

# 基于UAV航测的浅埋煤层开采地表裂缝发育规律研究

——以串草圪旦煤矿为例

岳喜能, 王志民\*, 秦越强, 李朋元, 张鑫, 辛凯, 邢承元

中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 河北 廊坊

收稿日期: 2022年9月20日; 录用日期: 2022年10月22日; 发布日期: 2022年10月31日

## 摘要

以串草圪旦煤矿6105工作面为研究对象, 利用UAV (无人机)航测技术, 对准格尔旗产生的裂缝发育规律进行了研究。1) 浅部煤层井下开采致使地表破坏, 且多以地表裂隙形态为表现形式。2) 沿单个工作面方向, 裂缝间距呈平行弧状, 间隔距离为5~20 m, 裂缝在地表破坏严重区形成下错, 错台高度约为15~130 cm。拉张破坏严重区域内形成裂缝槽, 槽宽约2~10 m。该组裂隙呈“C”型, 裂缝两侧与工作面推进方向呈3°~5°的夹角。3) 沿单个工作面倾角平行的沟槽中形成线性裂缝, 该组裂缝较长, 在顺槽至外围一定范围内发育。4) 以最外围首次出现地裂缝为边界, 对裂缝影响角反演, 测得影响角59.5°~61.6°、48.6°。研究结果有助于对准格尔地区浅埋煤层地表裂隙的理论认识, 为矿区地表塌陷预测与防治及生态修复提供了依据。

## 关键词

串草圪旦煤矿, 地面塌陷, 地裂缝, 无人机航测

# Research on Surface Crack Development Law of Shallow Coal Seam Mining Based on UAV Aerial Survey Technology

—Taking Chuancaogedan Coal Mine as an Example

Xineng Yue, Zhimin Wang\*, Yueqiang Qin, Pengyuan Li, Xin Zhang, Kai Xin, Chengyuan Xing

Langfang Center for General Survey of Natural Resources, CGS, Langfang Hebei

Received: Sep. 20<sup>th</sup>, 2022; accepted: Oct. 22<sup>nd</sup>, 2022; published: Oct. 31<sup>st</sup>, 2022

\*通讯作者。

文章引用: 岳喜能, 王志民, 秦越强, 李朋元, 张鑫, 辛凯, 邢承元. 基于 UAV 航测的浅埋煤层开采地表裂缝发育规律研究[J]. 自然科学, 2022, 10(6): 960-968. DOI: 10.12677/ojns.2022.106108

## Abstract

Taking the 6105 working face of Chuancaogedan coal mine as the research object, the development law of cracks produced by Zhungeer Banner was studied by using UAV aerial survey technology. 1) Underground mining of shallow coal seam causes surface damage, which is mainly manifested in the form of surface cracks. 2) Along the direction of a single working face, the crack spacing is parallel arc shape, the interval distance is 5~20 m, and the fracture is formed in the serious surface damage area, and the height of the wrong platform is about 15~130 cm. Fracture grooves are formed in the area of serious tensile failure, and the width of the grooves is about 2~10 m. The fractures in this group are of "C" shape, and the Angle between the two sides of the fractures and the advancing direction of the working face is 3°~5°. 3) Linear fractures are formed in the grooves parallel to the dip Angle of a single working face. This group of fractures is long and develops in a certain range from the grooves to the periphery. 4) Taking the outermost ground fracture as the boundary, the influence Angle of the fracture is inverted, and the influence Angle is 59.5°~61.6° and 48.6°. The research results are helpful to the theoretical understanding of surface fissures of shallow coal seam in Zhungeer area, and provide the basis for the prediction, prevention and ecological restoration of surface collapse in mining area.

## Keywords

Chuancaogedan Coal Mine, Ground Collapse, Ground Fissures, Aerial UAV Survey

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

按照“绿水青山就是金山银山”的宗旨，大力推进“绿色矿山”建设，矿区生态环境治理、保护、防治等工作上升到社会舆论的前沿。地面塌陷是由于煤炭被大规模的开采导致上覆岩层发生破坏，岩土体下陷或塌落在地下空洞中，并在地表形成不同形态的塌坑，是矿山环境损害的重要组成部分[1]。地表沉陷、地表裂缝、塌陷坑(槽)是地面塌陷常见的三种基本类型[2]。其中地裂缝、塌陷坑(槽)会造成土地开裂、基础建筑垮塌、干扰破坏交通线路、地下水位下降、造成人员和牲畜伤亡等现象，对矿区环境破坏尤为严重[3] [4] [5]。

地表裂缝是矿区最明显和最普遍的环境破坏形式[6]。研究地裂缝有多种方法，但实地观测和理论分析是研究地表裂缝发育规律的两种基本方法[1]。随着科技的进步，卫星遥感、InSAR、3D 激光扫描和其他新兴技术已被用于研究煤矿开采后地表裂缝的分布模式和性质[7] [8]。

准格尔旗东部煤炭矿集区煤串草圪旦煤矿开采规模巨大，煤炭资源丰富。虽然该地区有多处浅层煤层，但对其分布及其开采引起的地表塌陷规律的研究较少。以串草圪旦煤矿 6105 工作面井下开采所产生的地表塌陷区域为研究对象，利用无人机航测技术分析总结了地表裂缝发育规律。

## 2. 概况

### 2.1. 矿区概况

研究区地处鄂尔多斯市准格尔旗东南部，黄河西岸。地形总体趋势为西北高东南低，海拔标高一般

在 950~1150 m 之间, 相对高差 30~200 m [9]。地貌类型属于黄土丘陵区。丘陵被树枝状沟谷所切割, 使矿区地形复杂, 沟谷纵横, 沟深壁陡。区域地层主要为第四系全新统风积砂(Q<sub>4</sub><sup>col</sup>)、第四系冲洪积物(Q<sub>4</sub><sup>al</sup>)、第四系马兰黄土(Q<sub>3</sub>m)、二叠系石盒子组(P<sub>2</sub>sh)、二叠系山西组(P<sub>1</sub>s)、三叠系-二叠系石千峰群((P-T)s)、石炭系太原组(C<sub>3</sub>t)和二叠系马家沟组(O<sub>1-2</sub>m)。主要岩性为黄土、泥岩、砂岩(见图 1)。

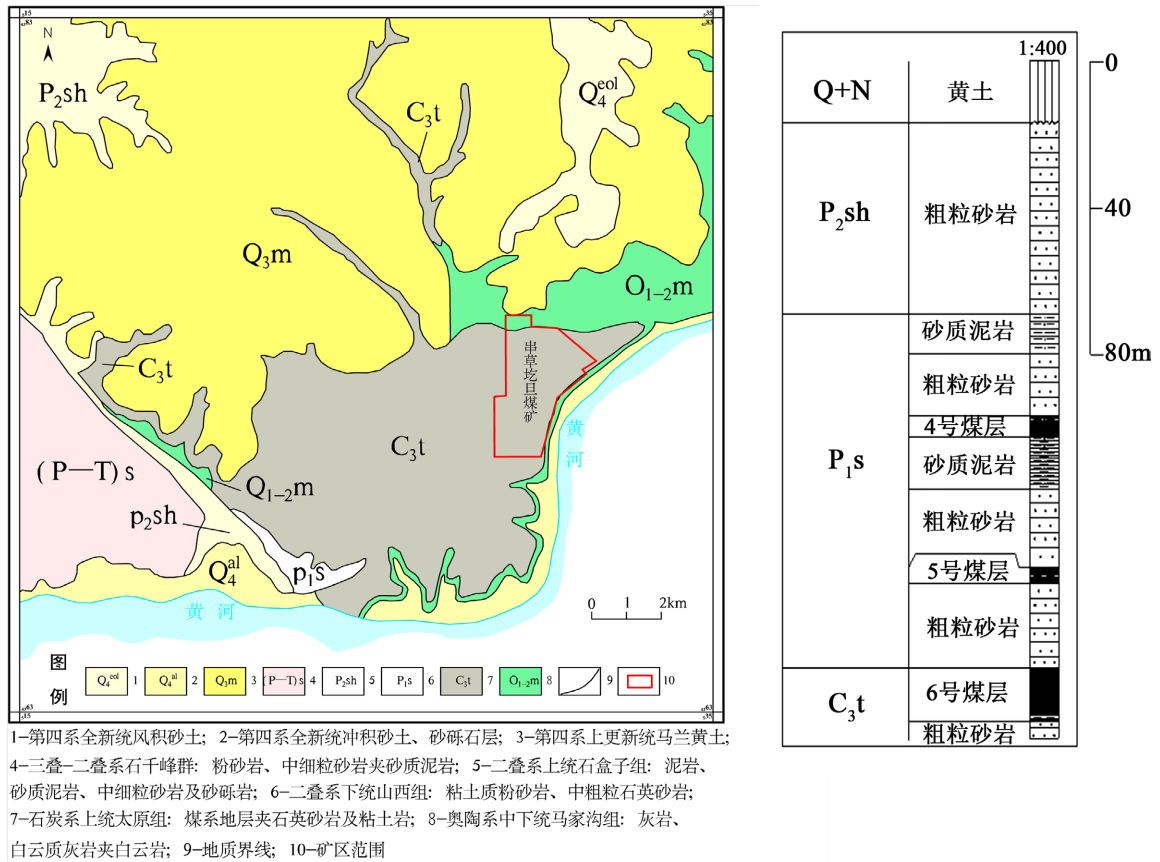


Figure 1. Simplified geological map of Chuancuogedan Coal Mine and lithology diagram of upper No. 6 coal seam  
图 1. 串草圪旦煤矿简化地质图及 6 号煤层上部岩性示意图

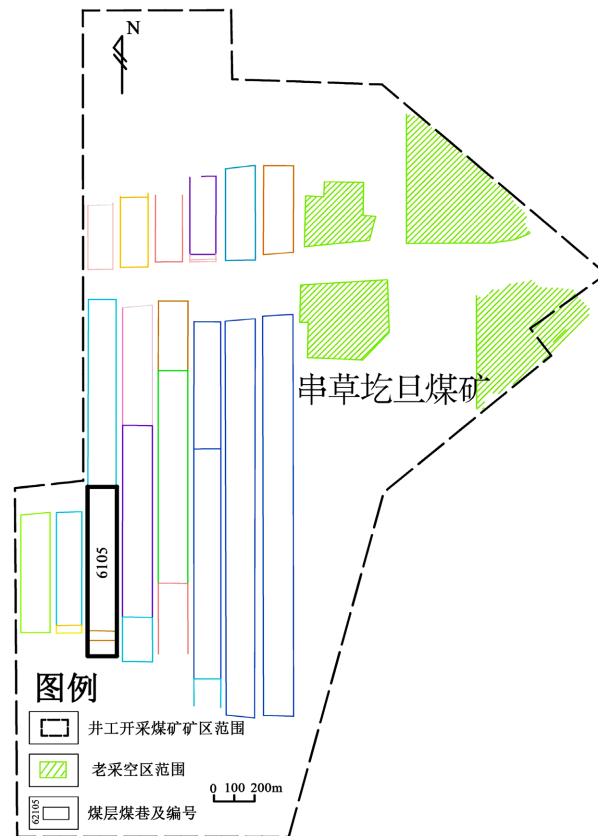
## 2.2. 工作面概况

6105 工作面位于串草圪旦煤矿西部, 地形起伏较小, 地表被黄土覆盖(见图 2)。采用走向长壁综合机械化开采, 顶板完全跨落, 开采时间为 2018 年 12 月~2019 年 9 月。工作面走向长 756 m, 倾向长 140 m, 平均采高 10.5 m。开采石炭系六号煤层, 煤层平均埋深约 100 m, 倾角 1°~5°, 属浅埋深缓倾斜煤层。松散层厚度约为 10 m, 上覆基岩厚度在 45~140 m 之间, 煤层顶板岩性以泥岩、砂质泥岩、砂岩为主, 与顶板的岩性相似, 底板也含有一些细砂岩。

## 3. 无人机航测

### 3.1. 无人机遥感调查

针对无人机效率高、精度高、机动灵活且成本低的优点, 被众多矿山企业用于地面塌陷调查中。侯恩科等[10]利用无人机遥感技术开展了地面塌陷监测, 成功采集了地面塌陷的特征和分布。本文采用无人机航测技术, 与野外实地相互验证, 总结研究区裂缝分布特征及发育规律。



**Figure 2.** Schematic diagram of 6105 working face location  
**图 2.** 6105 工作面位置示意图

### 3.2. 采用的无人机简介

本次调查采用 CW-15 免像控固定翼垂直起降无人机航摄系统(见图 3)。各指标(见表 1)。为了有效的解译采空岩移诱发的地裂缝、地表塌陷坑和地表滑塌,采用无人机航飞高分辨率遥感影像,并生成精细地貌,详细解译地表变形破坏特征,从而分析地下开空区的塌陷情况。



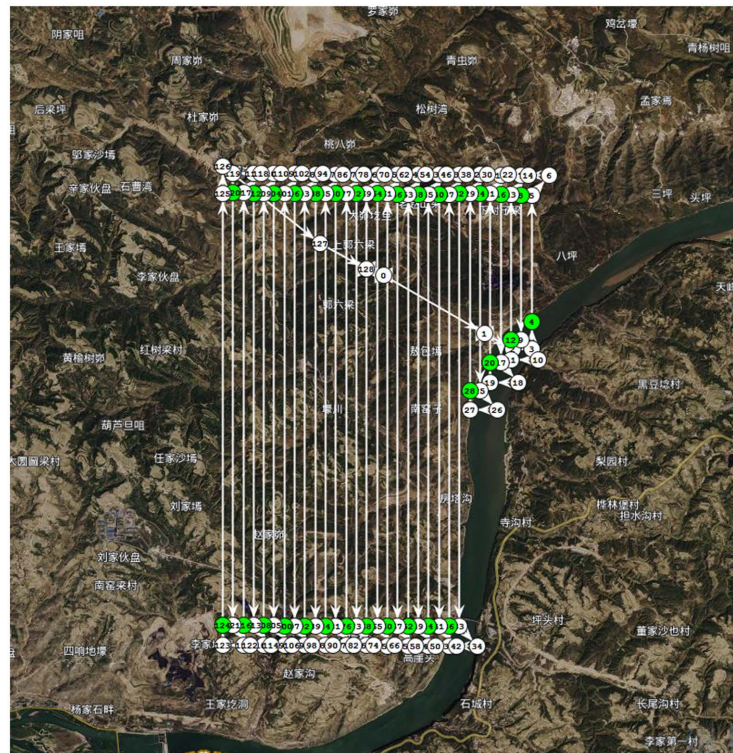
**Figure 3.** CW-15 UAV  
**图 3.** CW-15 无人机

**Table 1.** Performance indexes of CW-15 UAV  
**表 1.** CW-15 无人机能性能指标

性能	机长	翼展	飞行高度	整机重量	巡航速度	3 kg 载荷续航时间	抗风能力	降落精度
参数	1720 mm	3610 mm	5000 m	16.5 kg	19 m/s	160 min	6 级	0.1 m

### 3.3. 航飞路线规划

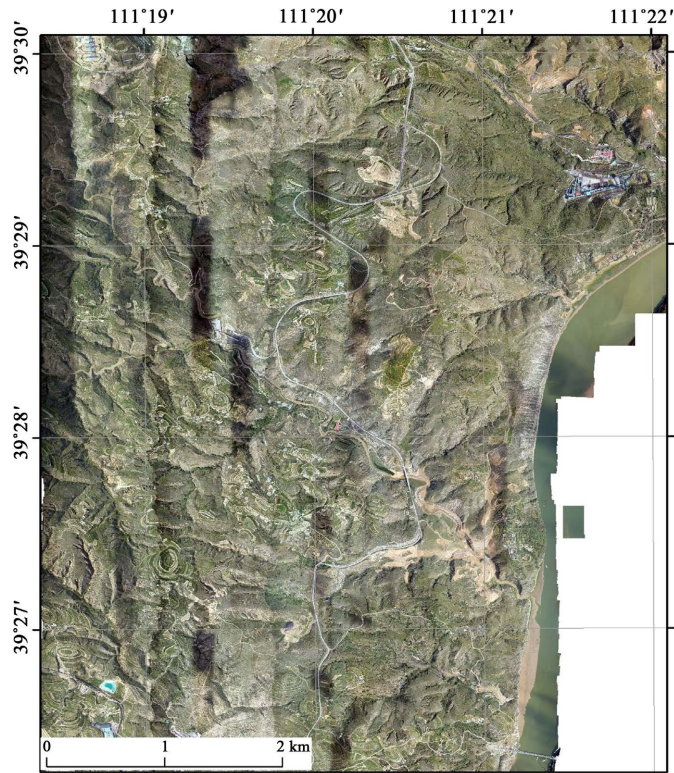
采用专业设计软件,地形参考全球 30 m DEM (SRTM),分辨率为 0.05 米。平行于拍摄区域边界线的初始开放路线通常铺设在拍摄区域边界上或在拍摄区域边界外,按常规铺设路线以确保拍摄区域边界真正覆盖至少 30%的图像。如果超过图像区域边界的侧边方向至少为 15%,并且在保持内部行业加密标准的情况下测量图像控制点是可行的,则可以认为是合格的。根据飞行路线和飞行姿态,相应提高旁向重叠率。确保照片航向重叠度 70%,旁向重叠度 65%的密度,在全测区布设航线 31 条,控制性航点 128 处(见图 4)。旋偏角通常不大于 15°,在某些情况下,最大旋偏角度不大于 25°,但需要确保航向、旁向重叠度必须仍然符合规范的标准。



**Figure 4.** Map of design route  
**图 4.** 航线设计图

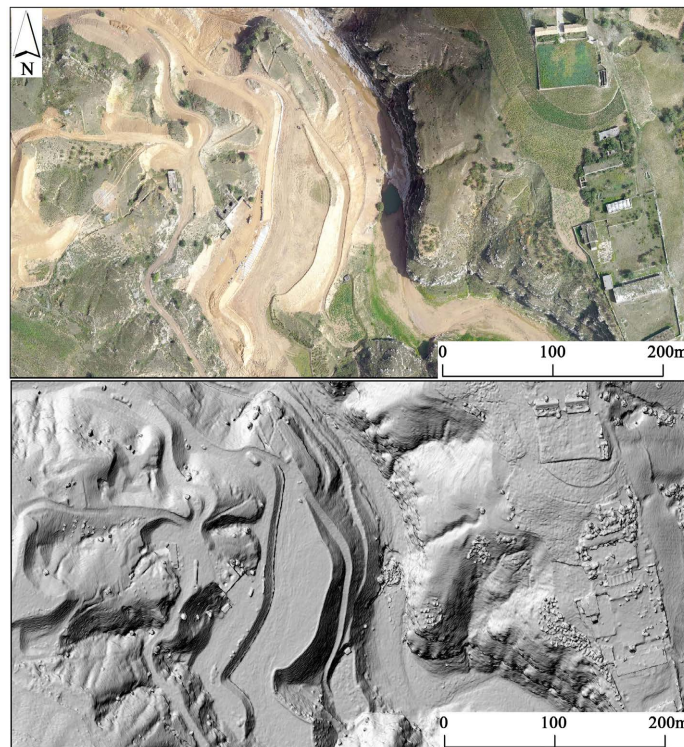
### 3.4. 航测成果

航飞时天气状况较好,镜头采用固定 ISO 模式飞行,合成的正射遥感影像清晰锐利,色彩过渡平滑。航飞遥感影像见图 5 生成光学正射遥感影像的同时,也生成了空间分辨率为 0.05 m 的高清地貌影像。如图 6 所示,为地貌数据生成的 hillshade 影像,可以看出生成的 DSM 数据成像质量高,清晰反映出矿区地貌特征,可以用于矿区地貌分析以及地面裂缝发育解译、评估工作。



**Figure 5.** 0.05 m aero-flying orthophoto remote sensing image in working area

**图 5.** 工作区 0.05 米航飞正射遥感影像



**Figure 6.** Local magnified Navigation image (DOM) and Stereo Landform (DSM) of workspace

**图 6.** 局部放大的工作区航飞影像(DOM)和立体地貌(DSM)

## 4. 地表裂缝特征及分布规律

### 4.1. 地表裂缝特征

对无人机航空影像结果进行人工解译,得到 6105 工作面地表裂缝分布图,如图 7 所示。与现场调查相结合,得出:6105 工作面地表破坏主要有地表裂缝和塌陷槽两种类型。地裂缝宽度在 1~200 cm 不等,长度均在 30 m 以上,且部分裂缝表现为垂直下错,下错距一般在 15~130 cm 左右,整体以“C”型为主的弧形裂缝兼直线型。塌陷槽多发育在平行于工作面推进方向的巷道外围,槽宽 2~6 m,可见深度达几米,长度延伸较长,最长达 150 m。

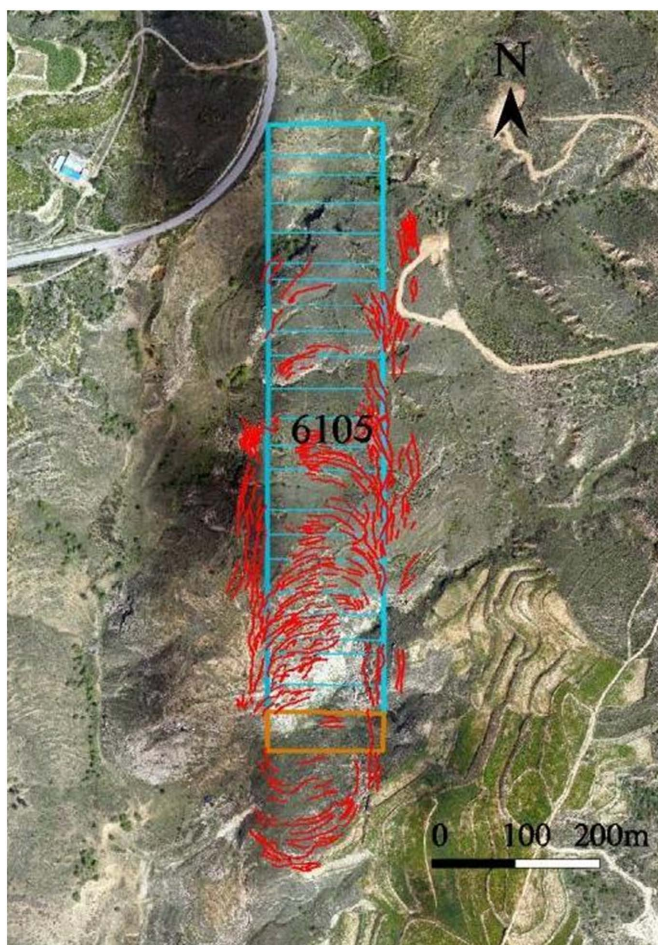


Figure 7. Interpretation results of ground cracks by UAV aerial survey  
图 7. 无人机航测地裂缝解译成果

### 4.2. 分布规律

该工作面地表裂缝有 2 种类型。一类沿单个工作面方向,裂缝间距呈平行弧状,间隔距离为 5~20 m,裂缝在地表破坏严重区形成下错,错台高度约为 15~130 cm。拉张破坏严重区域内形成裂缝槽,槽宽约 2~10 m。该组裂隙发育方向不是垂直工作面推进方向,一般有 3°~5°的偏角,最外围裂缝距离切眼 96 m。另一类沿单个工作面倾角平行的沟槽中形成线性裂缝,该组裂缝较长,在顺槽至外围一定范围内发育,少数可展布于工作面内部。裂缝距离巷道地表垂直地表投影距离为 41 m、47 m(见图 8)。

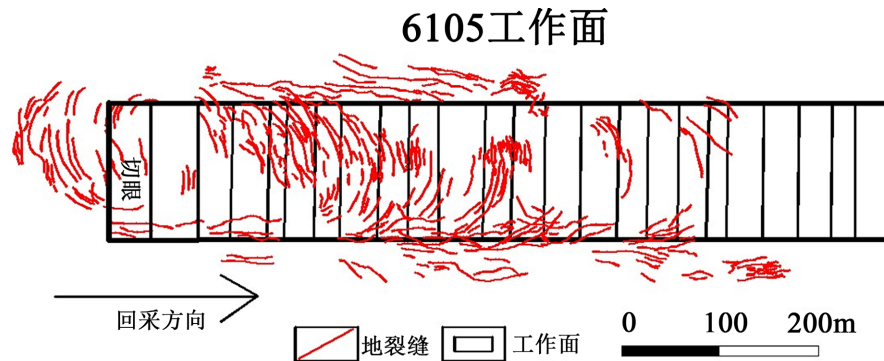


Figure 8. Distribution of ground cracks in 6105 working face (part)  
图 8. 6105 工作面地裂缝展布(部分)

### 4.3. 发育规律

通过无人机航测, 野外实地踏勘及 6105 工作面地表裂隙资料验证可以看出, 地表拉伸达到 5 mm 时, 裂缝开始出现, 在山丘, 山坡等地形时偏小些, 在冲沟发育的区域偏大些。在裂隙产生时, 先是在地表张开细长的弧状缝隙, 长约 6~8 m。随着时间的推移和变形的加大, 裂隙的宽度逐渐增大, 长度也在逐渐延伸, 最大宽度可达 2 m, 最大长达 180 m, 且部分裂缝为垂直下错。在工作面切眼发现塌陷坑, 在开采阶步形成动态裂缝, 该裂缝的中间伴随着间断性的小裂缝, 小裂缝为大裂隙的伴生裂缝。宽裂缝的产生是地下开采引起的上覆岩层周期性垮落在地表的反应。

### 4.4. 裂缝影响角的计算

通过无人机航测地表裂缝分布范围, 结合地下工作面的分布, 选取地表裂缝影响范围最大的工作面部分, 以最外侧首次出现地裂缝为标点, 与采空区边界之间的连线和水平线在煤柱一侧的夹角, 受地形条件影响, 裂缝发育的范围不同, 上山范围要低于下山范围, 所测得影响角不同, 上山方向影响角较大, 上山方向、下山方向分别为  $61.6^\circ$ 、 $59.5^\circ$ , 切眼及停采线一侧影响角  $48.6^\circ$  (见图 9)。

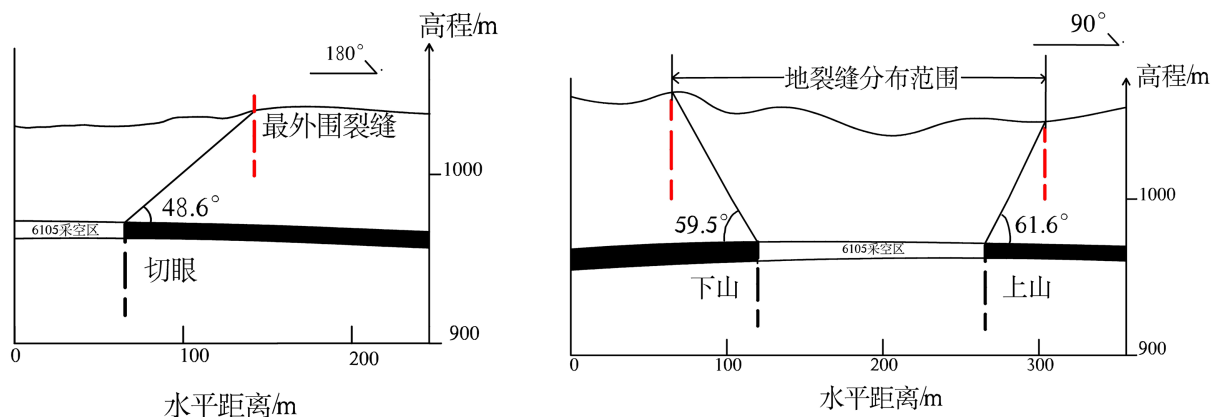


Figure 9. Calculation diagram of fracture influence Angle of 6105 working face  
图 9. 6105 工作面裂缝影响角计算图

## 5. 结论

1) 经无人机航测技术和现场验证表明, 浅埋煤层开采带来的地表塌陷及其危险, 局部会形成地表裂缝和塌陷槽。平行切眼方向, 裂缝间距呈平行弧状, 间隔距离为 5~20 m, 裂缝在地表破坏严重区形成下



错, 错台高度约为 15~130 cm。拉张破坏严重区形成裂缝槽, 槽宽约 2~10 m。该组裂隙发育方向不是垂直工作面推进方向, 一般有 3°~5°的偏角, 最外围裂缝距离切眼 96 m。沿单个工作面倾角平行的沟槽中形成线性裂缝, 该组裂缝较长, 在顺槽至外围一定范围内发育, 少数可展布于工作面内部。裂缝距离巷道地表垂直地表投影距离为 41 m、47 m。

2) 通过对裂缝影响角的计算, 受地形条件影响, 裂缝发育的范围不同, 上山范围要低于下山范围, 所测得影响角不同, 上山影响角较大, 上山方向、下山方向分别为 61.6°、59.5°, 切眼一侧裂缝影响角 48.6°。

3) 通过无人机航测技术和野外实地验证, 得出地裂缝发育规律, 当地表拉伸达到 5 mm 时, 裂缝开始出现。裂隙产生时, 先是在地表张开细长的弧状缝隙, 随着时间的推移和变形的加大, 裂隙的宽度逐渐增大, 长度也在逐渐延伸, 且部分裂缝表现为垂直下错。在工作面切眼发现塌陷坑, 在开采阶段形成动态裂缝, 该裂缝的中间伴随着间断性的小裂缝, 小裂缝为大裂隙的伴生裂缝, 出现并无规律性。宽裂缝的产生是地下开采引起的上覆岩层周期性垮落在地表的反应。

4) 利用无人机航测在黄土沟壑区浅埋煤层开采地面塌陷调查中效果较好, 能够有效掌握采空塌陷地裂缝的分布规律及特征, 为煤炭矿集区生态修复提供技术支撑。

## 基金项目

中国地质调查局项目《鄂尔多斯市准格尔旗煤碳矿集区生态修复支撑调查》(编号: DD20208078)。

## 参考文献

- [1] 谢晓深, 侯恩科, 高冠杰, 徐友宁, 魏启明, 刘江斌. 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[J]. 地质通报, 2018, 37(12): 2233-2240.
- [2] 蔡怀恩. 彬长矿区地面塌陷特征及形成机理研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2008.
- [3] 贺卫中, 向茂西, 刘海南, 李永红, 彭捷. 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.
- [4] 赵兵朝, 刘宾, 王建文, 凡奋元, 刘浪, 侯恩科. 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.
- [5] 赵兵朝, 刘飞, 凡奋元, 王建文, 侯恩科, 刘浪, 张杰. 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.
- [6] 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(自然科学版), 2016, 35(6): 566-570.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 艾顺岭. 串草圪旦煤矿综放条件下地表裂隙发育规律[J]. 水力采煤与管道运输, 2015(1): 81-82.
- [10] 侯恩科, 首召贵, 徐友宁, 杨帆, 何芳, 谢晓深, 高冠杰. 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, 45(6): 102-110.