



移动扫码阅读

邓喀中,郑美楠,张宏贞,等.关闭矿井次生沉陷研究现状及展望[J].煤炭科学技术,2022,50(5):10-20.  
DENG Kazhong, ZHENG Meinan, ZHANG Hongzhen, et al. Research status and prospect of secondary subsidence in closed mine [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5): 10-20.

# 关闭矿井次生沉陷研究现状及展望

邓喀中<sup>1</sup>,郑美楠<sup>1,2</sup>,张宏贞<sup>1</sup>,范洪冬<sup>1</sup>,谭志祥<sup>1</sup>

(1.中国矿业大学 环境与测绘学院,江苏 徐州 221116;2.安徽理工大学 空间信息与测绘工程学院,安徽 淮南 232001)

**摘要:**我国关闭矿井数量多范围广,矿井关闭后,停止排水,地下水位上升,受地下水影响,覆岩及地表将再次沉陷,危及关闭矿井上方和周边建构建筑物、交通电力通讯等基础设施安全及建设场地稳定性,研究关闭矿井覆岩与地表次生沉陷机理、规律、预测方法具有重要的理论和实用价值。在收集国内外相关文献基础上,结合徐州东西部矿区关闭矿井地面次生沉陷监测实践,系统回顾和分析了关闭矿井地面次生沉陷监测方法、形成机理、时空分布规律及预测方法研究现状和存在的问题。首先,对比研究了常规地面变形监测方法和航天航空测量方法的优缺点,重点总结了合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术应用于关闭矿井地表沉陷监测中的优势及存在的问题;其次,基于国内外大量实测资料,分析总结了关闭矿井覆岩及地表次生沉陷形成机理及时空演化规律,得到了覆岩及地表下沉的主要诱因为采动破裂岩体、覆岩结构及煤(岩)柱在地下水作用下的变形或失稳;覆岩与地表上升的主要诱因为:随着地下水位升高,作用在采动破裂岩体、第四系松散层内的孔隙压力增大,有效应力减小,使其产生弹性恢复变形,膨胀岩体遇水膨胀也可能导致覆岩及地表上升;关闭矿井次生沉陷在时间上可分为5个阶段:①初期稳定阶段;②下沉阶段;③中间稳定阶段;④上升阶段;⑤最终稳定阶段。并分析了不同开采方法、多煤层开采对关闭矿井地表沉陷时空分布规律的影响。在此基础上,基于采动破裂岩体本构关系,分下沉和上升2阶段,分别给出了长壁垮落法、充填开采和柱式开采地表沉陷预测模型。最后指出,关闭矿井覆岩及地表沉陷机理、规律是非常复杂的物理力学过程,涉及地质采矿环境、采动破裂岩体及覆岩结构、本构关系、变形特征、水岩耦合作用、地下水动力效应、膨胀岩体膨胀变形等复杂因素,因此,还需进一步深入研究。

**关键词:**关闭矿井;次生沉陷;沉陷预测;InSAR;沉陷监测

**中图分类号:**TD325    **文献标志码:**R    **文章编号:**0253-2336(2022)05-0010-11

## Research status and prospect of secondary subsidence in closed mine

DENG Kazhong<sup>1</sup>, ZHENG Meinan<sup>1,2</sup>, ZHANG Hongzhen<sup>1</sup>, FAN Hongdong<sup>1</sup>, TAN Zhixiang<sup>1</sup>

(1. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. School of Geomatics, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** The closed mines are a large number and widely distributed in our country. After the mine is closed, the drainage will be stopped and the groundwater level will rise. Affected by the groundwater, the overburden and surface will sink again, endangering the safety of buildings, traffic, power, communication, and other infrastructure, and the stability of the construction site above and around the closed mine. Therefore, studying the mechanism, law and the prediction method of surface secondary subsidence in closed mine has important theoretical and practical significance. Based on the collection of relevant literature at home and abroad, combined with the monitoring results of surface secondary subsidence of closed mines in the eastern and western mining areas of Xuzhou, this paper systematically reviews and analyzes the research status and existing issues of monitoring methods, formation mechanism, temporal-spatial distribution law, and predic-

收稿日期:2021-10-02    责任编辑:朱恩光    DOI:10.13199/j.cnki.est.2021-1403

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51774270);国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项资助项目(2017YFE0107100);江苏省测绘地理信息科研资助项目(JSCHKY201906)

作者简介:邓喀中(1957—),男,四川资中人,教授,博士。

通讯作者:郑美楠(1991—),男,辽宁朝阳人,讲师,博士。E-mail:zmnccumt@126.com

tion methods of surface secondary subsidence of closed mines. Firstly, the advantages and disadvantages of conventional ground deformation monitoring methods and aerospace measurement methods are compared, and the superiority and defect of Interferometric synthetic Aperture Radar (InSAR) technology in surface subsidence monitoring of closed mines are summarized; Secondly, based on a large number of measured data at home and abroad, the formation mechanism and temporal-spatial evolution law of overburden and surface secondary subsidence in closed mines are analyzed and summarized, the main inducing factors of overburden and surface subsidence are obtained, which are the deformation or instability of mining fractured rock mass, overburden structure and coal (rock) pillar under the action of groundwater; The main inducements of overburden and surface uplift are that with the rise of groundwater level, the pore pressure acting on mining fractured rock mass and Quaternary loose layer increases, and the effective stress decreases, resulting in elastic recovery deformation, and the expansion of swelling rock mass in groundwater may also lead to overburden and surface uplift; The secondary subsidence of closed mine can be divided into five stages in time: ① initial stable stage; ② subsidence stage; ③ intermediate stable stage; ④ uplift stage; ⑤ final stable stage, and the influence of different mining methods and multi coal seam mining on the temporal-spatial distribution law of surface subsidence of closed mines is analyzed. On this basis, based on the constitutive relationship of mining fractured rock mass, the prediction models of surface subsidence and uplift of longwall caving mining, filling mining, and pillar mining are given respectively. Finally, we point out that the mechanism and law of overburden and surface subsidence of closed mine are very complex physical and mechanical processes, involving geological mining environment, mining fractured rock mass and overburden structure, constitutive relationship, deformation characteristics, water-rock coupling, groundwater dynamic effect, expansion deformation of swelling rock mass and other factors. The current research is preliminary, therefore, further research is needed.

**Key words:** closed mine; secondary subsidence; subsidence prediction; InSAR; subsidence monitoring

## 0 引言

煤炭是我国的主要能源,占一次能源消耗的60%以上,煤炭开采为国民经济建设提供能源的同时,也导致覆岩及地表沉陷,从而诱发一系列的生态环境与地质灾害问题:使地面标高降低、耕地积水、沙漠化、盐渍化、山体滑移滑坡;使位于沉陷区的建筑物及铁路、公路、电力交通等基础设施受损;疏干含水层等。20世纪80年代,受“有水快流”思想的影响,小煤矿像雨后春笋遍地开花,煤炭生产出现“多、小、散、乱”的格局,我国煤矿达到几万个。小煤矿开采工艺落后,生产管理差,乱采乱掘,煤炭资源浪费严重,安全事故频发。随着国家政策调整,大量煤矿关闭,仅2006—2008年全国公告关闭小煤矿11 618处。为优化煤炭产业结构,在“十二五”期间共淘汰落后煤矿7 100处、产能5.5亿t/a<sup>[1]</sup>。2016年2月国务院印发了《关于煤炭行业化解过剩产能实现脱困发展的意见》,加快了全国关闭煤矿的步伐,我国煤矿从2000年的37 000多处减少到2019年的5 268处,关闭煤矿超过3万处。

矿井关闭后,随着排水设备停运,地下水位上升,将引起严重的环境与地质灾害<sup>[2-6]</sup>:①改变采动破裂岩体的应力和承载能力,导致覆岩与地表次生移动变形。如荷兰煤矿关闭20 a后,地面上升量达125 mm<sup>[7]</sup>;法国北部矿区在停采20余年后,采空区地表仍有沉降发生<sup>[8]</sup>。②软化和破坏煤(岩)柱,使其坍塌,引起矿区地质灾害。如日本宫城县和岩手县褐煤矿关闭后在地震和地下水的影响下造成围岩

和煤柱坍塌导致地面塌陷<sup>[9-10]</sup>。峰峰一矿、二矿工厂下条带开采区,在矿井关闭2 a后,煤柱失稳塌陷,地面建构建筑物严重损害。③造成矿井地下水污染。④矿井瓦斯聚集或溢出导致人员伤亡。如北票矿区地表裂缝与井下老采空区相通后,废气溢出地面,熏死10余人<sup>[6]</sup>。关闭矿井环境与地质灾害已成为制约我国矿业城市社会经济发展的主要原因之一。

地下开采导致覆岩及地表移动变形,在矿井关闭后将遗留大面积的采空沉陷区,据不完全统计,仅我国煤矿开采沉陷区面积达200多hm<sup>2</sup>,且每年以6万~7万hm<sup>2</sup>的速度增加。随着我国社会经济和矿业城市的发展,各种交通通讯基础设施和工民用建筑物不可避免地建在采煤沉陷区上方,如唐山、淮北、徐州、济宁等矿业城市的商业区、居住小区和工业园区等均建在采煤沉陷区上方,山西长治至湖北荆门1 000 kV特高压输电线路、山西至江苏800 kV特高压直流输电线路、京沪、京台、沪昆等高铁、南水北调工程等位于开采沉陷区上方或边缘。矿井关闭后,覆岩和地表次生移动变形将对沉陷区上方及周边的交通、电力、通讯等基础设施和工民用建构建筑物的安全构成威胁,其移动变形大小成为对这些建(构)筑物安全影响评价和采取合理技术措施的关键。因此,研究关闭矿井地表沉陷机理、规律及预测方法具有重要的理论和实际意义。

有别于开采引起的覆岩与地表沉陷,关闭矿井覆岩与地表沉陷是由于矿井关闭,停止排水,地下水

位上升引起采动破裂岩体、覆岩结构及煤柱失稳或再次移动变形,由此定义:矿井关闭后,地下水位上升,受地下水影响,使已处于相对稳定的采动破裂岩体、覆岩结构、煤(岩)柱等再次沉陷,这种非直接采动引起的覆岩及地表沉陷,称为次生沉陷(Secondary Subsidence),包括覆岩与地表沉降和上升。

对于关闭矿井次生沉陷国外进行了一些监测与分析研究,但国内研究较少,为推动我国关闭矿井次生沉陷的研究,下面结合国内外资料及徐州矿区实测研究情况,从关闭矿井次生沉陷监测、机理、规律及预测方法等方面分析研究现状,指出进一步研究的问题,以推动关闭矿井次生沉陷的研究。

## 1 关闭矿井次生沉陷监测研究现状

对于工程及建构筑物变形监测目前主要有常规地面变形监测方法、航天航空测量方法。常规地面变形监测方法包括水准仪、全站仪、GNSS、准直测量、数字近景摄影测量、三维激光扫描等。水准仪、全站仪、GNSS、准直测量等精度高,是目前地面变形监测的首选方法,但监测成本高、劳动强度大,不便于进行大区域地表变形监测。数字近景摄影测量、三维激光扫描可进行面域变形监测,监测范围大、点密度可根据需要设计,但监测精度较低,目前仅能到分米或厘米级。航空航天测量方法包括航空摄影测量、合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)。航空摄影测量目前多采用无人机航空摄影测量系统,其优势是监测范围大、通过图像可再现变形体变形前状态,缺点是监测精度低,仅到分米级,不适合关闭矿井小变形的监测。InSAR技术具有全天时、全天候、广覆盖、高精度监测地表变形的能力,通过SAR的相位信息,以毫米级或亚厘米级精度提取目标区域的变形信息,同时可利用存档SAR数据追溯历史变形信息,是关闭矿井地表沉陷监测经济可靠的方法,也是笔者重点关注的方法。

自1989年,GABRIEL等<sup>[11]</sup>首次论证了合成孔径雷达差分干涉测量技术(DInSAR)技术监测地表微小形变的能力以来,开采沉陷监测便成了DInSAR技术的一个主要应用方向。英国、波兰、法国、德国等国的科研人员进行了大量的试验研究,验证了DInSAR技术监测开采沉陷的可靠性和有效性。

因受时空去相干及大气效应的影响严重,DInSAR技术难以获得长时序高精度的测量结果。

为了实现时间序列地表沉陷监测,自20世纪90年代末以来,国外学者提出了时序InSAR技术,该技术可以抑制干涉图中时空失相关和大气延迟引起的噪声,使变形监测精度达到毫米级<sup>[12-14]</sup>。时序InSAR技术主要有基于单一主影像的最小二乘法<sup>[15-17]</sup>、永久散射体(Persistent Scatterers, PS) InSAR<sup>[18-19]</sup>、干涉点目标分析(Interferometric Point Target Analysis, IPTA)<sup>[20]</sup>、相干目标分析(Coherent Pixels Technique, CPT)<sup>[21]</sup>等;基于多主影像的短基线集(Small Baseline Subset, SBAS)技术<sup>[22]</sup>;以及联合PS和SBAS的StaMPS/SBAS技术<sup>[23]</sup>等,并且各时序InSAR技术在矿区形变监测中均得到了较好的应用。

因时序InSAR技术在植被区域及建筑物较少的非城区所选相干点较少,难以获取完整的地表沉陷信息。为增加时序分析中高相干点数量,2007年,ROCCA<sup>[24]</sup>提出了分布式目标(Distributed Scatterers, DS)概念,用以增加高相干点数量,提高获取地表沉陷的完整性。2011年,FERRETTI等<sup>[25]</sup>将PS和DS相结合,提出了SqueeSAR技术,该技术通过同质像元的识别和相位优化技术增加了相干点目标的数量和密度,提高了时序InSAR技术监测地表沉陷的完整性,扩大了时序InSAR技术的应用范围。2012年,SAMSONOV等<sup>[26]</sup>提出了Multidimensional SBAS(MSBAS)技术,将SBAS技术从解算一维视线向形变拓展到了二维(忽略南北向形变)或三维形变。2013年,SOWTER等<sup>[27]</sup>提出了Intermittent SBAS(ISBAS)方法,选取在部分时间间隔内保持高相干性的点,将其纳入时序InSAR分析中,使在农田、乡村区域获取的形变更完整。

由于时序InSAR技术的发展,国外科研人员大多采用时序InSAR技术监测关闭矿井地面次生沉陷,文献[33]采用DInSAR和PSInSAR技术监测了法国诺德/帕斯德-卡拉伊斯煤田持续开采270 a煤矿的下沉,该矿区于1990年12月21日关闭,监测表明1992—1999年,每年下沉10 mm,然后减小,2004—2007年一些地区下沉3 mm/a。文献[7]采用InSAR监测了荷兰南部关闭煤矿地面次生沉陷,得到如下结论:①开采区断层两侧上升量大小不同,可能与断层两侧地下水上升量大小不同有关;②1992—2009年,邻近的比利时煤矿地面上升220 mm。

虽然近年来,InSAR技术得到长足发展,但由于SAR观测系统轨道误差、信号传播中大气延迟误差、侧视成像条件等的限制,使InSAR技术在开采

沉陷监测的应用中仍存在较多的不足:

1) 矿区大梯度形变获取精度低或无法获取。

虽然子带干涉、Offset\_Tracking 技术部分克服了 InSAR 技术监测大梯度形变的问题,但由于噪声的影响导致 2 种方法监测精度相对较低。

2) 由于关闭矿井地表次生沉陷时间长、量级小, InSAR 技术受大气噪声、DEM 误差影响较大,

使次生沉陷信息与噪声处于同一量级, 难以分离。

3) 矿区通常位于农田植被区, InSAR 技术所选

高相干点较少, 如何获取更多的分布式永久散射体点成为研究的关键。

4) 时序 InSAR 技术多采用线性模型进行解算, 与实际开采沉陷模型不符, 导致模型求解误差。

5) 由于 SAR 系统采用侧视成像、极轨飞行模

式, 使得 InSAR 技术难以有效获取矿区三维形变, 且获取的南北向水平移动精度较低。

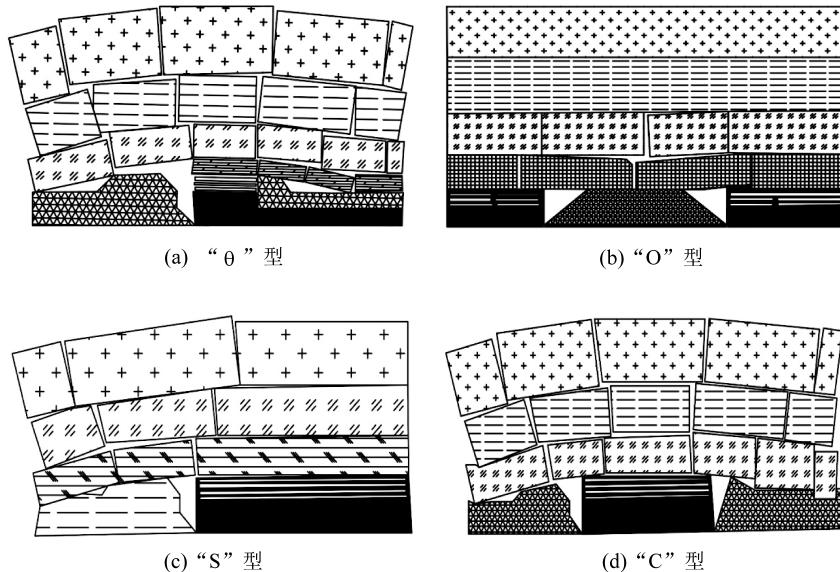


图 1 覆岩空间结构类型<sup>[28]</sup>

Fig.1 Types of spatial structure of overlying strata<sup>[28]</sup>

1) “θ”型结构。为厚煤层分层开采, 煤柱两侧所采分层不同形成的覆岩结构。其变形源为煤柱两侧空洞闭合、垮落岩体再压密和煤柱变形, 但两层空洞大小和垮落岩体高度不同。

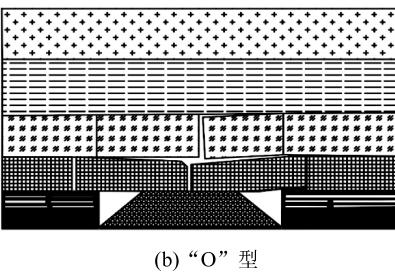
2) “O”型结构。为工作面开采宽度较小, 两边煤柱支撑条件下形成, 顶板岩体虽然垮落, 但未充分压实, 采空区边缘存在较大的空洞, 后期可变形量大。该结构变形主要来源于空洞闭合、垮落岩体再压密、煤柱变形。

3) “S”型结构。一端充分开采, 另一端为煤柱。该结构的特点是覆岩充分垮落, 崩落裂隙带高度大,

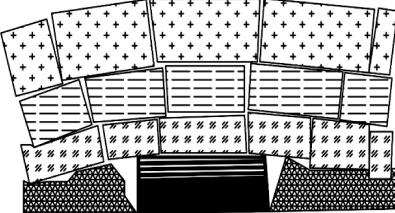
## 2 关闭矿井次生沉陷机理与规律研究现状

### 2.1 关闭矿井覆岩及地表次生沉陷机理研究现状

地下开采破坏了原有的应力平衡, 当工作面推进到一定距离后, 采空区附近岩体在上覆岩体重力作用下, 产生弯曲、断裂和垮落, 在采空区上方形成垮落带、断裂带和弯曲下沉带, 崩落带内岩体破裂碎胀, 存在较多的空隙, 虽然后期在覆岩应力作用下压实, 但始终不能恢复到垮落前状态, 仍保留较多的空隙, 是覆岩及地表长期移动变形的主要变形源。断裂带内岩体断裂, 但总体保持层状, 形成采动覆岩结构支撑上覆岩体。弯曲下沉带内岩体保持完整性, 不存在或较少存在空隙。由于地质采矿环境和开采方式的不同, 采空区上覆岩层在采动的影响下将形成不同的覆岩结构, 姜福兴等<sup>[28]</sup>将采动覆岩空间结构分为中间有支撑的“θ”型、中间无支撑的“O”型、“S”型和“C”型 4 类, 如图 1 所示。



(b) “O”型



(d) “C”型

采空区垮落岩体充分压实, 但煤柱边缘仍存在较大的空洞, 因此, 该结构变形源主要来自垮落岩体空隙再压密、采空区边缘空洞闭合和煤柱变形。

4) “C”型结构。为煤柱两侧工作面均开采, 剩下孤立煤柱支撑上覆岩体, 当煤柱宽度较大时, 煤柱不破坏, 形成煤柱和采空区破裂岩体支撑的覆岩结构, 该结构变形源为煤柱两侧空洞闭合、破裂岩体再压密和煤柱自身变形。

综上可以看出长壁全陷法采空区变形主要来源于 3 个方面: ① 采动破裂岩体空隙在覆岩应力作用下的再压密; ② 残留煤柱变形及失稳引起的覆岩及

地表移动变形;③采动覆岩结构自身变形和失稳导致空洞闭合引起的变形。

对于条带和房柱式开采,由于顶板岩体冒落不充分,存在较大的残留空洞,其变形主要来源于以下2方面:①煤柱在地下水作用下,强度弱化,煤柱失稳破坏导致残留空洞闭合和破裂岩体再压密;②顶板岩体断裂失稳,导致覆岩及地表次生沉陷。

矿井关闭后,地下排水停止,水位上升,在地下水作用下,初期采动覆岩将受到以下方面影响:①采动破裂岩体间摩擦力减小,破裂岩体在覆岩应力作用下再压密,导致覆岩与地表次生移动变形;②地下水将弱化采动覆岩结构的摩擦力,可能导致覆岩结构失稳,使采空区边缘空洞闭合,导致覆岩及地表次生移动变形;③地下水使煤柱强度弱化,导致煤柱失稳,使“C”型、“θ”型结构失稳,空洞闭合和破裂岩体再压密,导致覆岩及地表次生移动变形;④地下水使煤(岩)柱强度弱化,巷道垮塌,引起覆岩及地表次生移动变形;⑤对于条带开采和房柱式开采,地下水使煤柱和顶板强度弱化,导致煤柱、顶板变形和失稳,引起覆岩及地表次生移动变形。

随着地下水位升高,采动破裂岩体内孔隙压力增大,有效应力减小,前期被压缩的破裂岩体受到的有效应力减小,出现回弹上升。同时,随着水位的上升,使松散层含水层水位上升,导致松散层土体孔隙压力增大,有效应力降低,土体出现回弹。另外,当煤系地层中含有高岭土、蒙脱石等膨胀岩体时,可遇水膨胀,导致覆岩及地表出现上升。

以上分析表明,关闭矿井覆岩及地表沉陷可分为2阶段:下沉阶段和上升阶段。在矿井关闭初期,水位上升,导致采动破裂岩体再压密、采动覆岩结构及煤柱失稳、煤柱再压缩、柱式开采顶板塌落等,使覆岩及地表产生下沉。当水位达到一定高度后,采动破裂岩体及松散层内孔隙压力增大,有效应力降低,采动破裂岩体及松散层出现回弹、膨胀岩体遇水膨胀,使覆岩及地表上升。

矿井关闭后,下沉阶段是普遍存在的,而上升阶段则与地下水位高低、松散层特性、覆岩中是否含有膨胀性岩石有关,当地下水位不能到达松散层时,松散层内孔隙压力不变化,不会导致松散层回弹。当地下水位达不到含有较高高岭土、蒙脱石的岩体时,不会导致这些岩石膨胀,也不会使覆岩及地表上升。当地下水的压力较小,使采动破裂岩体的孔隙压力增加较小,虽然可使破裂岩体出现微小回弹,但覆岩可能吸收部分回弹量,使地表不出现上升现象。

综上,关闭矿井覆岩及地表次生沉陷可分为下

沉阶段和上升阶段,2阶段既有联系也有区别,因此,研究关闭矿井覆岩及地表次生沉陷规律应分为下沉和上升2阶段,分别研究其移动变形规律。

## 2.2 关闭矿井覆岩及地表次生沉陷规律研究

国内外对关闭矿井次生沉陷进行了一些监测,获得了大量实测资料,图2为郑美楠<sup>[29]</sup>基于2016年10月4日至2019年10月25日88景升轨Sentinel-1A数据及StaMDS方法获取的徐州西部某矿井关闭后地表次生沉陷信息,从图2可见,在关闭初期,地表开始沉降,沉降一定时间后,出现稳定,然后上升,到最终稳定。国外监测也呈现这一规律,关闭矿井次生沉陷可分为5个阶段:①初期稳定阶段;②下沉阶段;③中间稳定阶段;④上升阶段;⑤最终稳定阶段。关闭矿井地表次生沉陷呈“V”形。

前面的分析表明,关闭矿井覆岩与地表次生沉陷来源于地下水对长壁垮落法开采采动破裂岩体、覆岩结构、柱式采空区顶板和煤柱稳定性等的影响,开采厚度越大,采动破裂岩体高度越高,受到地下水影响后,其覆岩及地表次生沉陷量越大,覆岩与地表次生沉陷量与开采厚度成线性或非线性增大关系。在空间上,长壁全部垮落法开采,采空区中心次生沉陷主要是采动破裂岩体受水弱化,强度和变形模量降低,重新压实的结果。当地下水位均匀上升时,覆岩与地表次生沉陷随时间近于线性变化。在采空区边缘,由于采动覆岩结构受地下水作用后失稳,这种覆岩结构失稳引起的覆岩及地表次生沉陷可能出现瞬时加速现象,随时间呈现非线性变化,同样,对于柱式开采采空区,覆岩与地表次生沉陷也可出现加速沉陷现象。

图3为徐州西部某矿长壁垮落法和条带开采区在矿井关闭后地表下沉对比。图3a中点JH1、JH2和JH3位于长壁垮落法开采上方,由图3可见地表下沉较均匀,各点下方工作面开采情况见表1。从表1可见,JH1下方开采3层煤,开采深度1 016、970、857 m,JH2点下方开采了2层煤,开采深度分别为1 050、965 m,JH3点下方开采了3层煤,开采深度分别为634、610、517 m,对比图3a中各点下沉可知,JH1下沉速度最大,JH3下沉速度最小,其原因是JH1下方工作面开采时间晚、采深大,采动破裂岩体残余下沉相对较大,且地下水回升早,因此,在地下水的影响下,地表下沉大。而JH3下方工作面开采时间早、采深小,监测期内地下水可能尚未完全影响其下的采动破裂岩体,故其地表次生沉陷量相对较小。图3b中点JH4、JH5和JH6下方为条带开采,采宽34~45 m,留宽44~46 m,从图3可见,

2016-10-04—2018-08-19 地表次生沉降量小,2018年8月19日后地表次生沉陷量突然增大,可能是由于该区域开采深度小,在2018年8月前地下水尚未影响到采空区,使得地表次生沉降量小;到2018年8月后地下水影响到采空区,条带煤柱受地下水作用,其强度及变形模量减小,使煤柱失

稳或变形增大,从而使覆岩与地表沉陷加剧,到一定时间后再趋于稳定,地表次生沉降量减小。文献[36]给出英国 Bedlington 矿(1971年关闭),关闭19~23 a后煤柱和顶板失稳,导致地面沉降;英国 Ryhope(1966年关闭)矿在关闭32 a后报告了20次地面震动。

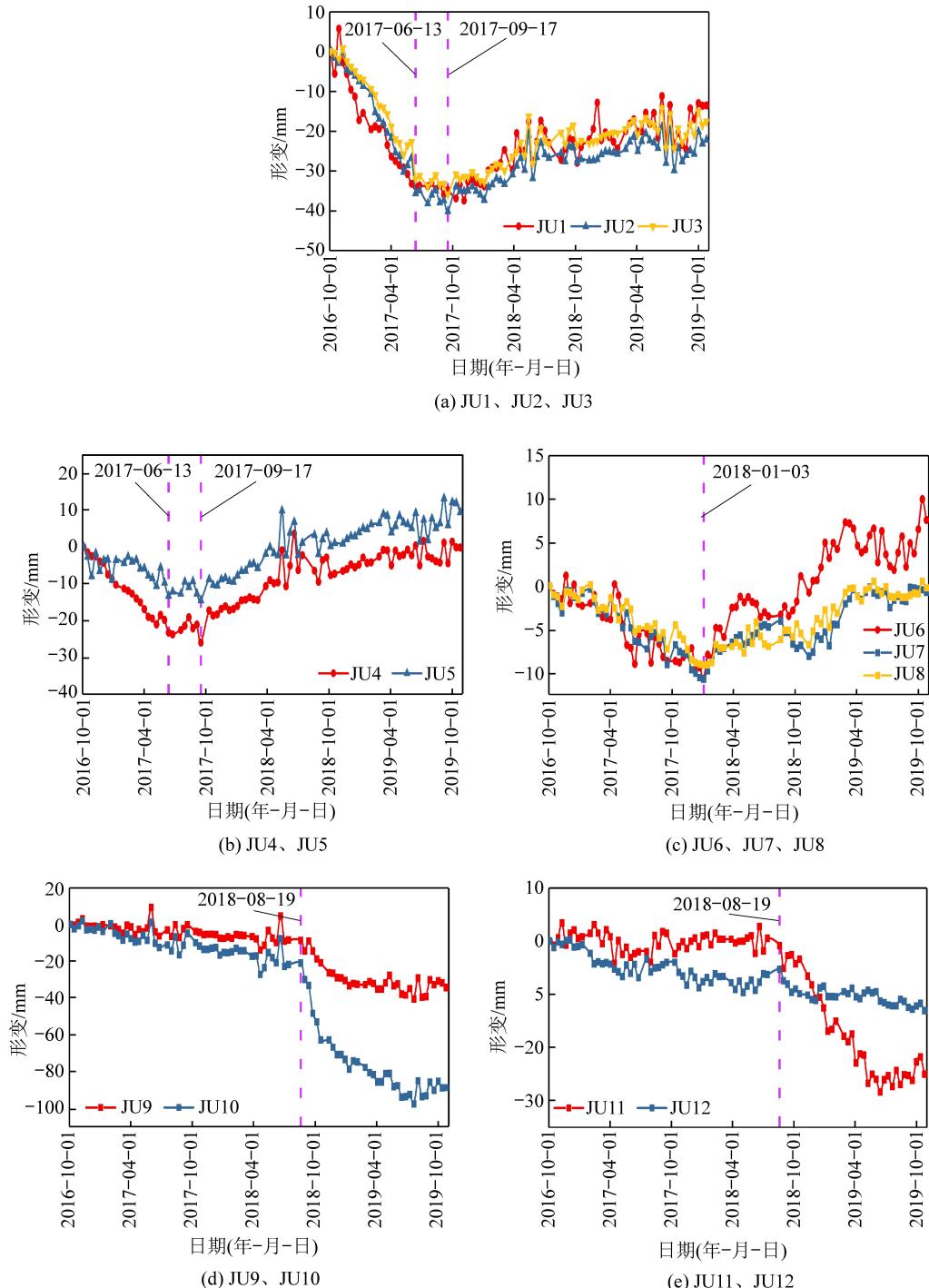


图2 某矿关闭后所选12个点时序沉陷分布

Fig.2 Time series deformation of 12 selected points after a mine closure

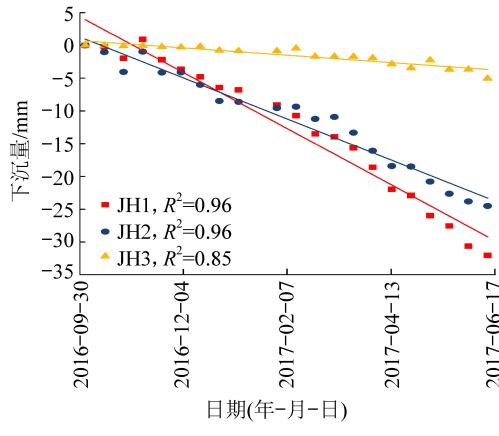
图4为徐州西部某矿2017年9月17日以后地表上升情况。从图4可见,2017年9月17日JH1

和JH2点开始上升,2018年1月3日JH3点开始上升,从表1中可见,JH1、JH2下方工作面开采深度大

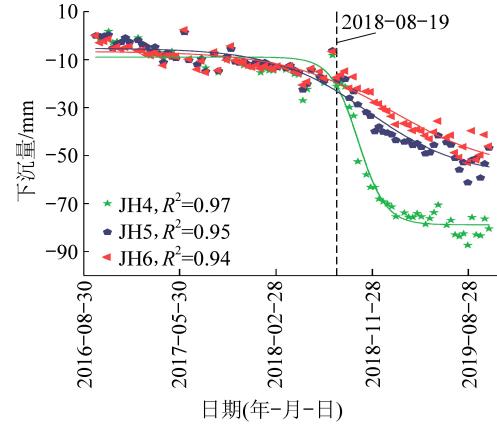
于JH3下方工作面开采深度,先于JH3点受到地下水影响,孔隙压力也更大,因此,JH1和JH2点采动破裂岩体在孔隙压力作用下先回弹上升,然后逐渐发展到浅部的JH3点,使JH3点出现上升。从地表点上升量大小来看,JH1初期小于JH2,原因是JH2点下方工作面开采深度大于JH1点下方工作面开采深度,使其受到的孔隙压力更大,上升量更大。2019年8月28日后JH1点上升加速,且出现上升

量大于JH2点上升,原因是地下水开始影响JH1的2煤采空区,使其上升量增加。JH3点下方虽然也开采了3个工作面,但其下方工作面开采深度小,受到的孔隙压力小,导致其上升量较JH1、JH2小。

从图4中还可以看出JH1、JH2、JH3三个点在上升期间均存在上升速率“放缓”或“下沉”现象,这是由于多煤开采下煤层上升和上煤层下沉叠加的结果。



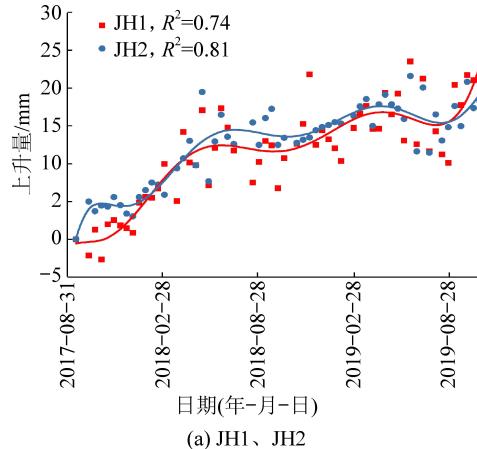
(a) 长壁垮落法开采关闭后地表下沉



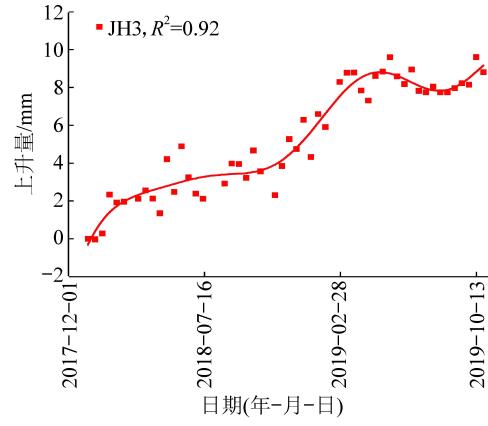
(b) 条带开采关闭后地表下沉

图3 长壁垮落法与条带开采下沉对比

Fig.3 Comparison of subsidence between longwall caving method and strip mining



(a) JH1、JH2



(b) JH3

图4 多煤层开采下,点JH1、JH2和JH3上升情况

Fig.4 Uplift of JH1, JH2 and JH3 under multi-seam mining

表1 各点下方工作面开采情况

Table 1 Mining condition of working face below each point

点号	工作面	开采时间 (年-月)	开采厚度/ m	开采深度/ m	点号	工作面	开采时间 (年-月)	开采厚度/ m	开采深度/ m
JH1	9445	2009-06	2.8	1 016	JH3	9422	2000-03	2.7	634
	7445	2007-03	2.1	970		7422	1999-03	2.1	610
	2443	2006-06	2.0	857		2422	2002-03	1.9	517
JH2	2442	2010-06	2.3	1 050	JH6	7214	2015-02	2.7	390
	7444	2010-03	1.8	965		7216	2015-01	2.7	410
JH4、JH5	7218	2015-04	2.6	427					

对于多煤层开采,由于上下煤层采动破裂岩体受地下水作用时间不同,下煤层采动破裂岩体、覆岩结构首先受地下水作用,覆岩与地表下沉,当地下水位上升到一定高度后,下煤层采动破裂岩体、覆岩结构受到的孔隙压力增大,使下煤层采动破裂岩体、覆岩结构出现上升。同时,地下水到达上煤层采空区后,使上煤层采动破裂岩体、覆岩结构出现下沉,存在上煤层采动破裂岩体、覆岩结构下沉和下煤层采动破裂岩体、覆岩结构上升叠加现象,减小了覆岩与地表次生沉陷量,叠加后的覆岩与地表是上升还是下沉取决于上下煤层开采厚度和层间距,当层间距小时,下层煤采动破裂岩体、覆岩结构尚未出现上升,两层煤下沉叠加,不会减小覆岩及地表次生沉陷量,当煤层间距较大,下层煤上升和上层煤下沉完全叠加,是出现上升还是下沉取决于上下煤层的上升量和下沉量。

从以上可以看出,国内外通过大量研究,初步得到了关闭矿井地表次生沉陷规律,但尚有以下问题需要深入研究:

1)采动破裂岩体是关闭矿井覆岩及地表次生沉陷的主要因素,目前对采动破裂岩体本构关系、力学特征、水岩耦合机理及与地下水动力效应等的关系缺乏系统深入研究,同时,不同地质采矿条件下,采动破裂岩体分布规律等也研究不够。

2)采动覆岩结构是关闭矿井次生沉陷又一主要变形源,不同地质采矿条件下,采动覆岩结构特征、稳定性、影响因素及与采动破裂岩体协同作用机理等缺乏深入研究。

3)地质采矿条件对采动破裂岩体、覆岩结构等影响较大,次生沉陷量与覆岩岩性、倾角、开采厚度、开采深度、地质构造等关系需要进一步研究。

4)多煤层开采覆岩及地表次生沉陷机理、规律涉及上下煤层间距、采深采厚、上下采空区位置关系、多煤层采动覆岩结构、地下水上升速度等,需要深入研究。

5)柱式开采采空区顶板、煤(岩)柱受水作用变形机理、规律、稳定性等需要深入研究。

6)目前对关闭矿井覆岩及地表沉降和上升机理、规律研究较多,对于水平移动、水平变形机理与规律缺乏研究。

7)关闭矿井覆岩中膨胀岩体遇水膨胀机理、规律需要深入研究等。

### 3 关闭矿井次生沉陷预测研究

关闭矿井采动破裂岩体、覆岩结构、煤柱等在地

下水作用下产生次生沉陷(沉降或上升),由于关闭矿井次生沉降与上升机理不同,应分开建立预测模型。

#### 3.1 关闭矿井次生沉降量预测

国内外的研究表明,次生沉降主要与垮落带高度有关,因此,次生沉降可采用下式计算:

$$W_m = K_1 h_m \quad (1)$$

式中: $W_m$ 为关闭矿井次生沉降量,mm; $K_1$ 为与岩性有关的系数; $h_m$ 为垮落带高度,m。

文献[29]根据 SALAMON<sup>[30]</sup>给出的采空区内破裂岩体应力应变关系和 YAVUZ<sup>[31]</sup>给出的初始变形模量 $E_0$ 与碎胀系数 $k_0$ 、破裂岩体抗压强度之间的关系:

$$\sigma = \frac{E_0 \varepsilon}{1 - \varepsilon / \varepsilon_m} \quad (2)$$

$$E_0 = \frac{10.39 \sigma_c^{1.042}}{k_0^{7.7}} = 10.39 \sigma_c^{1.042} (1 - \varepsilon_m)^{7.7} \quad (3)$$

式中: $\sigma$ 为轴向应力,MPa; $E_0$ 为岩体初始变形模量,MPa; $\varepsilon$ 为轴向应变; $\varepsilon_m$ 为破裂岩体恢复至原始体积可能产生的最大应变; $\sigma_c$ 为破裂岩体抗压强度,MPa; $k_0$ 为采动破裂岩体碎胀系数。

结合采动破裂岩体本构关系及垮落带高度、覆岩应力等建立了关闭矿井最大下沉量预测模型:

$$w_m = h_m \Delta \varepsilon = \frac{100 \gamma_r H h_m \varepsilon_m^2 (E_0 - E_w)}{(100 E_0 \varepsilon_m + \gamma_r H) (100 E_0 \varepsilon_m + \gamma_r H)} \quad (4)$$

式中: $\gamma_r$ 为覆岩平均密度,t/m<sup>3</sup>; $H$ 为开采深度,m; $E_w$ 为破裂岩体受水作用后的变形模量,MPa。

对于充填开采,其变形机理与长壁垮落法开采相同,仅将垮落带高度变为开采煤层厚度、采动破裂岩体变形模量变为充填体变形模量,可采用上述方法分析计算关闭矿井充填开采次生沉降量。

对于柱式开采次生沉降计算,可考虑2种情况:①当深厚比小于30时,地表可能出现非连续沉降,无法预测沉降量的大小;②当深厚比大于30时,地表呈现连续移动变形,此时仍有2种情况:煤柱失稳,采空区垮落,此时可采用等效厚度法预测地面沉降;当煤柱稳定时,可认为煤柱受水影响变形模量降低,从而在覆岩应力作用下,产生次生沉降,其预测方法如下:

$$w_z = \frac{E_c - E_{cw}}{E_c E_{cw}} \sigma M \quad (5)$$

式中: $w_z$ 为煤柱软化后引起的覆岩及地表沉降量,mm; $M$ 为开采厚度,mm; $E_c$ 、 $E_{cw}$ 分别为煤柱原始变

形模量和遇水软化后的变形模量, MPa;  $\sigma$  为条带或房柱开采时煤柱承受的应力, MPa。

### 3.2 关闭矿井地面上升量预测

关闭矿井覆岩及地表上升主要由于关闭矿井采动破裂岩体、松散层等随地下水位上升, 孔隙压力增大, 有效应力降低, 导致覆岩及地表回弹。国内外大量实测表明, 关闭矿井地表上升量与地下水位回升高度、开采煤层厚度等有关, 其关系如下:

$$\begin{aligned} w_s &= k(H_w - H), H_w > H \\ w_s &= 0, H_w \leq H \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $w_s$  为关闭矿井地面上升量, mm;  $k$  为系数, 根据实测资料确定, 无实测资料时, 取  $k=0.2\sim1.0$ , 累计开采厚度越大,  $k$  越大;  $H_w$  为关闭矿井水位回升标高, m。

文献[7]通过比利时煤田监测数据回归得到  $k=0.4\sim0.71$ ; 文献[35]通过对波兰铜矿、石膏矿的监测, 分析得水位上升 1 m, 地面上升 0.556 mm; 文献[36]通过英国诺森伯兰郡和达勒姆煤田监测分析, 得到地下水上升 1 m, 地面上升 0.8 mm; 文献[29]给出的徐州韩桥矿地面上升量与水位的关系如图 5 所示, 两者呈线性关系, 回归系数  $k=0.15$ 。WESOŁOWSKI<sup>[32]</sup>分析认为地面最大上升量可达开采时地面最大下沉量的 8%。

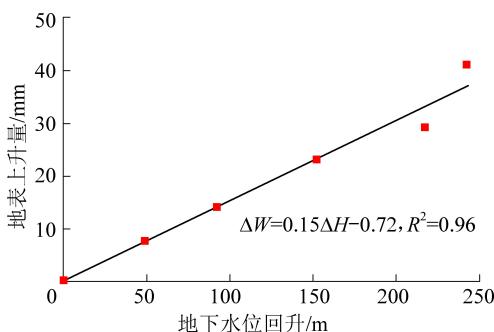


图 5 地下水位回升与地表上升回归分析

Fig.5 Regression analysis of groundwater level rebounding and surface uplift

与关闭矿井覆岩与地表沉降相似, 覆岩与地表上升可根据采动破裂岩体本构关系和太沙基理论构建。郑美楠<sup>[29]</sup>根据采动破裂岩体本构关系、太沙基孔隙压力理论、覆岩破裂高度等, 给出了长壁垮落法开采覆岩及地表上升量计算式:

$$W_p = \frac{100\gamma_w(H - H_w)E_w\epsilon_m^2h_m}{(100E_w\epsilon_m + \gamma_iH)[100E_w\epsilon_m + \gamma_rH - \gamma_w(H - H_w)]} \quad (7)$$

式中:  $W_p$  为地下水作用下, 覆岩与地表上升量, m;  $\gamma_w$  为水的密度, t/m<sup>3</sup>。

MATEUSZ DUDEK<sup>[32]</sup>首先给出了破裂岩体的本构关系和采动破裂岩体变形模量为原始岩体变形模量的 0.02~0.04 倍, 然后认为地下水上升相当于增加了覆岩浮力, 减小了作用在破裂岩体上的覆岩应力, 基于反分析方法得到模拟计算参数, 通过原岩场阶段、采动阶段和地下水上升阶段的模拟计算, 得到了地下开采各阶段地表下沉和上升量, 结果与现场实测规律相近。还有一些文献采用太沙基孔隙压力理论模拟计算覆岩及地表的上升量。

对于充填开采地表上升量预测可采用式(7), 仅采用不同的参数, 如将垮落带高度变为开采厚度、破裂岩体变形模量变为充填体变形模量。

文献[29]给出了柱式开采采空区地表上升量预测公式。

#### 1) 条带开采

$$W_t = \frac{0.01\gamma_w(H - H_w)(a + b)M}{(a - 0.01MH)E_{cw}} \quad (8)$$

式中:  $W_t$  为矿井关闭后, 条带开采区地表上升量, m;  $M$  为开采厚度, m;  $a, b$  分别为留宽和采宽, m;  $E_{cw}$  为煤柱受地下水作用后的变形模量, MPa。

#### 2) 房柱式开采

$$W_f = \frac{0.01\gamma_w(H - H_w)(a_0 + s)(b_0 + s)}{a_0b_0E_{fw}}M \quad (9)$$

式中:  $W_f$  为地下水作用下, 房柱开采区覆岩及地表上升量, mm;  $a_0, b_0$  分别为房柱的长度与宽度, m;  $s$  为房宽, m;  $E_{fw}$  为房柱受水作用后的变形模量, MPa。

以上分析可以看出, 目前关闭矿井次生沉陷预测研究尚处于起步阶段, 存在以下问题: ①考虑的因素相对单一, 目前大多数方法仅考虑了采动破裂岩体对覆岩及地表次生沉陷量的影响, 未考虑采动覆岩结构、地质构造等的影响; ②现有方法假定采动破裂岩体高度、变形特征等在采空区中的分布是均匀的, 实际上, 采动破裂岩体在采空区中心压实程度更高、变形模量更大, 而在采空区边缘压实程度更低、变形模量更小, 如何考虑这一影响需要进一步研究; ③采空区边缘形成的采动覆岩结构对覆岩及地表次生沉陷有较大的影响, 不同地质采矿条件下, 采动覆岩结构不同, 在地下水作用, 其引起的覆岩及地表次生沉陷量不同, 研究不同地质采矿条件下, 覆岩结构特征及受地下水作用的稳定性、变形机理、规律是需要解决的另一问题; ④现有方法未考虑倾斜煤层、急倾斜煤层采动破裂岩体高度在采空区上下山分布的差异, 一般来说, 上山方向采动破裂岩体高度总是高于下山方向, 由此可见, 现有方法不适用于倾斜、急倾斜煤层开采关闭矿井次生沉陷预测, 需进一步研

究完善;⑤关闭矿井多煤层开采次生沉陷预测研究不充分,虽然文献[29]给出了多煤层开采次生沉陷预测方法,但采动破裂岩体受地下水作用,其变形具有一定滞后性(初期稳定阶段),多煤层开采涉及下煤层上升与上煤层下沉叠加,进行动态预测时,如何确定上煤层下沉时间、下沉量尚需要进一步研究;⑥目前的预测方法仅给出了最大次生沉陷量预测,不能进行分布区域的预测,将最大次生沉陷量作为等效开采厚度能否采用现有的开采沉陷预测方法进行预测是需要进一步研究等。

## 4 结 论

1) InSAR 技术是监测关闭矿井地表次生沉陷经济有效的方法,今后应加强长时序 SAR 影像噪声去除方法、植被覆盖区 DS 点选取方法、融合非线性模型的时序 InSAR 技术及大梯度形变 InSAR 高精度获取方法等的研究,提高 InSAR 技术获取次生沉陷的能力和精度。

2) 关闭矿井次生沉陷与采动破裂岩体、采动覆岩结构等有关,深入研究采动破裂岩体本构关系、变形特征、水岩耦合作用机理及不同地质采矿条件下,采动破裂岩体、覆岩结构分布规律与分布特征,是关闭矿井覆岩及地表沉陷机理、规律和预测方法研究的基础。

3) 目前对关闭矿井覆岩及地表次生沉陷机理、规律认识尚不完善,有必要结合地面次生沉陷监测数据、地质采矿和地下水观测等资料,深入分析研究覆岩与地表次生沉陷时空分布规律与顶板管理方法、覆岩岩性、关键层层位、采深、采厚、煤层倾角、上下煤层关系、采空区空间分布、地下水动力效应等的关系,明确关闭矿井覆岩与地表次生沉陷时空分布规律和机理。

4) 应在深入研究关闭矿井采动破裂岩体本构关系、采动覆岩结构和水岩耦合作用机理、地下水动力效应等基础上,明确地下水对采动破裂岩体、煤(岩)柱力学特性等的影响机理和规律,结合非线性动力学理论,分下沉和上升 2 阶段分别建立长壁全陷法开采、柱式开采、充填开采及多煤层开采覆岩与地表下沉和上升预测模型,为关闭矿井地表沉陷灾害评估奠定理论基础。

5) 应深入研究不同膨胀岩体遇水膨胀机理、规律及本构关系,建立膨胀岩体膨胀引起的覆岩及地表上升预测方法。同时,应深入研究地下水回升对松散层的影响,研究其回弹上升规律及预测方法。

6) 关闭矿井地下水渗流涉及采动破裂岩体、采

动裂隙、离层等非常复杂的介质,同时,还有巷道、采空区边缘空洞等,其渗流介质、渗流通道复杂,对此研究不足,有必要在深入研究关闭矿井地下水渗流规律、动力效应基础上,明确关闭矿井地下水渗流规律、水岩耦合作用机理、规律及对采动破裂岩体、煤岩力学特性等的影响,为次生沉陷机理、规律、预测方法等研究提供理论支撑。

## 参考文献(References):

- [1] 国家发展改革委,国家能源局.煤炭工业发展“十三五”规划[R]. 2016.
- [2] 戚 鹏,尚 煜.废弃矿井的生态环境问题及治理对策[J].生态经济,2015,31(7):136-139.  
QI Peng, SHANG Yu. Research on ecological problems and countermeasures of abandoned coal mines [J]. Ecological Economy, 2015, 31(7): 136-139.
- [3] 崔希民,缪协兴.论煤矿环境地质灾害与防治[J].煤矿环境保护,2000,14(5):20-23.  
CUI Ximin, MIAO Xiexing. Geological calamity and its prevention [J]. Coal Mine Environmental Protection, 2000, 14(5): 20-23.
- [4] 冯东梅.闭矿后矿区环境地质灾害分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2002,21(4):526-527.  
FENG Dongmei. Analyses of envirogeological disasters of closed coal mines [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2002, 21(4): 526-527.
- [5] 虎维岳,周建军,闫兰英.废弃矿井水位回弹致环境与安全灾害分析废弃矿井水位回弹致环境与安全灾害分析[J].西安科技大学学报,2010,30(4):436-440.  
HU Weiyue, ZHOU Jianjun, YAN Lanying. Study on environment and safety disasters from abandoned coalmines [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2010, 30 (4): 436-440.
- [6] 王来贵,潘一山,赵 娜.废弃矿山的安全与环境灾害问题及其系统科学研究方法[J].渤海大学学报(自然科学版),2007,28(2):97-101.  
WANG Laigui, PAN Yishan, ZHAO Na. Safety and environment hazard problem and research method of system science of discarded mine [J]. Journal of Bohai University (Natural Science Edition), 2007, 28 (2): 97-101.
- [7] MIGUEL Caro Cuenca, ANDREW J Hooper, RAMON F Hanssen. Surface deformation induced by water influx in the abandoned coal mines in Limburg, the Netherlands observed by satellite radar interferometry[J]. Journal of Applied Geophysics, 2013, 88:1-11.
- [8] GUÉGUEN Y, DEFFONTAINES B, FRUNEAU B, et al. Planche-nault. Monitoring residual mining subsidence of Nord/Pas-de-Calais coal basin from differential and Persistent Scatterer Interferometry (Northern France) [J]. Journal of Applied Geophysics, 2009, 69(1):24-34.
- [9] AYDAN Ö, KAWAMOTO T. The damage to abandoned lignite mines caused by the 2003 Miyagi- Hokubu earthquake and some considerations on its causes [C]//Proceedings of the ISRM International Symposium 3rd ARMS, Ohnishi & Aoki, 2004.

- [10] AYDAN Ö, ITO T. The effect of the depth and groundwater on the formation of sinkholes or ground subsidence associated with abandoned room and pillar lignite mines under static and dynamic conditions [C]//Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 2015, 372: 281–284.
- [11] GABRIEL A K, ZEBKER H A, GOLDSTEIN R M. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94 (B7): 9183–9191.
- [12] 张红, 王超, 吴涛, 等. 基于相干目标的DInSAR方法研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [13] 陈富龙, 林晖, 程世来. 星载雷达干涉测量及时间序列分析的原理、方法与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [14] 廖明生, 王腾. 时间序列InSAR技术与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [15] USAI S. A least-squares approach for long-term monitoring of deformations with differential SAR interferometry [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002.
- [16] USAI S. A New Approach for longterm monitoring of deformations by differential SAR interferometry [J]. Delft University Press, 2001.
- [17] USAI S. A least squares database approach for SAR interferometric data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(4): 753–760.
- [18] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Non-linear subsidence rate estimation using permanent scatters in differential SAR interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2202–2212.
- [19] FERRETTI A, CLAUDIO P, ROCCA A. Permanent scatters in SAR Interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, 2001, 39(1): 8–20.
- [20] WERNER C, WEGMULLER U, STROZZI T. Interferometric point target analysis for deformation mapping [J]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2003: 4362–4364.
- [21] BLANCO-SÁNCHEZ P, MALLORQUÍ J, DUQUE S. The Coherent Pixels Technique (CPT): an advanced DInSAR technique for nonlinear deformation monitoring [J]. *Pure & Applied Geophysics*, 2008, 165 (6): 1167–1193.
- [22] BERARDINO P, FORNARO G, LANARI R. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 40 (11): 2375–2383.
- [23] HOOPER A. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35 (16): 96–106.
- [24] ROCCA F. Modeling interferogram stacks [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45 (10): 3289–3299.
- [25] FERRETTI A, FUMAGALLI A, NOVALI F, et al. A new algorithm for processing interferometric data – stacks: SqueeSAR [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49 (9): 3460–3470.
- [26] SAMSONOV S, D'OREYE N. Multidimensional time-series analysis of ground deformation from multiple InSAR data sets applied to Virunga Volcanic Province [J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 191 (3): 1095–1108.
- [27] SOWTER A, BATESON L, STRANGE P, et al. DInSAR estimation of land motion using intermittent coherence with application to the South Derbyshire and Leicestershire coalfields [J]. *Remote Sensing Letters*, 2013, 4 (10): 979–987.
- [28] 姜福兴, 张兴民, 杨淑华. 长壁采场覆岩空间结构探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (5): 979–979.
- [29] JIANG Fuxing, ZHANG Xingmin, YANG Shuhua. Discussion on overlying strata spatial structures of longwall in coal mine [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25 (5): 979–979.
- [30] 郑美楠. 基于InSAR的关闭矿井地表沉陷机理、规律及预测模型研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- [31] ZHENG Meinan. Study on the mechanism, law and prediction model of surface subsidence in closed mine based on InSAR [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [32] SALAMON MDG. Mechanism of caving in longwall mining. *Rock Mechanics Contributions and Challenges* [C]//Proceedings of the 31st US Symposium, Golden, 1990: 161–168.
- [33] YAVUZ H. An estimation method for cover pressure re-establishment distance and pressure distribution in the goaf of longwall coal mines [J]. 2004, 41 (2): 193–205.
- [34] MATEUSZ Dudek, KRYSZTOF Tajdus, RAFAŁ Misa, et al. Predicting of land surface uplift caused by the flooding of underground coal mines – A case study [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2020 (132): 104377.
- [35] GUÉGUEN Y, DEFFONTAINES B, FRUNEAU B, et al. Monitoring residual mining subsidence of Nord/Pas-de-Calais coal basin from differential and persistent scatterer interferometry (Northern France) [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2009 (69): 24–34.
- [36] ANDRÉ Vervoort, PIERRE-YVES Declercq. Upward surface movement above deep coal mines after closure and flooding of underground workings [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2018 (28): 53–59.
- [37] AGNIESZKA A, MALINOWSKA, WOJCIECH T, et al. Satellite-based monitoring and modeling of ground movements caused by water rebound [J]. *Remote Sensing*, 2020 (12): 1786.
- [38] DAVID Gee, LUKE Bateson, ANDREW Sowter, et al. Ground motion in areas of abandoned mining: application of the Intermittent SBAS (ISBAS) to the Northumberland and Durham coalfield, UK [J]. *Geosciences*, 2017, 7 (3): 85.