



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)

地球科学与测绘



移动扫码阅读

侯恩科,陈育,车晓阳,等.浅埋煤层过沟开采覆岩破坏特征及裂隙演化规律研究[J].煤炭科学技术,2021,49(10):185-192. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.10.025

HOU Enke, CHEN Yu, CHE Xiaoyang, et al. Study on overburden failure characteristics and fracture evolution law of shallow buried coal seam through trench mining[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(10): 185-192. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.10.025

浅埋煤层过沟开采覆岩破坏特征及裂隙演化规律研究

侯恩科¹, 陈育¹, 车晓阳¹, 谢晓深¹, 高彬²

(1.西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2.陕煤集团神木张家峁矿业有限公司, 陕西 神木 719316)

摘要:浅埋煤层覆岩破坏规律及裂隙发育特征是影响矿井涌水有关系,尤其在地表沟谷区,由于剥蚀作用使煤层埋深减小,为了研究清楚浅埋煤层过沟开采时,上覆岩层的扰动破坏规律与裂隙发育特征,以榆神矿区张家峁煤矿 14213 工作面的过沟段为研究对象,通过相似材料物理模拟与数值模拟的方法,对覆岩的破坏规律及裂隙发育特征进行了研究。结果表明,煤层开采过程中,顶板覆岩会伴随产生层间离层与切穿岩层的垂向裂隙,回采至 60 m 时,煤层顶板悬露面积达到极限发生垮落,原有层间离层伴随垮落消失,新出现的层间离层继续向上发展,离层空间与垂向裂隙交替发育,回采至 105 m 时,垂向裂隙导通至地表,离层结构完全破坏,岩层发生整体下沉。裂缝的动态发育规律是:斜坡裂缝的宽度随着开挖的进行由小变大并趋于稳定,坡脚裂缝的宽度则是由小变大、再变小至闭合,沟底裂缝的宽度由小变大再变小的趋势。地表裂缝的这种演化规律主要与地形和地表应力状态有关。坡肩和斜坡上部,采动裂缝形成后受斜坡拉应力的影响而宽度增大;坡脚采动裂缝形成后受坡脚压应力的影响而宽度变小甚至闭合;沟底采动裂缝形成后受压应力和坡段岩块压实调整宽度变小。

关键词:浅埋煤层;覆岩破坏;地表裂缝演化;过沟开采

中图分类号:TD325 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2021)10-0185-08

Study on overburden failure characteristics and fracture evolution law of shallow buried coal seam through trench mining

HOU Enke¹, CHEN Yu¹, CHE Xiaoyang¹, XIE Xiaoshen¹, GAO Bin²

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

2.Shenmu Zhangjiamao Mining Co., Ltd., Shaanxi Coal and Chemical Industry Group, Shenmu 719316, China)

Abstract: The overburden failure law and fracture development characteristics of shallow coal seam are the main factors affecting the mine water inflow and ventilation, especially in the surface gully area, because of the denudation, the coal seam buried depth is further reduced. In order to study the disturbance failure law and fracture development characteristics of overlying strata when mining through trench in shallow coal seam, taking the trench section of No.14213 working face of Zhangjiamao Coal Mine in Yushen Mining Area as the research object, the failure law and fracture development characteristics of overlying strata are studied by means of physical simulation and numerical simulation of similar materials. The results show that in the process of coal mining, the roof overlying rock will produce vertical fractures of interlayer separation and cut through strata. When mining to 60 m, the roof hanging area of coal seam reaches the limit and collapses. The original interlayer separation disappears with collapses. The new interlayer separation continues to develop upward. The separation space and vertical fractures develop alternately. When mining to 105 m, the vertical fractures lead to the ground; the separation structure is completely damaged, and the rock stratum is sinking as a whole. The dynamic development law of the cracks is: the width of the slope cracks increases and tends to be stable with the excavation; the width of the slope foot cracks changes from small to large, then to

收稿日期:2020-10-25;责任编辑:曾康生

基金项目:陕西煤业化工集团科研资助项目(2018SMHKJ-A-J-03, 2018SMHKJ-C-31)

作者简介:侯恩科(1963—),男,陕西扶风人,教授,博士生导师。

通讯作者:陈育(1995—),女,陕西西安人,硕士研究生。E-mail:1207695296@qq.com

close, and the width of the bottom cracks changes from small to large and then to small. The evolution law of surface fractures is mainly related to the topography and surface stress state. In the shoulder and upper part of the slope, the width affected by the tensile stress of the slope increases after the formation of the mining fracture; the width affected by the compressive stress of the slope toe decreases or even closes after the formation of the mining fracture at the slope toe; the width of the compressive stress and the compaction adjustment of the slope rock block decreases after the formation of the mining fracture at the ditch bottom. The research results have important reference value for the crack control and water damage control of shallow coal mining channel.

Key words: shallow seam; overburden failure; evolution of ground crack; mining pass through trench

0 引言

我国西部煤炭资源丰富,煤炭资源量占据全国煤炭资源总量的70%以上^[1]。西部黄土沟壑地貌发育,煤炭开采因煤层埋藏浅而引发的沟道地面塌陷裂缝溃水灾害对矿井安全开采威胁严重^[2-3]。因此研究煤层开采覆岩破坏特征及地表裂隙演化规律对沟道塌陷裂缝溃水灾害防治有着重要意义。

胡永忠等^[4]研究了煤层群混合开采覆岩裂隙发育规律,得出了裂采比和煤层复合厚度之间呈对数关系,裂隙发展高度和煤层顶板下沉量之间呈三次多项式关系;程志恒等^[5]采用相似模拟试验研究了近距离煤层群叠加开采的围岩应力-裂隙动态演化特征,得出由于形成稳定顶板结构的随机性,覆岩裂隙频数呈台阶式增长;文献[6-9]研究了特厚煤层的覆岩破坏特征和地表裂缝发育规律,推导出地表拉裂缝与剪裂缝发育影响范围的理论计算公式,认为煤层开采后覆岩破坏实测高度小于经验预计数值;张聚国等^[10]研究了昌汉沟煤矿浅埋深煤层开采地表移动变形规律,认为浅埋煤层基本上为垮落带和断裂带所构成的“两带”,浅埋煤层的顶板基岩沿全厚切落,基岩破断角较大,破断直接波及地表;胡振琪等^[11]研究了风沙区采煤沉陷地裂缝的分布发育规律,结果表明高强度开采动态地裂缝的两侧无明显落差,动态裂缝超前距与工作面日进尺量呈现明显的线性正相关,边缘裂缝以“带状”、“O”形圈的形态分布在工作面开采边界的内侧;台晓丽等^[12]研究了地裂缝对表层土壤含水量的影响,认为采煤沉陷裂缝对表层土壤含水量影响不大,在较短时间内可实现自修复。在动态裂缝整个发育周期内,裂缝周边表层土壤含水量呈现出一个先下降后上升再小幅度下降又上升的趋势;陈超等^[13]研究了风沙区采煤沉陷地裂缝对土地的小尺度破坏特征,指出动态地裂缝短期内将对土地造成严重破坏,而边缘裂缝对土地破坏的时间较长;范钢伟等^[14]研究了神东矿区浅埋煤层长壁开采条件下覆岩移动与裂隙发育的动态演变特征,得出随工作面的推进,覆岩会出现

与地表同步垮落的现象;马瑞等^[15]认为浅埋近距煤层开采时上覆岩层的运移以垂直为主,上部煤层开采后其覆岩关键层破断块体结构的稳定性是影响下部煤层开采时工作面矿压显现强烈程度的重要因素;黄庆享等^[16-17]研究了煤层群下煤层采场上覆岩层裂隙二次扩展的基本特征和应力场分布,给出了裂隙扩展方向、起裂应力强度因子、扩展速度和裂隙发育高度计算公式;刘纯贵^[18-19]认为浅埋煤层开采时地表下沉最大处出现在地表沉陷区的中部,上覆岩层的垮落从直接顶开始,逐步扩展至松散层,呈倒梯形整体下沉;董国华等^[20]以酸刺沟煤矿为试验矿井,采用深基点和数值模拟试验对浅埋中硬特厚煤层采动覆岩运动的破坏规律进行了研究,认为工作面覆岩存在短时间急剧下沉形式和长时间阶段非均匀下沉2种形式;李东发等^[21]应用室内相似材料模拟和地表钻孔实测方法研究了沙吉海煤矿厚煤层综放开采采动裂缝发育的基本特征,得到了该地区的裂采比及垮采比。上述研究对浅埋煤层覆岩破坏和裂隙发育的基本特征及规律进行了全面深入的研究,但以往的研究工作对沟谷型地貌特征条件下的浅埋煤层开采过程中覆岩破坏及裂隙发育规律研究相对较少。

笔者以榆神矿区张家峁煤矿14213工作面为例,通过相似材料模拟、数值模拟与实测资料结合的方法,对过沟开采覆岩破坏特征及裂隙演化规律进行研究,得出了沟谷形态下煤层覆岩的垮落及地表裂缝的发育规律,为浅埋煤层过沟开采水害防治提供参考。

1 工作面概况

张家峁井田位于陕北黄土高原与毛乌素沙漠的接壤地带,煤炭资源储量丰富,开采强度大。14213工作面为典型的过沟开采工作面,工作面距开切眼2 693 m处,老来沟自西南向东北方向穿过整个工作面,沟段长约376 m,沟道平均宽度5.6 m,如图1所示。14213工作面主采煤层是4⁻²煤,4⁻²煤为一近水平煤层,煤层平均厚度3.83 m,结构简单。工作面采用综合机械化采煤方法开采,采用自然垮落法管理

顶板,工作面走向设计长约 3 051 m,倾向设计长约 300 m。地形起伏多变,沟谷纵横,工作面煤层覆岩厚度 18.92~73.76 m,上覆岩层岩性以粉砂岩、细砂

岩及中砂岩为主,过沟段 AB 的剖面图如图 2 所示。因煤层埋藏较浅,煤层回采至该段后,可能引发沟道溃水灾害事故的发生。

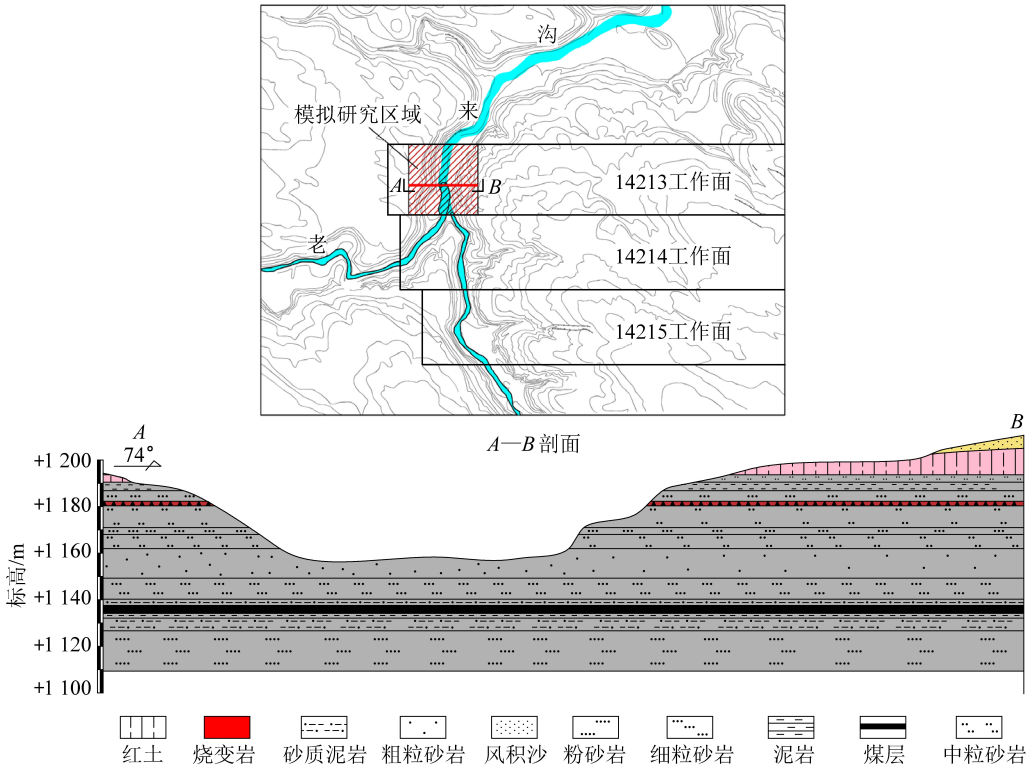


图 1 矿区位置

Fig.1 Location of mining area

2 覆岩破坏特征相似材料模拟

2.1 相似材料模拟模型的建立

过沟段地层岩性、厚度及其物理力学性质见表

1。据此地层岩性及结构特征,建立相似比为 1 : 150 的相似材料模拟模型。按照相似材料配比进行分层建模,所建模型尺寸长×高×宽为 200 cm×80 cm×20 cm。

表 1 地层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of ground

岩层	层厚/m	密度/(kg·m ⁻³)	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
沙土	2.00	2 183	4 210	520	6.50	38.13	1.27
红土	34.55	2 560	4 210	1 520	6.50	38.13	1.27
中粒砂岩 1	3.04	2 750	2 270	1 620	6.80	44.50	0.76
泥岩 1	3.97	2 700	221	182	6.80	41.30	1.03
细粒砂岩 1	4.68	2 700	5 210	1 520	6.50	38.13	1.77
烧变岩	1.67	2 630	5 210	1 520	6.50	22.50	1.67
中粒砂岩 2	9.61	2 730	3 270	1 820	6.80	44.50	0.76
粉砂岩 1	3.01	1 390	6 210	1 520	8.11	38.8	1.28
中粒砂岩 2	6.17	2 650	2 270	1 820	6.80	44.50	0.76
粗粒砂岩 1	12.60	2 490	4 760	2 490	5.96	38.39	1.64
细粒砂岩 1	9.11	2 650	3 210	1 520	8.50	38.13	1.47
泥质粉砂岩 1	2.68	2 680	2 750	1 450	7.15	32.20	0.81
4 ⁻² 煤	3.50	2 080	860	840	3.16	37.5	0.94
泥岩 2	1.96	2 760	121	77	6.80	41.30	0.83
泥质粉砂岩 2	5.39	2 720	1 750	860	7.15	32.20	1.27
粉砂岩 2	17.71	2 720	5 670	1 120	6.40	38.65	0.81

材料配比主要采用河沙、石膏、碳酸钙和水等,沙的密度取 1.6 g/cm^3 ,煤的密度取 1.3 g/cm^3 。按确定的配比材料模拟不同岩性的岩层,层间铺设云母粉模拟岩层层理。煤岩层沿水平方向铺设并直接铺至地表,并在模型中间形成“U”型沟谷。根据模型起伏情况,在

地层时代	岩层	层厚/m
Q_4^{2001}	沙土	2
N_2b	红土	34
J_2y^4	中粒砂岩1	3
	泥岩1	4
	细粒砂岩1	5
	烧变岩	2
	中粒砂岩2	10
J_2y^3	粉砂岩1	3
	中粒砂岩2	6
	粗粒砂岩1	12
	细粒砂岩1	9
J_2y^2	砂质泥岩1	3
	4-2煤	4
	泥岩2	2

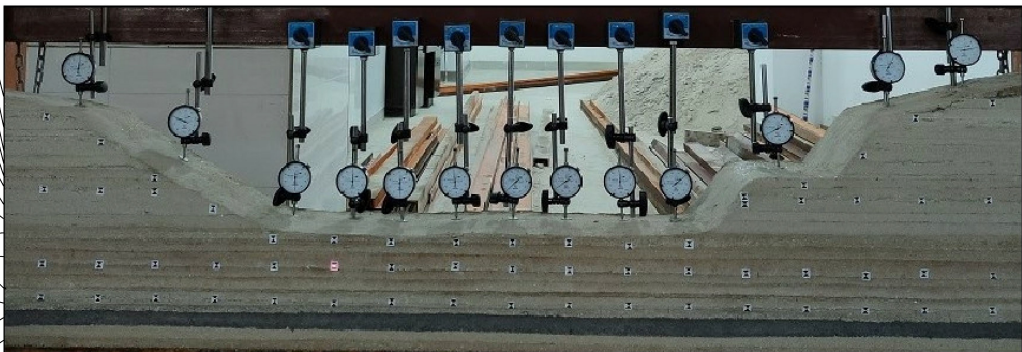


图3 相似模拟模型

Fig.3 Similar simulation model

2.2 覆岩破坏过程

模型两端各留设宽 20 cm 煤柱,从左至右进行开采,为了能更便于理解实际的煤层覆岩破坏情况,以下均以实际原型的数值对试验现象进行描述。

当工作面开采至 45 m 时,煤层直接顶板发生弯曲下沉,形成层间 1 号离层。随着开采推进,离层宽度加大,当回采至 60 m 时,顶板发生初次垮落,垮落体长度为 45 m,离层随垮落体消失,原离层上方重新发育 2 号与 3 号离层,3 号离层空间腔体长度 14.25 m,腔体宽度 0.15 m;工作面开切眼处与开采煤壁位置发育竖向裂隙,开切眼处裂隙长 2.25 m,与水平方向夹角为 52° ,如图 4 所示。

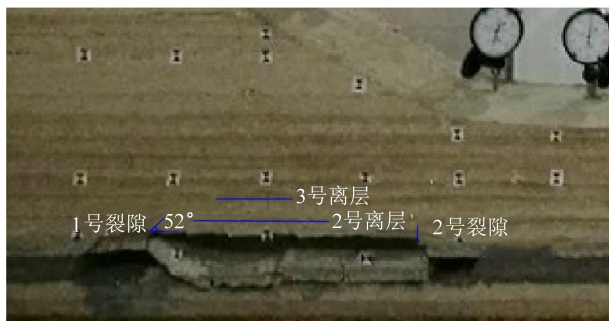


图4 工作面推进 45 m 覆岩破坏

Fig.4 Working face advancing space 45 m overlying rock fracture

累计推进 75 m 时,煤层顶板发生第 1 次周期垮落,垮落步距为 15 m,垮落体近开切眼侧角度不变,2 号离层随垮落体消失,3 号离层腔体长度进一步增大至 34.5 m,宽度变为 0.45 m;未发育新裂隙。工作面推进至 90 m 时,发生第 2 次周期垮落,垮落步距 15 m,垮落体长度 78.75 m,2 号覆岩裂隙随垮落体

模型正面设置等间距位移监测点,在模型开采过程中,通过全站仪观测各个监测点的相对位置变化情况。模型上部岩层厚度 15~62 cm,4⁻²煤层厚度 2.3 cm,底板岩层厚度 16 cm,如图 3 所示。进行开挖时,每步开挖步距 10 cm,共开挖 16 步,累计开挖 160 cm。

消失,新发育 4 号裂隙,如图 5 所示。并在原 3 号离层上方发育多条离层,6 号离层延伸至地表,并在地表形成地表 1 号裂缝即 F_1 , F_1 裂缝宽 0.15 m。

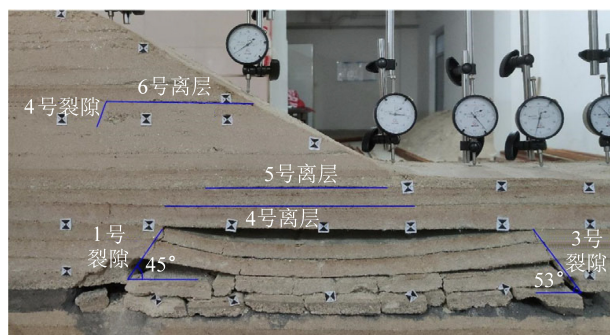


图5 工作面推进 90 m 覆岩破坏

Fig.5 Working face advancing space 90 m overburden fracture

累计推进至 105 m 时,发生第 3 次周期垮落,垮落体长度达到 96.75 m,离层随垮落体消失,回采煤壁位置处发育 6 号裂隙,并贯通至地表,如图 6 所示。

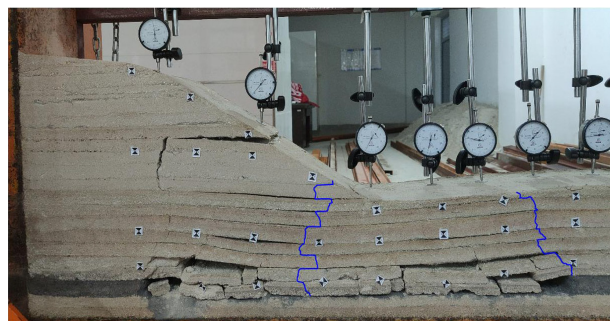


图6 工作面推进 105 m 覆岩破坏

Fig.6 Working face advancing space 105 m overburden fracture

通过上述实验现象,初步分析可知:随着工作面的推进,采空区面积增加,覆岩在重力作用下发生弯曲变形,形成离层,当岩层应力状态超过其强度极限时发生垮落,岩层裂隙与离层空间进一步向上发展,直至发育地表。

2.3 垮落带和断裂带高度发育规律

在工作面开采过程中,对各个位移监测点进行观测和记录,根据检测数据结果,绘制出工作面推进距离与垮落带高度、断裂带高度之间的关系曲线,如图7所示。

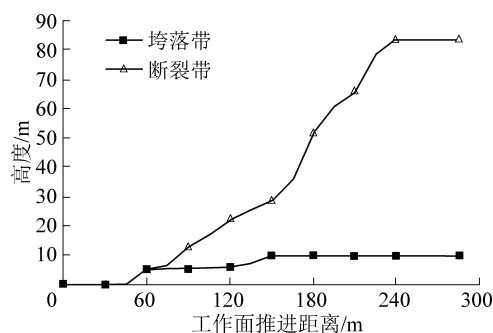
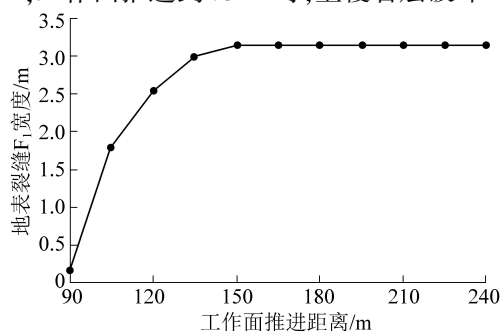


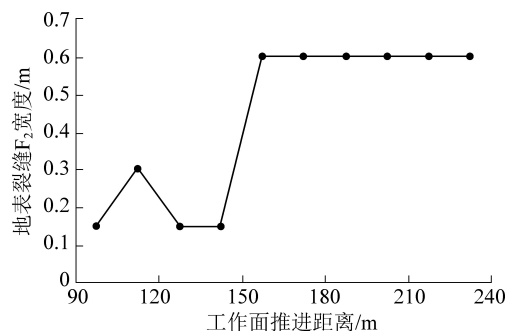
图7 4-2煤层工作面垮落带和断裂带发育规律

Fig.7 Coal seam 4-2 working face caving zone and fracture zone development law

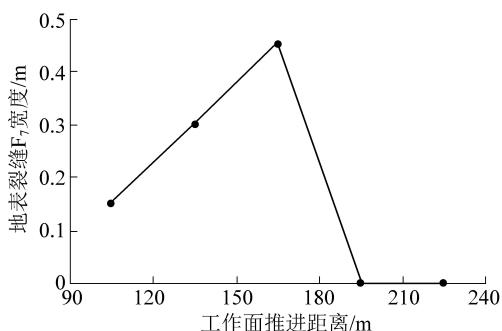
垮落带发育过程:当工作面开始回采时,覆岩破坏程度不明显,一直处于弯曲变形阶段;当工作面推进距离达到60 m时,顶板初次来压,此时垮落带高度达到4.5 m;工作面推进到75 m时,上覆岩层破坏



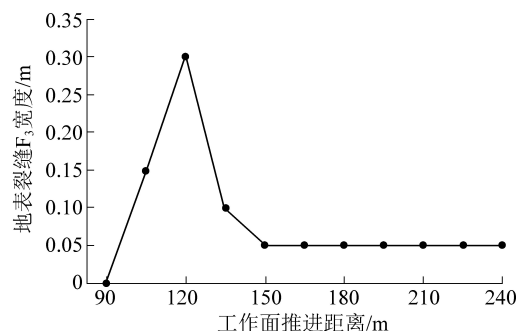
(a) 裂缝F₁



(b) 裂缝F₂



(c) 裂缝F₇



(d) 裂缝F₃

图8 裂缝动态发育过程

Fig.8 Dynamic crack development process

高度出现快速异增长,垮落带高度达到5.25 m;工作面推进到150 m时,垮落带高度达到9.75 m,随着工作面不断向前推进,采空区压实,垮落带高度趋于稳定,高度为9.75 m。

断裂带发育过程:工作面推进至60 m时,发生初次来压,此时导水裂隙带高度5.3 m;随着工作面不断向前推进,裂隙带高度不断增加,工作面推进至105 m时,裂隙带高度为19 m,裂隙带在沟谷部位导通至地表;工作面推进至225 m时,裂隙带在斜坡坡体位置发育至83.85 m。

2.4 地表裂缝发育规律

煤层覆岩裂隙发育是一个动态变化过程,随着煤层的开挖,在开切眼侧上覆岩层开始产生破坏,首先沿边界发育向上的竖向裂隙,之后随工作面开挖在采空区上方出现竖向裂缝,这些裂缝与工作面回采方向的夹角在27°~79°,开挖到160 m时竖向裂隙与工作面回采方向的夹角在开切眼处为79°,煤壁处为59°。随着工作面开采的进行,上覆岩层伴随出现离层离层一般出现在岩层垮落周期间隔,并随着上覆岩层的垮落而消失。

模拟模型开挖结束后,在沟谷及两侧坡面地表处共发育8条地表裂缝,裂缝间距分别为18.15、39.45、28.35、21.30、18.90、4.50、34.05 m。不同地貌条件发育的地表裂缝的宽度随时间变化而呈现出不同的动态变化特点(图8)。沟谷及其两侧斜坡不同

部位地表裂缝的宽度及其动态变化特点不同,存在一定的差异。在煤层开采过程中,斜坡中部的地表裂缝 F_1 的发育宽度随着开挖的进行逐渐增大后趋于稳定状态(图8a);斜坡下部地表裂缝 F_2 的宽度则是由小变大、然后迅速变小,随开采的进行再次开裂变大、最终保持不变的稳定状态(图8b);坡脚地表裂缝 F_7 的宽度则是由小变大再变小并逐渐闭合(图8c);U型沟沟底地表裂缝 F_3 的宽度具有由小变大再变小的特点(图8d)。

斜坡上的地表裂缝宽度具有只开不合的特点;发育在坡脚的地表裂缝宽度具有先开后合的特点,最终宽度很小;发育在U型谷中部的地表裂缝具有先开后合的特点,最终宽度较小。

3 地表裂缝数值模拟分析

根据14213工作面钻孔揭露的地层、岩性资料,结合井田岩石力学试验参数,建立该工作面过沟开采的FLAC^{3D}数值模拟模型。模型尺寸长×宽×高为600 m×400 m×230 m,总共开采长度为390 m,每次挖取15 m,共开挖26步。下面主要从应力角度分析裂缝的形成。图9为天然状态下斜坡的应力分布图,垂直方向应力

等值线与地形趋势一致并从地表向下均匀递增。

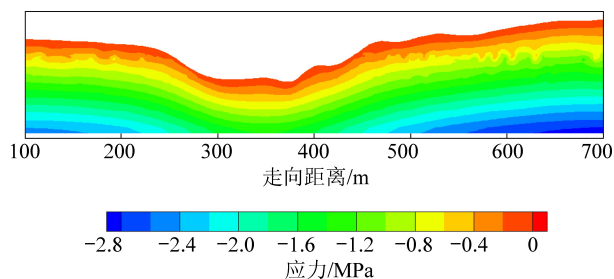


图9 天然状态斜坡应力分布

Fig.9 Stress distribution of natural slope

煤层开采过程中,围岩原始应力状态改变,上覆岩层弯曲、断裂进而造成地表移动变形。当地表变形程度超过其变形临界值时,地表裂缝开始发育。压应力为负,拉应力为正。图10中各图分别为开挖至30、90、135、180、240和390 m的应力分布,图中①—④分别代表坡肩裂缝 F_1 、斜坡下部裂缝 F_2 、沟底裂缝 F_3 和坡脚裂缝 F_7 的应力状态。当回采推过30 m时,采空区上方形成拉应力,但影响范围较小,地表的应力状态较之天然状态下变化不大。当开采至90 m时,左侧坡肩①处地表拉应力逐渐增大,裂缝 F_1 的宽度由于拉应力的以及坡面滑移作用持续

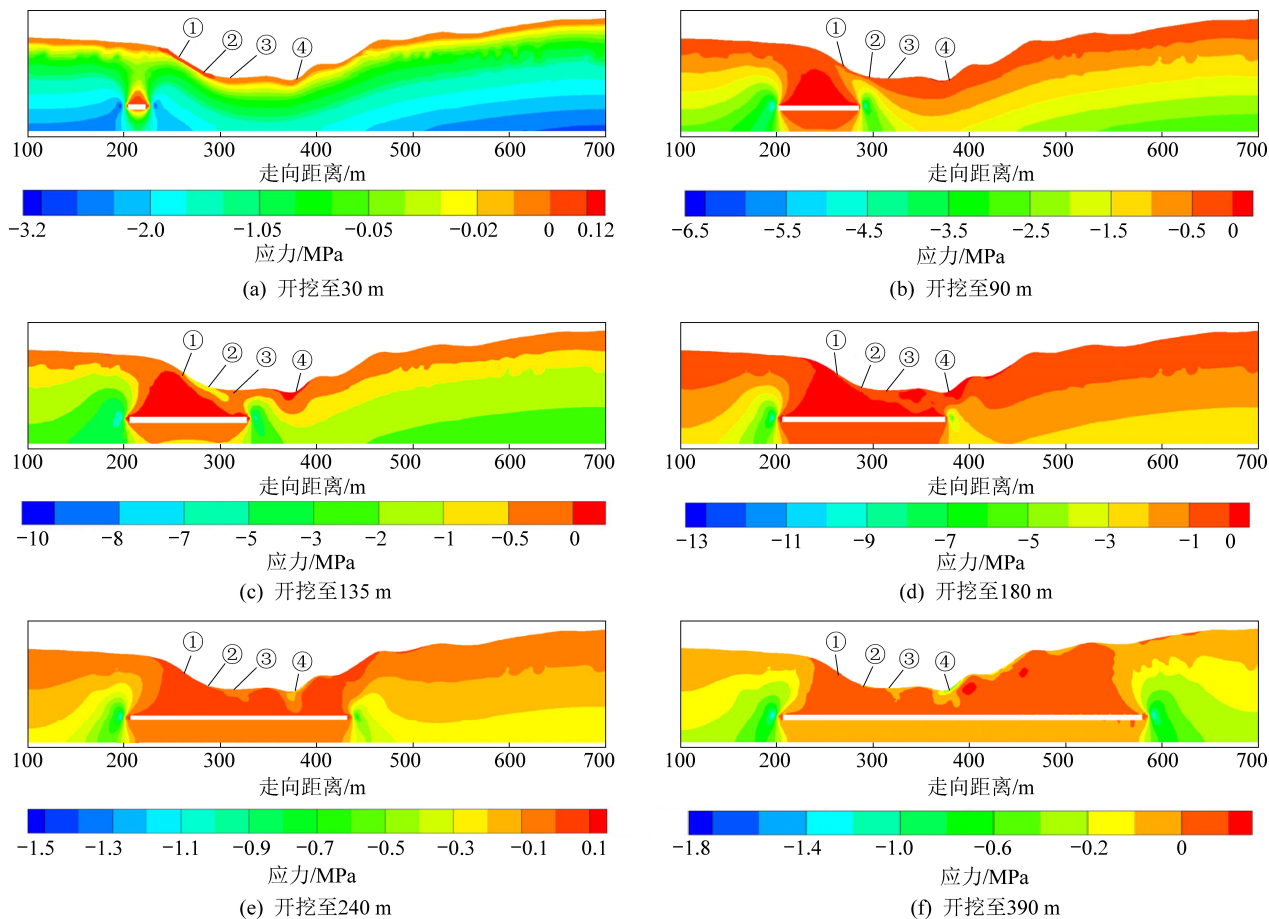


图10 应力分布

Fig.10 Distubition of stress pattern

变大,②—④处应力没有明显变化;开挖至 135 m,坡肩①处应力持续增大,斜坡下部②处变为压应力,分析因为煤层不断开采,斜坡的滑移调整使得裂缝 F_1 宽度持续增大,而斜坡下部裂缝 F_2 宽度在增大后受斜坡滑移影响逐渐变小;③处开挖过后岩块压实调整表现为压应力,裂缝 F_3 缝宽变小,④处无明显变化。开挖至 180 m 时,①、②、③处应力没有明显变化,地表裂缝 F_1 、 F_2 、 F_3 的裂缝宽度趋于稳定,④处拉应力明显增大,坡脚裂缝 F_7 产生。开挖至 240 m 时,①、②、③处应力没有明显变化,地表裂缝 F_1 、 F_2 的裂缝宽度趋于稳定,④处裂缝 F_7 由于斜坡滑移推挤和采空区下沉,受压裂缝宽度逐渐减小甚至闭合。当开挖至 390 m 时,两侧煤壁处主要受压应力作用明显,最大值可达 15.99 MPa,由煤壁两侧向外应力逐渐减小;采空区顶板主要表现为拉应力,最大为 13.66 MPa,采空区上方越靠近采空区拉应力越大,但在沟底以及坡脚地带,近地表呈压应力,使地表裂缝宽度减小,并裂缝趋于闭合。

黄土沟壑区地形对地表裂缝的形成和演化有较大影响。坡肩和斜坡上部天然应力状态总体呈现为拉应力,采动裂缝形成后受斜坡拉应力的影响宽度增大;坡脚地带天然应力状态总体呈现为压应力,采动裂缝形成后,受坡脚压应力和坡体向下滑移的影响宽度变小甚至闭合,沟底尤其是较宽沟道中部,天然应力状态总体呈现为压应力,采动裂缝形成以后受压应力作用和覆岩破断岩块压实调整宽度会变小。

4 结 论

1)随着工作面的推进,采空区面积增加,覆岩在重力作用下发生弯曲变形,形成离层,当变形程度超过岩层的应力极限时,覆岩会破坏变形,部分离层垮落消失。在垮落体上部发育新离层,两侧形成裂隙。覆岩裂隙主要为竖向裂隙,部分裂隙直达地表形成地表裂缝。

2)4⁻²煤层工作面顶板初次垮落步距 60 m,周期性垮落步距平均 15 m,充分采动时覆岩垮落带高度 9.75 m,垮落角在开切眼处为 79°,煤壁处为 59°,工作面推进至 105 m 时,裂隙带导通至地表。

3)地表斜坡裂缝宽度随着开挖的进行不断增大后趋于稳定,坡脚裂缝宽度则由小变大甚至闭合,沟底裂缝宽度则由小变大再变小。地表裂缝宽度的变化主要与地形及地表应力的差异和采动覆岩压实调整有关。

参考文献 (References):

- [1] 王双明,段中会,马 丽,等.西部煤炭绿色开发地质保障技术研究现状与发展趋势[J].煤炭科学技术,2019,47(2):1-6.
WANG Shuangming, DUAN Zhonghui, MA Li, et al. Research status and future trends of geological assurance technology for coal green development in Western China [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(2): 1-6.
- [2] 虎维岳,田 干.我国煤矿水害类型及其防治对策[J].煤炭科学技术,2010,38(1):92-96.
HU Weiyue, TIAN Gan. Mine water disaster type and prevention and control countermeasures in China [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(1): 92-96.
- [3] 武谋达,王建辉,侯恩科,等.大佛寺煤矿顶板涌水规律及影响因素[J].西安科技大学学报,2018,38(4):636-642.
WUMouda, WANG Jianhui, HOU Enke, et al. Roof water bursting rules and influential factors of Dafosi coal mine [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38(4): 636-642.
- [4] 胡永忠,刘长郅,刘长友,等.煤层群混合开采采动裂隙发育规律研究[J].采矿与安全工程学报,2015,32(3):396-400.
HU Yongzhong, LIU Changqie, LIU Changyou, et al. Development regularity of mining-induced fractures in mixed mining of coal seam group [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(3): 396-400.
- [5] 程志恒,齐庆新,李宏艳,等.近距离煤层群叠加开采采动应力-裂隙动态演化特征实验研究[J].煤炭学报,2016,41(2):367-375.
CHENG Zhiheng, QI Qingxin, LI Hongyan, et al. Evolution of the superimposed mining induced stress-fissure field under extraction of close distance coal seam group [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 367-375.
- [6] 徐乃忠,高 超,倪向忠,刘明河.浅埋深特厚煤层综放开采地表裂缝发育规律研究[J].煤炭科学技术,2015,43(12):124-128,97.
XU Naichao, GAO Chao, NI Xiangzhong, et al. Study on surface cracks law of fully-mechanized top coal caving mining in shallow buried depth and extra thick seam [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(12): 124-128, 97.
- [7] 马莲净,赵宝峰,曹海东.特厚煤层分层综放开采软弱覆岩破坏规律研究[J].安全与环境学报,2019,19(2):474-481.
MA Lianjing, ZHAO Baofeng, CAO Haidong. Probe into the failure trend of the loosely overlying strata with the fully-mechanized sub-lever caving in the ultra-thick coal seam [J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(2): 474-481.
- [8] 曹海东.特厚煤层近断层开采覆岩破坏移动特征[J].煤矿安全,2018,49(2):47-50.
CAO Haidong. Damage movement characteristics of overlying strata in near-fault mining of extra-thick coal seam [J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(2): 47-50.
- [9] 李 磊.榆林矿区浅埋深厚土层薄基岩煤层开采覆岩破坏规律研究[J].煤矿开采,2017,22(3):62-64,103.
LI Lei. Study of overburden broken law of coal seam mining with

- deep and thick soil layer with shallow depth in Yulin mine area [J]. Coal Mining Technology, 2017, 22(3): 62-64, 103.
- [10] 张聚国, 栗献中. 昌汉沟煤矿浅埋深煤层开采地表移动变形规律研究[J]. 煤炭工程, 2010(11): 74-76.
- ZHANG Juguang, LI Xianzhong. Study on surface movement and deformation of shallow buried deep coal seam in Changhangou coal mine [J]. Coal Engineering, 2010(11): 74-76.
- [11] 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.
- HU Zhenqi, WANG Xinjing, HE Anmin. Distribution characteristic and development rules of ground fissures Due to coal mining in windy and sandy region [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 11-18.
- [12] 台晓丽, 胡振琪, 陈超. 风沙区采煤沉陷裂缝对表层土壤含水量的影响[J]. 中国煤炭, 2016, 42(8): 113-117.
- TAI Xiaoli, HU Zhenqi, CHEN Chao. Effect of mining subsidence fissure on moisture of surface soil in aeolian sand area [J]. China Coal, 2016, 42(8): 113-117.
- [13] 陈超, 赵艳玲, 何厅厅, 等. 风沙区采煤沉陷地裂缝对土地的小尺度破坏特征[J]. 煤炭工程, 2016, 48(1): 130-132.
- CHEN Chao, ZHAO Yanling, HE Tingting, et al. Small-scale land destruction features caused by coal mining subsidence ground cracks in windy desert area [J]. Coal Engineering, 2016, 48(1): 130-132.
- [14] 范钢伟, 张东升, 马立强. 神东矿区浅埋煤层开采覆岩移动与裂隙分布特征[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(2): 196-201.
- FAN Gangwei, ZHANG Dongsheng, MA Liqiang. Overburden movement and fracture distribution induced by longwall mining of the shallow coal seam in the Shendong coalfield [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(2): 196-201.
- [15] 马瑞, 来兴平, 曹建涛, 等. 浅埋近距煤层采空区覆岩移动规律相似模拟[J]. 西安科技大学学报, 2013, 33(3): 249-253.
- MA Rui, LAI Xingping, CAO Jiantao, et al. Similar simulation on strata movement of gob in shallow-contiguous seams [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2013, 33(3): 249-253.
- [16] 黄庆享, 韩金博. 浅埋近距离煤层开采裂隙演化机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(4): 706-711.
- HUANG Qingxiang, HAN Jinbo. Study on fracture evolution mechanism of shallow-buried close coal seam mining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(4): 706-711.
- [17] 黄庆享, 杜君武, 侯恩科, 等. 浅埋煤层群覆岩与地表裂隙发育规律和形成机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(1): 7-15.
- HUANG Qingxiang, DU Junwu, HOU Enke, et al. Research on overburden and ground surface cracks distribution and formation mechanism in shallow coal seams group mining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(1): 7-15.
- [18] 刘纯贵, 马脊梁煤矿浅埋煤层开采覆岩活动规律的相似模拟[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1): 7-15.
- LIU Chungui. Similar simulation study on the movement behavior of overlying strata in shallow seam mining in Majiliang coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 7-15.
- [19] 刘纯贵, 白洞煤矿大采高综采工作面顶板控制研究[J]. 煤矿开采, 2010, 15(5): 89-91.
- LIU Chungui. Roof control of full mechanized mining face with large mining height in Baidong colliery [J]. Coal Mining Technology, 2010, 15(5): 89-91.
- [20] 董国华, 王世东, 王晓蕾. 浅埋中硬特厚煤层综放工作面覆岩运动破坏规律研究[J]. 煤炭工程, 2014, 46(7): 85-87, 90.
- DONG Guohua, WANG Shidong, WANG Xiaolei. Study on movement and failure law of overlying strata of fully mechanized top coal caving face in shallow medium-hard extremely thick coal seam [J]. Coal Engineering, 2014, 46(7): 85-87, 90.
- [21] 李东发, 宋业杰, 李磊. 沙吉海煤矿厚煤层综放开采覆岩破坏特征研究[J]. 煤矿开采, 2016, 21(5): 68-70.
- LI Dongfa, SONG Yejie, LI Lei. Overburden strata broken characters of fully mechanized top coal caving with thickness coal seam in Shajihai coal mine [J]. Coal Mining Technology, 2016, 21(5): 68-70.