陷灾害影响较大的包括西山地区的戒台寺,采空塌陷引起戒台寺地区边坡滑动下陷,造成寺内地面不均匀沉降和地裂缝,地裂缝最宽处达200 mm,古建也出现裂缝而损坏。

2.2 危害公路、铁路、管线等线状工程

采空塌陷还会对公路、铁路、管线等线状工程造成破坏,据统计西山地区约40多处路段出现过沉

降、裂缝等变形破坏,包括造成门头沟区木城涧煤矿铁路及煤矿运输小铁路7处破坏,还对108国道及若干区县级道路造成破坏,破坏桥梁2处。比较典型的例子是108国道宝水段的采空塌陷灾害,该路段上世纪90年代开始受采空塌陷影响,局部路段出现滑移、下沉、开裂等现象,截至2002年,该路段出现两次严重塌陷灾害,局部路面数次重修。

2.3 危害水利电力设施

采空塌陷会对水电设施造成破坏,初步统计西山地区采空塌陷造成水电设施破坏13处,共有7处高压输电线路由于采空塌陷影响而遭到破坏,电业部门耗资24万元封闭私采小窑,禁止其继续开采,保证电网安全。

2.4 危害自然生态环境和人居环境

采空塌陷灾害会造成地表形态的严重变形,破坏原有地形地貌,形成塌陷坑、地裂缝、不稳定边坡,相应的地表植物遭到破坏,一些野生动物无处栖身,从而影响局部地区的微生态系统,最终人居和自然生态环境造成破坏。初步统计西山地区的采空塌陷灾害破坏林木灾害点66处,毁坏林木2774棵,受影响林木数万棵。

2.5 影响地下水径流

严重的地下采空会影响地下水的径流,造成局部地下水快速下渗,破坏该地区的自然水源涵养条件,造成区域性的缺水、干旱。

2.6 威胁群众生命安全

北京西山地区采空塌陷灾害严重,直接威胁人民群众生命安全。解放以来采空塌陷灾害造成7人死亡,3人受伤,截至1993年底,采空区内受灾居民点40处,4247间房屋被毁,整村搬迁5处,部分搬迁4处,耗资约400多万元。2004年4月6日,一辆重载的运煤货车行至大安山乡西沟公路段,道路突然塌陷,致连车带人坠入塌坑中,造成两人死亡^[1]。

3 采空塌陷监测方法探讨

通过采空塌陷灾害的发育特征和空间分布特征的研究,采空塌陷灾害的发生,是一个缓变到突变的单过程或者循环过程。首先是地下采矿活动形成地下采空区,采空区在顶板暴露面积、矿柱留设尺寸、开采深度、围岩性质、地质构造、工程扰动、大气降水和地下水等因素的影响下^[2],围岩失稳造成上覆岩层、土层陷落的过程。

采空塌陷灾害中地下采空周边的围岩失稳是缓变的过程,累积微小位移的变形,这个过程在重力等

作用下,垂直向上传递到地表,多次小位移的累积形成的较大位移在地表瞬时以剧烈地表破坏的形式爆发,形成塌陷。

根据采空塌陷发生的过程分析,采空塌陷的监测可以主要从地下深部位移的监测、地表位移的监测以及采空塌陷相关诱发因素的监测三个方面来探讨。

3.1 深部位移监测(地下深部塌陷监测)

测采空塌陷监测的目的在于预警,塌陷的发生往往始于深部危岩失稳的缓变过程,所以采空塌陷灾害的监测重点应该在地下。

目前深部位移监测主要通过采空塌陷影响区钻孔,然后在钻孔中布设深孔张拉线式多点位移监测系统来实现。深孔张拉线式多点沉降位移系统可用于自动监测超深层岩体沿钻孔轴向的位移变化,经过多年应用,仪器原理相对简单,安装简单高效,精确可靠,在不同深度的钻孔中得到满意的监测结果,已有系统的最大监测深度可达700 m,监测精度可达0.05 mm,量程0—3 m。

深孔张拉线式多点位移监测系统的工作原理为将锚头锚固在钻孔不同深度的位置,锚头通过张拉线与测头集成处张力弹簧连接,系统测量张力弹簧沿钻孔轴线的移动,其位移量可由张力测头集成的绕线式传感器经数据采集系统测取(见图1-图5)。

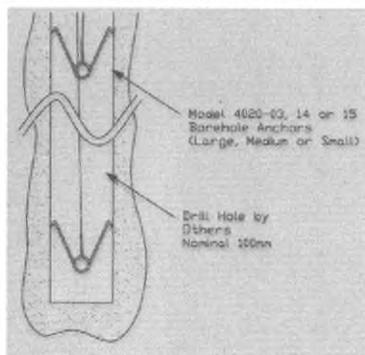


图1 锚头接触示意图

系统的主要组成部分包括锚头、张拉线、测头集成、太阳能供电系统、数据传输接受系统。

深孔张拉线式多点位移监测系统的主要特点:

- 1) 根据现场条件确定锚点位置;
- 2) 无需灌浆和测杆;
- 3) 能承受测向剪切;
- 4) 测头重装方便;
- 5) 体积较小;
- 6) 价格经济;
- 7) 实时监测毫米级精度;

8) 所有元件经过抗腐蚀处理。

锚头具备强力的弹性能紧紧锚固在孔壁上;尺寸很小,不会与张拉线相互干扰;安装容易。张拉线具备重量轻、高强度与可变性特性;张拉线有较好的抗腐蚀特性。

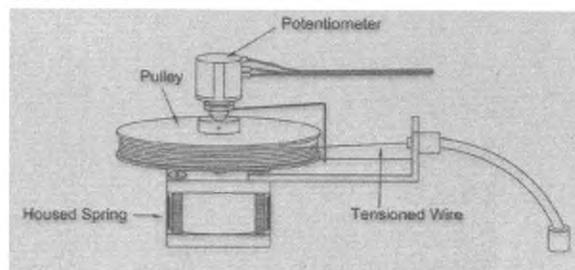


图2 测头集成示意图(传感器的承载弹簧能为张拉线提供常量张力)

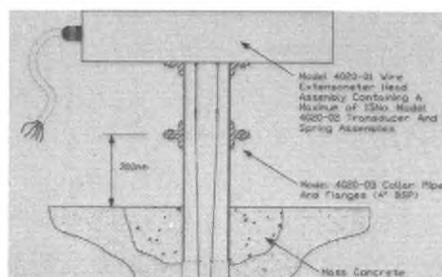


图3 测头集成箱与孔口接触示意图



图4 用于崩落式采矿引起地面沉降的监测

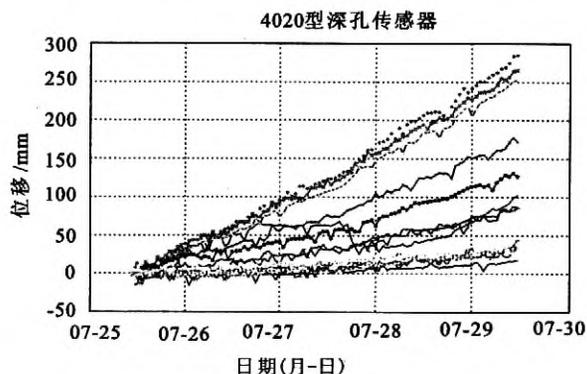


图5 用于煤矿开采引发的长期地面沉降监测采集数据分析实例(据盛虞博士)

技术指标:

- 量程:0~1 m,0~2 m,0~3 m;
- 分辨率:0.5 mm;
- 最大安装深度:700 m;
- 最大锚头数:20;
- 钻孔直径:100~300 mm(根据锚头数);
- 锚头长度:110 mm;
- 锚头重量:300 g;
- 测头直径:500~700 mm;(根据锚头数);
- 测头重量:20 kg;
- 张拉线直径:0.5 mm;

3.2 地表位移监测(地表塌陷监测)

采空区地面塌陷地表形变监测以单点式的采空塌陷影响区局部位移监测和基于遥感手段(PS-InSAR)的区域性沉降监测为主。

3.2.1 常规手段的地表位移监测(单点监测)

常规地表位移监测方法以传统的水准测量和GPS测量为主。尽管这两种监测方法的成熟度和高精度毋庸置疑,但水准和GPS监测的频率,台站分布及监测数据分析整理受到成本和气候环境等因素的限制,对于采空区大面积长期形变监测可行性较差。另外,由于GPS观测的垂向精度相对较低,也限制了其在采空塌陷监测中的应用^[3],本文主要介绍用于监测地表形变的静力水准监测系统。

静力水准沉降监测系统适合于要求高精度监测地表垂直位移的场合,可监测到0.03 mm的高程变化,量程0~600 mm。系统由一系列含有液位传感器的容器组成,容器间由充液管互相连通。基准容器位于一个稳定的基准点,其它容器位于同基准容器大致相同标高的不同位置,任何一个容器与基准容器间的高程变化都将引起相应容器内的液位变化。静力水准系统的组成和安装运行见图6、图7。

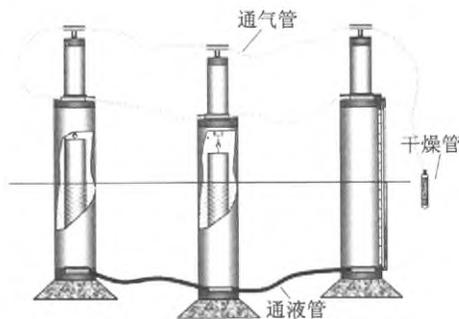


图6 静力水准监测系统示意图

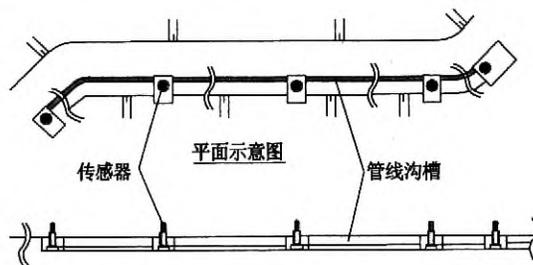


图7 静力水准监测系统安装示意图

系统特点:精度高,安装于塌陷区地表,施工简单,具有无线远程数据采集传输功能。

3.2.2 遥感手段监测(区域性监测)

近年来,迅速发展起来的差分合成孔径雷达干涉测量技术(D-InSAR)为采空塌陷区的实时动态监测提供了新的手段。D-InSAR技术是利用同一地区的两幅干涉图像,其中一幅是通过形变事件前的两幅SAR图像获取的干涉图像,另一幅是通过形变事件前后两幅SAR图像获取的干涉图像,然后通过两幅干涉图像的差分处理(除去地球曲面、地形起伏影响)来获取地表微量形变的测量技术^[4](见图8)。

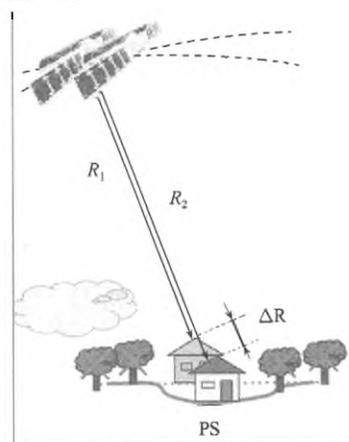


图8 PS-InSAR监测地面塌陷示意图

D-InSAR技术在实际应用中,受地形、植被、大气效应和基线变化等因素影响,限制了其应用范围。为解决上述问题,Ferretti等“于2000年首次提出“永久散射体干涉技术”(Permanent Scatterers InSAR, PS-InSAR)^[3]。该技术在传统D-InSAR技术基础上,利用一组时间系列的SAR数据,找出持久稳定的雷达目标PS,得出其位移变化。大气干扰影响可得到准确估计并予以去除(见表1)。

表 1 PS-InSAR 技术的优点与缺点对比表

优点	缺点
<ul style="list-style-type: none"> 可以得到目标区域的位移历史数据。 可以对大范围监测区域不断进行数据更新。 无需现场工作,节约大量人力、差旅费等相关费用。 高密度监测(PS点可多达1000个/km²)。 快速数据处理,节省人工。 高精度。 数据可与GIS兼容,便于技术的应用。 	<ul style="list-style-type: none"> 植被和森林的覆盖区将影响选取PS点,需要人工PS。 低反射区域(如光滑表面和某些物质),需要人工PS。 卫星雷达的循环可能会影响到采样时序。 适用于监测“缓慢”变形(LOS条件下通常<10cm/年)。

3.3 其他监测仪器(研究其与采空塌陷的相关性)

采空区的岩体以地面塌陷、地裂缝等形式变形破坏时内部都会有裂纹产生、扩展、摩擦,然后能量以应力波的形式释放,产生微震事件。微震信号从最初阶段开始就包含了大量岩体受力变形破坏和深部裂纹活动的信息,通过分析微震事件,可以推测岩体的破坏位置和破坏程度(见图10、图11)。系统组成方式是:在选定地点钻孔安装传感器,每个传感器配一台监测仪器,各仪器之间通过通信线相连接通往主控仪和专用微机(见图9)。

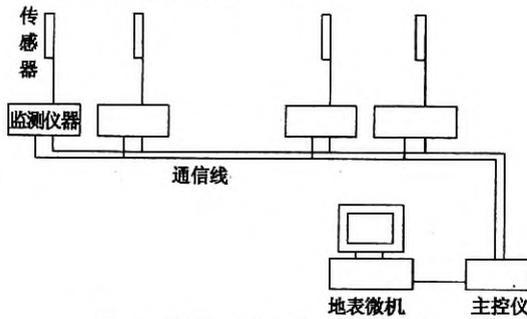


图 9 微震监测系统组成示意图

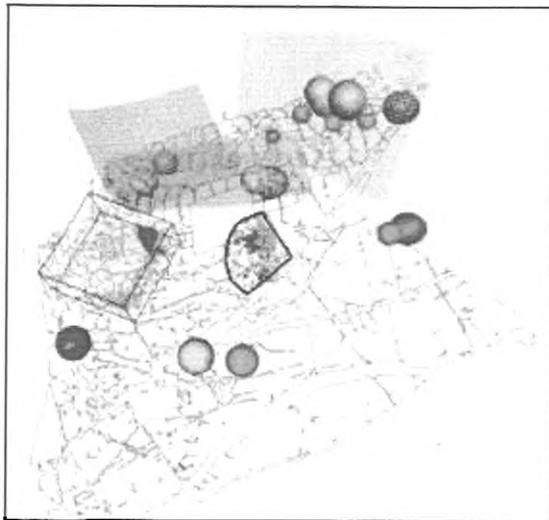


图 10 过滤后的微震事件空间分布

目前,微震监测系统的主要特点为:支持多类传感器;模块化设计、易扩展;实时在线监测;高速信号采集、全数字化;高分辨率、多通道、GPS授时;宽频率、多种数字传输模式;小直径钻孔监测;专业、实时和可视化的处理软件;本质安全型设计、适合极端野外环境。目前国内应用的微震监测系统参数对比典型的两家仪器对比情况见表2。

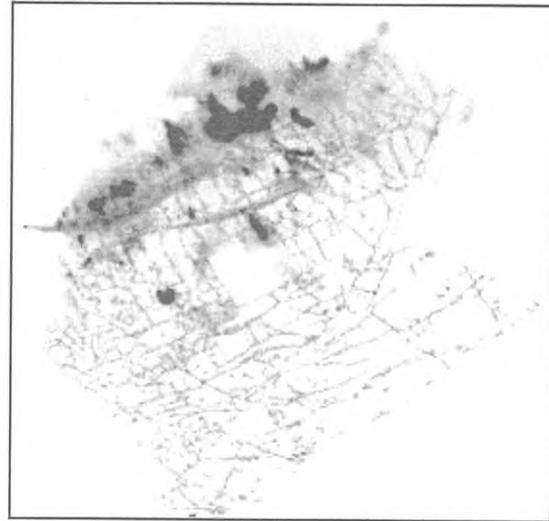


图 11 微震数据空间等值图表示

表 2 国内应用的微震监测系统对比

参数	南非 Iss	矿冶总院 AIII 485
通道数	可扩展至 1536	16
A/D 采样频率	3-48kHz	100kHz
存储容量:	电脑硬盘(可存几年数据)	128k
频率范围:	7Hz~2kHz	20Hz~20kHz
通信方式:	RS-485 线缆联接	RS-485 线缆联接
定位误差:		≤10%
安装钻孔直径:	46mm,76mm,102mm 也可装于地表	可装于地表
功率	<120mW	<1kW
软件功能:	系统计时(RTS),微震数据处理(JMIS)、微震事件可视化及解释(JDI)、微震事件实时显示(Tricker)	参数设置、数据采集、数据通信、声发射源定位及频谱分析等

4 采空塌陷监测系统的实施应用情况

1)由辽宁省国土资源厅和调兵山市国土资源局共同投资建成的地面变形监测系统,分别在铁法煤田大兴矿南五采区和晓明矿南三采区地表建成一座监测站,并沿岩层的倾向和走向,按40~50m的间

距布设了132个观测孔。监测系统可对煤层采空后岩层水平移动、下沉、变形、断裂及地应力外延拉动等相关参数进行观测记录,及时预警突发性地质灾害,同时也可对采煤塌陷区治理和土地复垦提供科学依据。

2)雅加达地方调查和测绘局,雅加达地方矿务局于1978,1982,1991,1993和1997年进行了系统的水平测量。Murdharno和Sudarsono(1998)通过水平测量和测压管水位监测报导了雅加达的地面沉降。1997年为建立地籍测量控制网,国家土地局(BPN)首次进行了系统的GPS调查。之后,大地测量局和万隆技术协会开展了周期性的GPS调查来监测地面沉降。Abidin等(2001)参照以水平测量和其它资料,对GPS调查结果进行了详细总结。1982—1991,1991—1997,1997—1999年,最大沉降深度分别为80 cm,160 cm和20 cm。

3)自19世纪以来,波兰的西里西亚石炭系上部煤盆地是世界上最大的采矿中心之一,65个地下矿井每年的煤产量为1.3亿吨。大规模开采的负面影响是在地表出现了地面形变和地面沉降,影响范围约有1500 km²。地形和水文的变化在相当大程度上破坏了建筑物和其它基础设施,而且一些受影响地区不得不从城市规划中排除出去。自1970年起约有40%的煤矿开采是在城市和重要的基础设施下进行的,如在每平方公里有4000居民的稠密城市化地区进行开矿。合成孔径雷达干涉测量可以进行分析由于采矿干扰和不同岩体下陷速度加快或延缓导致的差异沉降,通过干涉测量可以实时监测地面沉降,这在人口密集的城市地区特别重要。在西里西亚煤矿区,采用SAR干涉测量技术和采矿数据进行长期的地面沉降监测,已经证实应用合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术监测人为诱导的地面沉降可以达到厘米级的分辨率。西里西亚石炭系上部煤炭盆地是一个高度城市化的重工业地区,该矿坑下陷造成了建筑物和其它基础设施的破坏,改变了地表排水方式,与落水洞和地裂缝的形成也有一定关系。掌握危险区的空间分布有助于制定土地利用规划和补偿政策。

5 结论

1)北京地区采空塌陷的形成主要与长期以来的地下采煤密切相关,分布在北京的西山地区。

2)采空塌陷灾害的发生,是一个缓变到突变的单过程或者循环过程。地下采空区位移的缓变积累

到一定程度表现为地表的突然变形。

3)测采空塌陷监测的目的在于预警,塌陷的发生往往始于深部危岩失稳的缓变过程,所以采空塌陷灾害的监测重点应该在地下。

4)北京西山地区采空塌陷的监测应该从地下深部位移的监测和地表位移的监测两方面来设计监测系统,是一个以深部位移监测为主,地表位移监测和相关诱发因素监测为辅的立体多维监测系统。深部位移变化的监测可以采用深孔张拉线式多点位移监测系统,地表位移的监测可以主要采用静力水准监测系统,通过基于PS-InSAR技术的遥感手段监测区域性地表形变。

5)采空塌陷的发生还和一些诱发因素有关,如地表降水和地下水、爆破震动等,对诱发因素的监测也很有必要。监测系统应该同时监测采空塌陷影响区域的降水量、土壤含水率、地下微震等诱发因素。

6)各监测手段的集成和数据采集、传输、分析等过程可以通过物联网技术进行整合^[5],形成基于物联网技术的采空塌陷影响区智能监测管理系统。

综上所述,通过对采空塌陷影响区域地下及地表位移的监测和采空塌陷诱发因素的监测,可以有效地掌握采空塌陷的发展过程,及时对采空塌陷影响区域的危险进行预警。

基于物联网技术的采空塌陷影响区智能监测管理系统将为解决现阶段城市地下采空塌陷影响区域规划、建设、城市运行等发挥积极作用。

参 考 文 献

- [1] 刘连刚,韦京莲,等.《北京地质灾害》[M].北京:中国大地出版社,2008.
- [2] 马海涛,贺红生,王云海.采空塌陷影响因素分析及颗粒元数值模拟研究[J].矿冶工程,2010(1):137-138.
- [3] 陈国洪,刘云华,单新建. PS-InSAR 技术在北京采空塌陷区地表形变测量中的应用探析[J].中国地质灾害与防治学报 2010,21(2):231-245.
- [4] 李德仁,廖明生,王艳.永久散射体雷达干涉测量技术[J].武汉大学学报(信息科学版),2004(8):28-30.
- [5] 黄来源;浅析城市地下管线现状及基于物联网技术的城市地下管线智能管理系统的构想[J].北京地质工作信息化服务论坛论文集.2010

收稿日期:2011-10-10