

宁夏羊场湾煤矿浅埋煤层开采地面塌陷发育规律及形成机理

谢晓深¹, 侯恩科¹, 高冠杰¹, 徐友宁², 魏启明³, 刘江斌³

XIE Xiaoshen¹, HOU Enke¹, GAO Guanjie¹, XU Youning², WEI Qiming³, LIU Jiangbin³

1. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054;

2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;

3. 神华宁夏煤业集团宁煤羊场湾煤矿, 宁夏 灵武 751400

1. College of Geology and the Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

3. Yangchangwan Mine, Shenhua Ningxia Coal Mining Group, Lingwu 751400, Ningxia, China

摘要:以宁夏羊场湾煤矿Y110207工作面为研究对象,采用无人机遥感技术、野外调查与有限差分软件模拟方法研究浅埋煤层开采的地面塌陷类型、发育规律及其形成机理。①浅埋煤层开采地面塌陷以地表裂缝发育为主,地表破坏严重。②平行切眼裂缝间隔性出现,展布于整个工作面内,间隔距离为10~120m,局部裂缝形成错台高度约为15cm。平行顺槽裂缝为拉张型裂缝,发育在顺槽至外围一定范围。③采煤活动导致地下形成采空区,上覆岩层发生移动破坏,破坏区分为剪切破坏区、拉张破坏区及剪-拉破坏区,分别对压应力区、拉应力区和压-拉转化区。④当应力扰动传递至地表,应力值超过覆盖层抗拉强度时地表产生裂缝。随着工作面推进,覆岩内部裂缝带上行裂缝与地表下行裂缝贯通,形成错台。研究成果丰富了该区浅埋煤层的地面塌陷理论知识,为地面塌陷防治提供了理论依据。

关键词:羊场湾煤矿;浅埋煤层;地面塌陷机理;无人机遥感

中图分类号:P618.11;P694 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2018)12-2233-08

Xie X S, Hou E K, Gao G J, Xu Y N, Wei Q M, Liu J B. A study of the development regularity and formation mechanism of ground subsidence in shallow coal seam mining of Yangchangwan coal mine, Ningxia. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37 (12):2233-2240

Abstract: The mechanism of ground subsidence induced by coal mining is an important theoretical basis for the prevention and is also one of the hotspots in the study of geological environment. Subsidence type, features and the mechanism were studied by methods of the UAV remote sensing technology, field observation and numerical simulation software on the Y110207 working face in Yangchangwan coal mine, Ningxia. The results show that, during shallow coal seam mining, cracks and surface collapses are developed, which cause ground surface destruction. In the working face, the parallel cutting cracks are distributed with an interval distance between 10~120m. The parallel channel fracture is a tensile fracture, which is developed in a certain range from the trough to the periphery. The coal mining activities lead to the move and destruction of the overlying strata. The damage can be divided into three types, i.e., shear failure zone, tensile failure zone and shear-tensile failure zone, corresponding to compressive stress region, tensile

收稿日期:2018-01-10;修订日期:2018-06-20

资助项目:中国地质调查局项目《秦岭及宁东矿产资源集中开采区地质环境调查》(编号:DD20160336)和国家自然科学基金项目《煤层顶板突水机理及突水危险性分区预测研究》(批准号:41472234)

作者简介:谢晓深(1992-),男,在读博士生,从事煤矿区地质灾害防治研究工作。E-mail: 957184158@qq.com

通讯作者:侯恩科(1963-),男,教授,博士生导师,从事煤炭地质、矿区地质灾害和矿井水害防治方面的教学与科研工作。

E-mail: houek@xust.edu.cn

stress zone and compression tensile transition zone. When the stress is more than the tensile strength of the covering layer transferring to the surface, the cracks will occur. With the advancing of the working face, the water flowing fracture zone will develop to the surface. After that cracks will perforate and the staggered platform will emerge. It enriches the theoretical knowledge of ground subsidence in shallow coal seam and provides a theoretical for the prevention.

Key words: Yangchangwan coal mine; shallow seam; mechanism of ground subsidence; UAV remote sensing formation mechanism

随着“绿色矿山”建设的推广,煤矿区生态环境的治理、保护和预防成为政府、社会关注的焦点^[1-3]。煤炭大规模的开采引起的地面塌陷是矿山环境损害的重要组成部分。地表沉陷、地表裂缝、塌陷坑(槽)是地面塌陷最主要的表现形式^[4]。其中地表裂缝、塌陷坑(槽)造成土地开裂、基础设施垮塌、植被死亡、地下水水位下降等现象,对矿区环境破坏尤为严重^[5-7]。

地表裂缝是矿区生态环境破坏最直观、最常见的表现形式,是一种非连续性移动变化^[8]。其产生、分布特征、发育规律、形成机理与煤层的赋存条件、开采技术等密切相关^[9]。地表裂缝分布特征、发育规律的调查手段多种多样,目前针对地表裂缝发育规律的主要研究手段为现场实地观测、理论分析等。传统的野外实地观测可实时记录地表开裂-闭合-稳定的过程,为地表裂缝的研究提供全面详实的数据。胡振琪等^[10-11]通过现场实测揭示了风积沙区采煤诱发的地裂缝发育规律,认为地裂缝的产生具有动态变化,包含2个相似时长的“开裂-闭合”过程,即动态裂缝的自修复过程。杜善周^[12]以神东某工作面为研究对象,指出该工作面的动态裂缝以高角度圆锥状超前发育。此外,部分研究人员通过卫星遥感、三维激光扫描、InSAR等新技术获取采煤活动结束后的地表裂缝分布形态与展布特征^[13-14]。

地表裂缝的形成机理研究方法包括理论分析、数值模拟、相似材料模拟等。刘辉等^[15]基于薄板理论的基本顶“O-X”破断原理分析了塌陷型裂缝的形成机理;余学义等^[16]利用数值模拟软件阐述了沟壑切割浅埋区地表塌陷类型及其形成机理。刘辉等^[17]利用UDEEC软件模拟了滑动性地表裂缝的发育规律,并对其形成机制做出解释。

浅埋煤层指埋藏浅、基岩薄、松散载荷层较小的煤层^[18]。这类煤层常发育宽度、深度较大的塌陷坑(槽)及大型的台阶状地表裂缝,开采往往造成极大的地面塌陷危害。准确掌握该类煤层开采的地表裂缝发育规律及其形成机理是目前的研究重点之一。

宁东煤炭基地羊场湾煤矿煤炭资源储量丰富,

开采规模大,煤层赋存条件多样,浅埋煤层在该区有分布,对于因开采浅埋煤层造成的地面塌陷问题研究较少。因此本文以羊场湾煤矿Y110207工作面为研究对象,利用无人机遥感技术及FLAC^{3D}有限差分软件进行采煤诱发地表裂缝的发育规律及形成机理研究。

1 工作面概况

Y110207工作面位于羊场湾煤矿一号井北部,地形稍有起伏,地表被风积沙、黄土覆盖。采用走向长壁综合机械化开采,全部跨落法管理顶板,于2014年7月开始回采,2014年12月回采结束。工作面走向长1096m,倾向长约200m,采高5.6m。开采侏罗系二号煤层,煤层埋深80.8~142.8m,平均埋深约100m,平均倾角10°,属浅埋深缓倾斜煤层。松散层厚度约为20m,上覆基岩厚度在60.8~122.8m之间。基本顶以粉砂岩、细砂岩为主,夹少量中砂岩、泥岩薄层,平均厚度为75m。直接顶岩性为粉砂岩,夹少量泥岩,厚度约为4m。

2 研究方法

2.1 无人机遥感调查

与传统人工观测、卫星遥感、三维激光扫描、InSAR等调查监测方法相比,无人机遥感具有成本低、效率高、精度较高、机动灵活等优点,且已被多次应用于地面塌陷调查中。周文生等^[19]利用高分辨率无人机遥感影像,研究了羊场湾煤矿地面塌陷类型及其分布特征。张启元等^[20]通过无人机遥感影像,解译了青藏高原大通矿区采空区塌陷信息,并建立一套适合该地区的操作技术流程。侯恩科等^[21]将无人机遥感技术应用在采煤地面塌陷监测中,成功获取了地面塌陷特征、分布规律等信息。本文采用无人机遥感技术与现场实测相结合的方法,调查研究区内地表裂缝发育规律及展布特征。

2.1.1 无人机调查平台

本次采用的飞行平台为MD4-1000四旋翼低



图1 MD4-1000 无人机

Fig. 1 MD4-1000 unmanned aerial vehicle



图2 航线设计图

Fig. 2 Route map

空无人机,搭载高性能 A7R 相机(图 1),具有操作稳定、坚固耐用、高精度、大容量性能等特点,并适用于恶劣环境条件。该相机配备 3640 万有效像素和 3700 万最大像素的全画幅 CMOS 传感器,传感器尺寸为 35.9mm×24mm,续航能力为 340 张,分辨率是 7360×4912 像素,像元大小为 4.88μm,采用 35mm 定焦。无人机各项指数见表 1。

2.1.2 航线设计

无人机航线设计需根据研究区范围,确定航拍区域、航高、航向、重叠率等内容。根据实际工作面情况,走向上调查范围为采空区内距切眼约 300m 的位置至停采线外围 150m;倾向上分别由两侧顺槽向外扩大 100m(图 3)。共设计飞行 2 个架次,航高

设定为 150m,航向沿走向布置,航向和旁向重叠率设置为 60%和 50%(图 2)。

2.1.3 数据采集

2016 年 8 月,按照上述设计的航线对该工作面进行航拍调查,总共获得 89 张地表照片,经过专业软件的校正拼合,获得整个航拍范围内的地表照片,用于解译地面塌陷。

2.2 有限差分软件模拟

有限差分软件可以较好地模拟材料在达到弹性极限后的塑性破坏、应力应变三维力学特点^[22]。FLAC^{3D} 软件特别适用于分析采煤过程中上覆岩层失稳破坏过程及模拟大变形问题。因此,本文采用该软件模拟采煤诱发的地面塌陷形成过程,分析其形成机理。

表 1 MD4-1000 四旋翼低空无人机指数
Table 1 MD4-1000 four indexes of the UAV

性能指标	参数	性能指标	参数
爬升速率	7.5m/s	巡航速度	15.0m/s
最大功率	1000W	机身自重	2650g
飞行时间	<50min/电池	任务载荷	2000g(最大)
飞行半径	5000m	飞行高度	1000m
遥控距离	5000m	抗风能力	<12m/s



图3 航拍范围

Fig. 3 Aerial range

3 地面塌陷特征及分布规律

3.1 地面塌陷特征

利用人工解译的方法对航拍结果进行后期处理,得到Y110207工作面地表裂缝分布图,结合野外调查可知,该工作面地面塌陷类型主要为地表沉陷、地表裂缝、塌陷槽。塌陷槽发育在工作面风巷外围,宽度约为4m,深度达十几米,长度延伸长;地表裂缝极发育,宽度在10~100cm之间,长度均大于5m,且发育部分塌陷型裂缝,错台高度一般在15cm左右,整体呈直线型或弧型。

3.2 分布规律

该工作面地表裂缝主要分为2类:

一类为平行切眼裂缝,该类裂缝发育在工作面内部,大致呈平行排列,间隔出现,2条裂缝之间相距10~120m,弯曲方向程度朝向切眼;另一类是平行顺槽裂缝,一般发育在工作面两侧顺槽外围,少数可展布于工作面内部。该处平行顺槽裂缝以“裂缝带”的形式发育在工作面两侧顺槽内外。上山方向(浅部)最外围平行顺槽裂缝至顺槽的距离为37m。下山方向(深部)最外围平行顺槽裂缝至顺槽的距离为54m。弯曲方向朝向采空区(图4)。

4 地面塌陷形成机理

4.1 模型的建立

根据羊场湾煤矿Y110207工作面钻孔揭露的地层、岩性资料,结合该矿区的岩石力学实验参数,对其进行相应的优化,建立该工作面的FLAC^{3D}模型(图5)。岩石力学参数见表2。

模型尺寸800m×800m×230m,煤层厚度5.0m,煤层埋深在80~145m之间,平均埋深为100m,模型采宽200m,沿着走向开采。总共开采长度为400m,每次挖取20m,共开挖20步。

4.2 地面塌陷形成机理分析

4.2.1 覆岩移动破坏特征

煤层开采后,地下形成采空区导致上覆岩层发生移动变形,造成地面下沉及地表开裂。通过对模型进行剖面解析,得到覆岩竖向位移云图、应力云图、

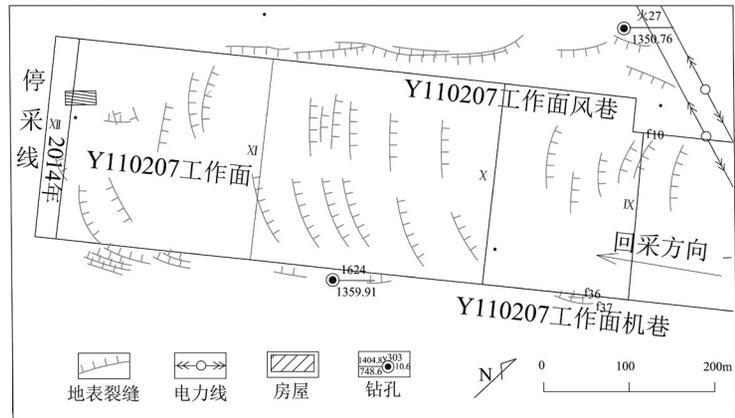


图4 Y110207工作面地表裂缝展布

Fig. 4 Surface cracks distribution map of Y110207 working face

塑性破坏分区图。从图6可以看出,煤层采出后,采空区上方岩层在其自重应力作用下开始下沉。最大下沉位移接近3000mm,位移量向四周逐渐递减。地表最大下沉值为2662mm。采空区煤柱侧处于受压状态,最大竖向压力为8MPa,且同一深度下越靠近采空区煤柱其应力分量越大,造成上覆岩层的“整块”切落。随着工作面不断推进,上覆岩层逐渐形成垮落带和裂缝带。

通过地表中心走向剖面的塑性破坏区分析得知,随着煤层的开采,采空区上方至地表的覆岩塑性破坏分为2种类型,采空区35m范围内的覆岩竖向应力分量为正值,受拉应力产生拉张破坏,对应图7-A中覆岩中部的2a区域;采空区上方35m以上至地表范围内的岩层竖向应力分量为负值,受压应力,产生明显的剪切破坏,裂缝带上行裂缝发育至

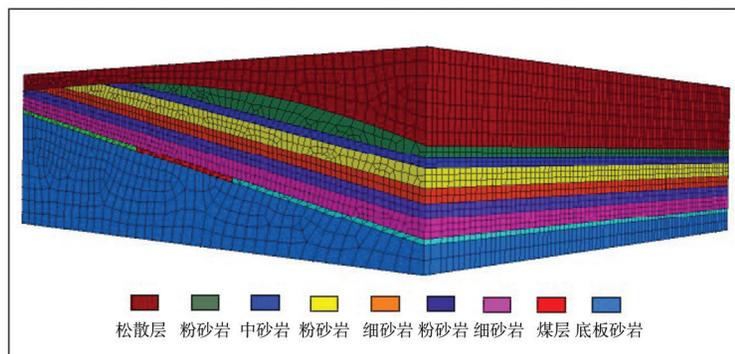


图5 Y110207工作面FLAC3D模型

Fig. 5 FLAC3D model of Y110207 working face

表 2 岩石力学参数

Table 2 Rock mechanical parameter table

岩性	自重密度 /(g·cm ³)	体积模 量/GPa	切变模 量/GPa	粘结力 /MPa	内摩擦 角/°	抗拉强 度/MPa
松散层	1780	2.1	0.4	0.9	28	0.6
粉砂岩	2600	3.0	1.1	1.2	33	0.8
中砂岩	2650	4.6	1.2	1.0	35	1.1
粉砂岩	2600	3.3	1.8	1.3	33	0.8
细砂岩	2750	6.4	2.2	2.0	40	1.0
粉砂岩	2600	3.3	2.5	1.3	33	0.8
砂岩	2900	4.6	1.7	2.0	40	1.3
煤层	2030	2.2	1.0	1.1	31	0.6
底板砂岩	2860	3.9	3.3	3.5	35	1.0

地表,对应图7-A中的3b区域。采空区左、右两侧至煤壁处为压拉转化区,受力状态为压应力逐渐转化为拉应力,塑性破坏由剪切破坏变为拉张破坏,对应图7-A中的4c区域。采空区两侧煤壁附近未

采区,其上近地表覆岩遭受拉应力破坏,对应图7-A中的地表两侧2a区域,且当区域的拉应力超过覆盖层应力极限时,地表开始发育裂缝。

倾向上覆岩移动出现不对称性。下山方向(深部)的卸压范围大于上山方向(浅部),塑性破坏较轻,对应图7-B中的1b区域。采空区两侧地表2a区域受拉应力作用,为平行顺槽裂缝强烈发育区;倾向上裂缝带亦发育至地表,但由于工作面内部受到来自两侧的相对挤压力,导致该区域内平行顺槽裂缝不易发育(图7-B)。

4.2.2 地表沉陷分析

地表沉陷盆地平面上总体近似呈“O”型(图8、图9)。最大下沉点位于采空区中部偏下山方向,下沉量向四周逐渐递减。从图9可以看出,走向地表下沉曲线呈均匀、对称分布,最大下沉点位于采空区中部,下沉值为2662mm。切眼及停采线附近下沉曲线变化大,为裂缝强发育区,对应图7中的地表2a区。由于煤层小角度倾斜导致倾向地表下沉曲

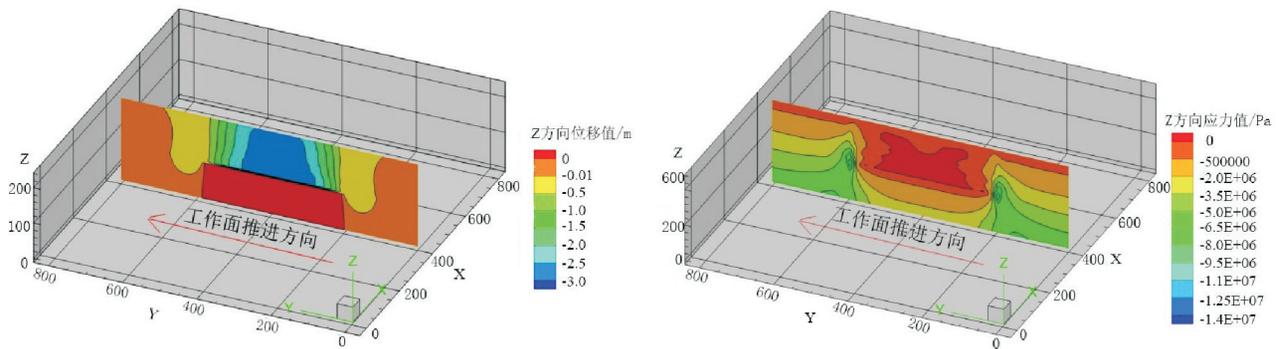


图 6 覆岩竖向位移及竖向应力云图

Fig. 6 Vertical displacement and vertical stress nephogram of overlying strata

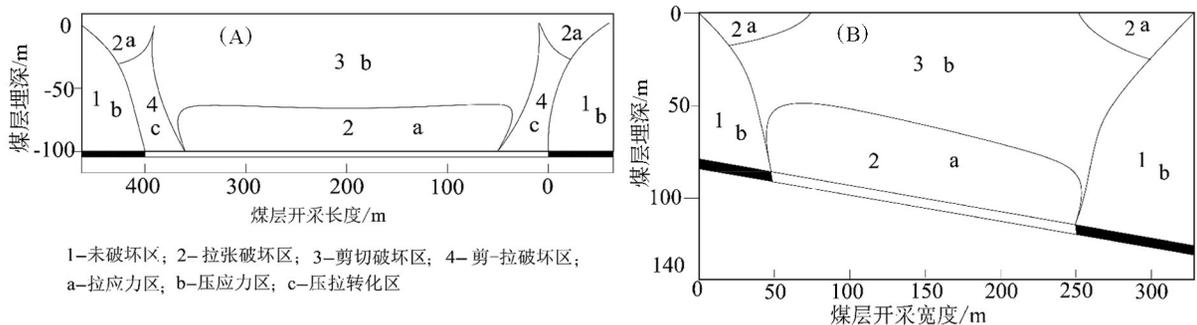


图 7 覆岩及地表破坏分区

Fig. 7 Destructive zoning map of overlying strata and ground

A—走向;B—倾向

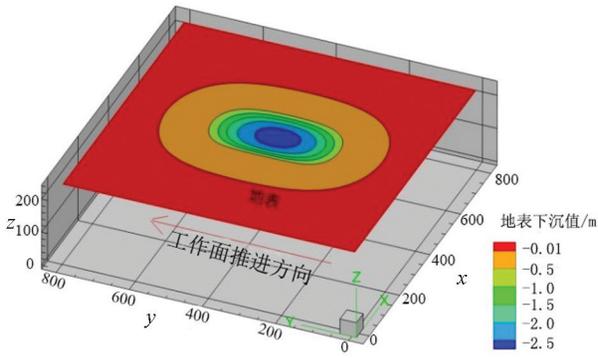


图8 地表下沉云图

Fig. 8 The map of land subsidence

线略呈非均匀、不对称分布,最大下沉点出现在采空区中部偏下山方向,最大下沉值为2662mm。两

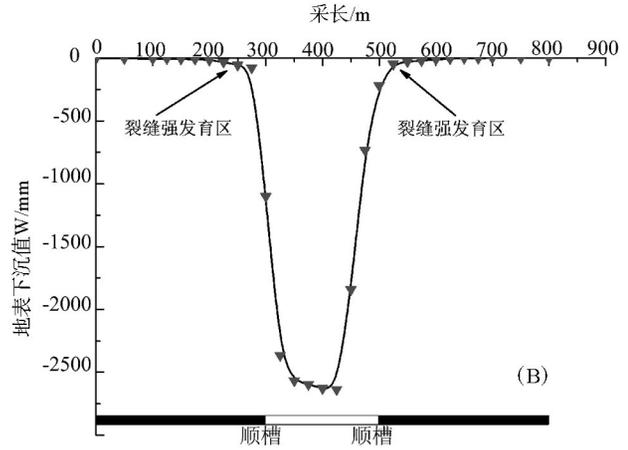
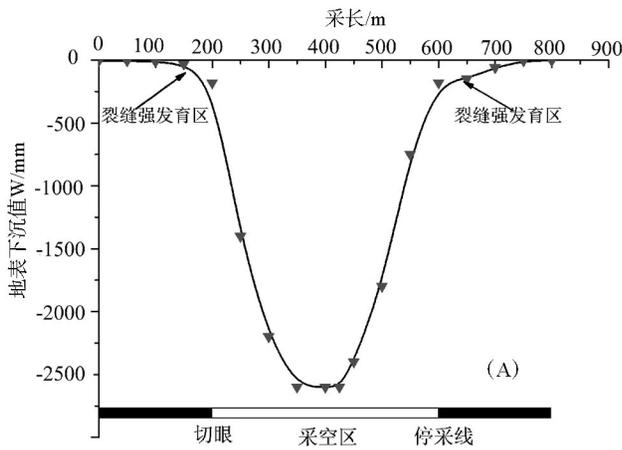


图9 地表下沉曲线

Fig. 9 Land subsidence curve

A—走向地表下沉曲线;B—倾向地表下沉曲线

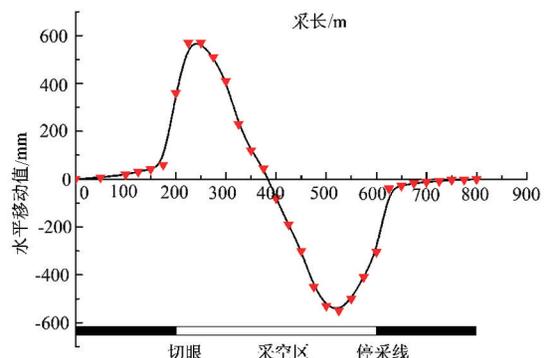
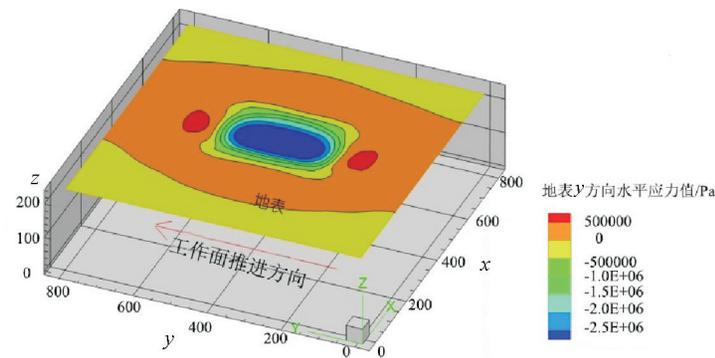


图10 地表走向水平应力云图及位移曲线

Fig. 10 Horizontal movement map of parallel mining direction on the surface

侧顺槽附近地表下沉曲率变化大,平行顺槽裂缝强烈发育。

4.2.3 水平移动变形分析

地表在走向水平应力方向的切眼及停采线附近表现为拉应力,采空区中间为挤压应力。拉张应力值达到了0.5MPa,超过了地表松散层的抗拉强度。走向地表水平移动曲线呈均匀、对称分布。最大水平移动点位于切眼及停采线附近,移动值为570mm(图10)。由于煤层倾斜导致地表倾向水平移动略呈不均匀、非对称分布。最大水平移动变形出现在工作面顺槽附近,移动变形值为516mm,倾向上两侧顺槽拉张水平应力值达0.2MPa,超过地表松散层应力值。走向、倾向应力值大于地表松散层抗拉强度是裂缝发育的应力条件(图11)。

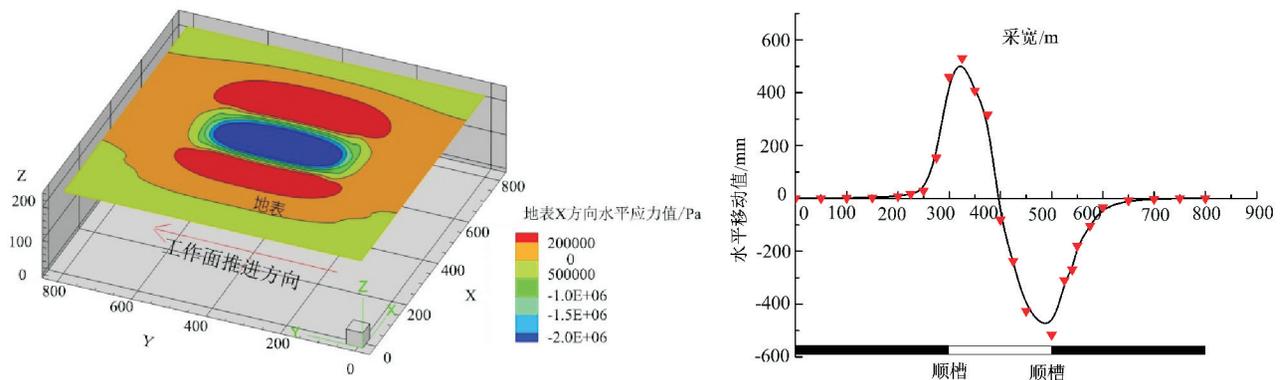


图 11 地表倾向水平应力云图及位移曲线

Fig. 11 Horizontal movement map of vertical mining direction on the surface

4.2.4 模型验证

一般情况下,当地表覆盖层的水平拉伸变形超过其临界水平变形值时,会造成地表开裂产生裂缝。通常塑性比较大的粘土,地表拉伸变形超过6~10mm/m时地表产生裂缝;若为塑性较小的砂质粘土、粘土质砂,地表拉伸变形超过2~3mm/m时产生裂缝^[23]。

结合作面实际地表覆盖层类型,选取6mm/m作为临界水平移动变形值。随着工作面不断推进,平行切眼裂缝出现在切眼内外50m和停采线内外50m的范围内;上山方向平行顺槽裂缝发育在顺槽外围25m的范围内;下山方向平行顺槽裂缝发育在其顺槽外围50m的范围内(图12)。裂缝的发育范围基本与下沉曲线变化值较大的位置一致,与野外实际调查结果基本一致,证明数值模拟结果可信。

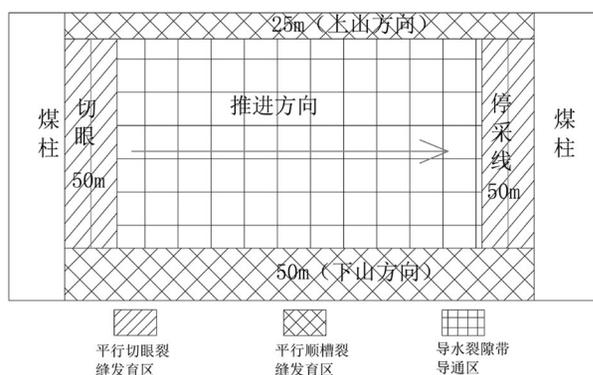


图 12 地表裂缝发育范围

Fig. 12 Development range of surface cracks

采空区中部为裂缝带导通区,岩石内部上行裂缝与地表下行裂缝在此范围内贯通,易形成错台。

5 结 论

(1)根据无人机地表裂缝解译结果,结合野外调查发现,浅埋煤层开采造成的地面塌陷极严重,地表裂缝极发育、塌陷槽局部发育;平行切眼裂缝间隔性展布于整个工作面内,间隔距离在10~120m之间,局部范围裂缝有错台;平行顺槽裂缝发育在工作面两侧顺槽外围,上山方向裂缝带宽37m,下山方向裂缝带宽54m。裂缝长度长、宽度大,整体向采空区中部弯曲。

(2)通过上覆岩层移动破坏模拟结果分析,将上覆岩层的应力变化分为压应力区、拉应力区、压-拉转化区,分别对应剪切破坏、拉张破坏及剪-拉破坏。

(3)根据数值模拟结果,分析认为,采煤造成的上覆岩层移动破坏是地面塌陷发育的主要诱因。采煤导致采空区中部岩层发生弯曲、破断,发育上行裂缝。采空区两端煤柱侧基岩在压应力的作用下被“整块”切落。当扰动传递至地表后,地表移动变形值超过覆盖层抗拉强度且地表水平移动值超过其水平移动临界值时,裂缝开始发育。地表下沉曲线中曲率变化最大的位置为地表裂缝的强发育区。由于埋深浅覆岩内部裂缝带发育至地表,裂缝贯通,形成错台。

致谢:地表裂缝的野外调查工作由羊场湾煤矿地测科张仲杰等工作人员协助完成,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1]何芳,徐友宁,袁汉春,等.煤矿地面塌陷区的防治对策[J].煤炭工程,2003,7:10-13.
- [2]初影.采煤诱发地表裂缝数值模拟研究[D].辽宁工程技术大学硕士学位论文,2009.
- [3]蔡怀恩,侯恩科,张强骅,等.黄土丘陵区房柱式开采地表塌陷特征及机理分析——以陕北府谷县新民镇小煤矿为例[J].地质灾害与环境保护,2010,21(2):101-104.
- [4]蔡怀恩.彬长矿区地面塌陷特征及形成机理研究[D].西安科技大学硕士学位论文,2008.
- [5]贺卫中,向茂西,刘海南,等.榆神府矿区地面塌陷特征及环境问题[J].煤田地质与勘探,2016,44(5):131-135.
- [6]赵兵朝,刘宾,王建文,等.柠条塔煤矿叠置开采地表岩移参数分析[J].煤矿安全,2016,47(9):213-216.
- [7]赵兵朝,刘飞,凡奋元,等.黄土沟壑区下斜交叠置开采地表下沉系数研究[J].矿业安全与环保,2016,43(5):54-57.
- [8]杨帆,余海锋,郭俊廷.采动地表裂缝形成机理的数值模拟[J].辽宁工程技术大学学报,2016,6:566-570.
- [9]吴侃,胡振琪,常江,等.开采引起的地表裂缝分布规律[J].中国矿业大学学报,1997,2:56-59.
- [10]胡振琪,王新静,贺安民.风积沙区采煤沉陷地裂缝分布特征与发生发育规律[J].煤炭学报,2014,39(1):11-18.
- [11]胡振琪,龙精华,王新静.论煤矿区生态环境的自修复、自然修复和人工修复[J].煤炭学报,2014,39(8):1751-1757.
- [12]杜善周.神东矿区大规模开采的地表移动及环境修复技术研究[D].中国矿业大学(北京)博士学位论文,2010.
- [13]邓喀中,王刘宇,范洪冬.基于InSAR技术的老采空区地表沉降监测与分析[J].采矿与安全工程学报,2015,32(6):918-922.
- [14]王瑞国.基于WorldView-2数据的乌东煤矿地质灾害遥感调查及成因分析[J].国土资源遥感,2016,28(2):132-138.
- [15]刘辉,何春桂,邓喀中,等.开采引起地表塌陷型裂缝的形成机理分析[J].采矿与安全工程学报,2013,30(3):380-384.
- [16]余学义,邱有鑫.沟壑切割浅埋区塌陷灾害形成机理分析[J].西安科技大学学报,2012,32(3):269-274.
- [17]刘辉,刘小阳,邓喀中,等.基于UDEEC数值模拟的滑动型地裂缝发育规律[J].煤炭学报,2016,41(3):625-632.
- [18]黄庆享,张文忠.浅埋煤层条带充填保水开采岩层控制[M].北京:科学出版社,2014.
- [19]周文生,吴振宇,刘海燕.无人机遥感在矿山地质环境调查中的应用[J].地下水,2014,2:128-129.
- [20]张启元.无人机航测技术在青藏高原地质灾害调查中的应用[J].青海大学学报,2015,2:67-72.
- [21]侯恩科,首召贵,徐友宁,等.无人机遥感技术在采煤地面塌陷监测中的应用[J].煤田地质与勘探,2017,6:102-110.
- [22]赵坤阳.煤矿地下开采诱发地表裂缝与导水裂缝分布规律预测[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文,2015.
- [23]余学义,张恩强.开采损害学[M].北京:煤炭工业出版社,2010.