

# 特厚煤层采动覆岩裂隙演化规律物理 及数值模拟研究

Physical and Numerical Simulation Study on the Evolution Law of Overlying Rock  
Fractures Caused by Mining in Extra-thick Coal Seams

陈德山<sup>1</sup>, 杨婉欣<sup>1</sup>, 张建江<sup>2</sup>, 焦健<sup>1</sup>, 周继国<sup>1</sup>

(1. 兰州石化职业技术大学资源环境工程学院, 甘肃兰州 730207; 2. 甘肃靖远煤电股份有限公司魏家地煤矿, 甘肃白银 730913)

**摘要:**为准确掌握靖远矿区特厚煤层采动覆岩裂隙演化分布规律,为回采过程中瓦斯抽采系统的布置提供依据,以魏家地矿北1103工作面为试验原型,采用物理相似模拟和 UDEC 数值模拟相结合的方式开展工作面回采试验,统计特厚煤层采动覆岩周期来压规律,分析回采过程中围岩应力的变化规律,研究特厚煤层采动裂隙的演化分布规律。结果表明:最后一次周期来压时,裂隙带和垮落带停止向上发育,高度分别为 39.1 m 和 127.9 m;围岩应力集中区应力呈轴对称分布,分布范围为 8.94 ~ 19.8 MPa,卸压区的应力呈抛物线分布,分布范围为 0.22 ~ 1.46 MPa;卸压区的高度及位移最大区高度随煤层采高的增大逐渐增大,其中卸压区高度的增高趋势趋缓,变化范围为 70.4 ~ 81.2 m,位移最大区的高度变化范围为 52.4 ~ 74.8 m,其宽度随采高的增大而减小,变化范围为 102.3 ~ 71.6 m;采高从 6 m 增加到 12 m 时,主关键层出现显著的下沉变形,上方无明显裂隙,下方裂隙激增,采空区压实区宽度减小、高度增加。

**关键词:**特厚煤层;物理模拟试验;数值模拟试验;采动裂隙

中图分类号:TD327

文献标志码:A

文章编号:1672-609X(2023)05-0036-07

**Abstract:** In order to accurately grasp the evolution and distribution law of overlying strata fissures in extra-thick coal seam mining in Jingyuan mining area, and provide a basis for the layout of gas extraction system in the course of mining, the north 1103 working face of Weijiadi mine was taken as an experimental prototype, by means of combining physical similarity simulation with UDEC numerical simulation, the mining test of working face is carried out, and the law of cyclic weighting of overlying strata in extra-thick coal seam is calculated, and the variation law of surrounding rock stress during mining is analyzed, the evolution and distribution law of mining fracture in extra-thick coal seam is studied. The results show that the fracture zone and the collapse zone stop developing upward at the last periodic weighting, the heights are 39.1 m and 127.9 m respectively, and the stress distribution in the stress concentration zone of the surrounding rock is axisymmetric, the distribution range is 8.94 MPa something 19.8 MPa, the stress distribution in the pressure relief area is parabola, and the distribution range is 0.22 MPa something 1.46 MPa. The height of the pressure relief area and the height of the maximum displacement area gradually increase with the increase of coal seam mining height, and the increase trend of the height of the pressure relief area tends to be slow, the variation range is 70.4 m something 81.2 m, the height of maximum displacement area is 52.4 m something 74.8 m, its width decreases with the increase of mining height, and the variation range is 102.3 m something 71.6 m, the main key stratum has obvious subsidence deformation, no obvious fissure above, fissure surge below, the width of compacted area in goaf decreases and the height increases.

**Key words:** extra-thick coal seam; physical similarity simulation; numerical simulation; mining fracture

## 1 前言

近年来,随着煤层开采深度的增加和煤矿自动化程度的提高,矿井瓦斯涌出量也随之增大,瓦斯灾害已成为制约煤矿安全高效生产的关键因素<sup>[1-2]</sup>。在“双碳”目标下,煤与瓦斯共采技术已成为煤炭绿色开采的关键技术<sup>[3-4]</sup>。瓦斯抽采过程中,工作面上覆岩层裂隙的密度、连续性对瓦斯抽采效率有极

[作者简介] 陈德山(1984—),男,副教授,主要从事矿井瓦斯防治、矿井火灾防治方面的研究。

[基金项目] 甘肃省教育厅创新基金项目(2022A-220);兰州石化职业技术大学教科研项目(KJ2021-10)

[引用格式] 陈德山,杨婉欣,张建江,等.特厚煤层采动覆岩裂隙演化规律物理及数值模拟研究[J].中国矿山工程,2023,52(5):36-42.

大影响,尤其是工作面推进过程中采动覆岩裂隙的演化规律对瓦斯抽采及瓦斯控制至关重要<sup>[5]</sup>。

针对覆岩受煤层开采扰动影响后的活动规律及裂隙网络发育特征,众多学者进行了大量的研究,取得了丰硕的成果。对于采动覆岩裂隙形态,钱鸣高、许家林<sup>[6]</sup>利用模型实验、图像分析、离散元模拟等方法,对上覆岩层采动裂隙分布特征进行了研究,提出了“O”型圈模型。袁亮<sup>[7]</sup>以顾桥煤矿1115工作面为试验点,运用实时监测手段、COSFLOW数值模拟及CFD模拟技术对工作面采动覆岩裂隙场进行了研究,提出了高位裂隙环形模型。伍永平<sup>[8]</sup>等采用理论分析与数值模拟对煤层开采过程中围岩变形破坏规律进行研究,发现围岩应力分布特征呈“拱壳”型、工作面围岩塑性区分布呈“马鞍形”分布。基于关键层理论,李树刚<sup>[9]</sup>利用数值模拟与物理相似模拟相结合的方法,提出了多因素影响下的采动裂隙呈“椭抛带”分布。杨科<sup>[10]</sup>通过物理相似模拟试验及现场观测相结合的方法,研究了关键层运移时采动裂隙的动态演化规律,发现沿工作面走向采动裂隙随关键层破断“跳跃式”向上扩展。刘洪涛<sup>[11]</sup>通过对大采高综放工作面覆岩的断裂过程与覆岩运移规律进行研究,得出导水裂隙带内岩层随工作面推进表现为“台阶下沉”,同层岩层下沉趋势沿走向表现为“急剧下降—稳定(最大值)—快速上升—稳定(最小值)”的研究结论。文献<sup>[12-16]</sup>运用

物理模拟、数值模拟及理论分析相结合的方法,对采动覆岩裂隙的演化规律进行了研究,获得了围岩应力演化和来压规律,为预防顶板事故的发生提出了解决方法。文献<sup>[17-18]</sup>对不同条件下的采动覆岩裂隙演化规律进行研究,为瓦斯抽采系统的布置奠定了基础,解决了回采过程中瓦斯频繁超限的难题。

通过文献检索,众多学者对薄煤层及厚煤层采动覆岩变形破坏规律开展了大量研究,但针对特厚煤层采动覆岩变形破坏规律研究较少。本文以魏家地煤矿北1103工作面的为试验原型,基于物理相似模拟试验,对采动裂隙的发育特征进行分析,通过数值模拟试验,对工作面采动覆岩应力、位移及裂隙分布规律进行研究,以期掌握厚煤层采动裂隙场演化分布规律,为回采过程中瓦斯抽采系统的布置提供参考依据。

## 2 物理相似模拟试验

### 2.1 试验原型及相似设计

试验以魏家地矿北1103工作面为基本原型,该工作面走向长度785 m,倾斜长度205 m,地面标高1 655~1 676 m。煤层倾角7°~23°,平均12°,煤层厚度5.71~16.96 m,平均可采厚度9.2 m。采用走向长臂综合机械化一次采全高采煤法,用全部垮落法管理顶板。煤岩层的物理力学参数见表1。

表1 北1103工作面顶板岩层物理力学参数

岩层名称	岩层序号	厚度/ m	密度/ kg·m <sup>-3</sup>	体积模量/ GPa	剪切力/ GPa	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ MPa	抗拉强度/ MPa
砂质泥岩	15	26.67	2 510	2.56	2.36	36	2.16	1.25
中粒砂岩	14	5	2 560	4.2	2.9	34	5	1.5
细粒砂岩	13	10.97	2 630	5	3.8	35	6	2.5
粉砂岩	12	16.05	2 630	5	3.8	35	6	2.5
粗粒砂岩	11	3.36	2 560	4.2	2.9	34	5	1.6
泥岩粉砂岩互层	10	26.67	2 483	9.97	7.35	32	1.2	1.58
粉砂岩	9	8.34	2 630	5	3.8	35	6	2.5
中粗粒砂岩	8	4.78	2 560	4.2	2.9	34	5	1.5
砂质泥岩	7	6.7	2 530	5.12	4.73	40	2.45	2.01
粉砂岩	6	2.74	2 630	5	3.8	35	6	2.5
细粒砂岩	5	6.06	2 540	2.7	1.6	35	2	1
粗粒砂岩	4	9.05	2 560	4.2	2.9	34	5	1.5
细粉砂岩	3	1.01	2 540	2.7	1.6	35	2	1
碳质砂岩	2	0.45	2 461	6.08	3.47	30	1.2	0.605
煤层	1	9.2	1 420	2.5	1.72	21	1.9	0.21

试验利用大比尺相似模拟试验系统进行,模型几何相似常数取值为100,模拟开采长度170 m,两侧留设8 m边界煤柱,开切眼为8 m,日进尺为5 m、

推进2次,工作面共推进33次。试验模型相似常数见表2。

表2 试验模型相似常数

模型尺寸/mm × mm × mm	相似常数					
	几何 $a_L$	时间 $a_t$	容重 $a_\gamma$	泊松比 $a_\mu$	应力 $a_\sigma$	强度 $a_E$
2 100 × 200 × 1 100	100	100	1.5	1.0	150	150

为准确模拟采动影响覆岩的位移变化规律,在模型上共布置10条监测线监测顶板覆岩的垮落情况,其中第1条监测线距煤层的距离为5 cm,各监测线之间的距离为10 cm,每个监测线布置19个测点。试验时,对煤层进行分步开挖,模拟工作面推进过程中覆岩“三带”的变化规律。模型布置如图1所示。

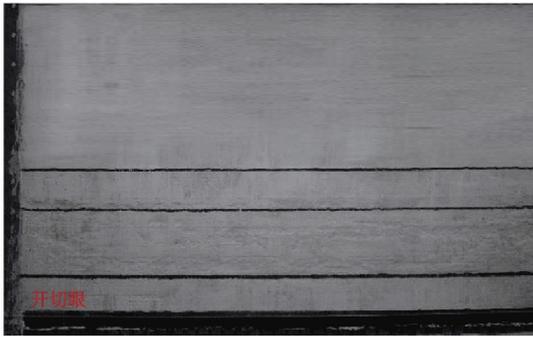


图1 物理相似模型布置图

## 2.2 采动覆岩破断及运移规律

不同推进距离下采动覆岩裂隙发育及垮落特征

如图2所示。

从图2可以看出:当工作面推进至30 m时,直接顶垮落发生初次来压,垮落高度距煤层顶板4.5 m,离层裂隙向上发展至距顶板18 m处,此时,工作面两端出现破断裂隙,并与离层裂隙相互贯通;当工作面推进至41 m时,采空区覆岩基本顶第1次周期来压,覆岩大范围垮落,垮落高度距煤层顶板18 m,离层裂隙距煤层顶板29 m,此时岩梁出现不明显弯曲现象,形成初始铰接结构;当工作面推进至84 m时,发生第4次周期来压,覆岩垮落高度距煤层顶板41.5 m,离层裂隙发育至距顶板54 m;当工作面推进至162 m时,工作面发生第8次周期来压,此时垮落岩层形成的铰接结构趋于稳定,离层裂隙不再发育,垮落高度不再向上发展,采空区基本被压实。根据统计,在整个工作面回采期间,共发生8次矿压显现,平均周期来压步距为16.5 m,首次来压步距为30 m,周期来压的具体的统计数据见表3。



(a) 推进至30 m,初次来压



(b) 推进至41 m,第1次周期来压



(c) 推进至84 m,第4次周期来压



(d) 推进至162 m时,第8次周期来压

图2 不同推进距离下采动覆岩裂隙发育及垮落特征

表3 工作面周期来压步距

推进距离/m	41	53	70	84	106	122	140	162	平均
来压步距/m	10	11	17	16	21	16	21	20	16.5

煤层开采后上覆岩层 10 条测线的垂直位移变化曲线如图 3 所示。

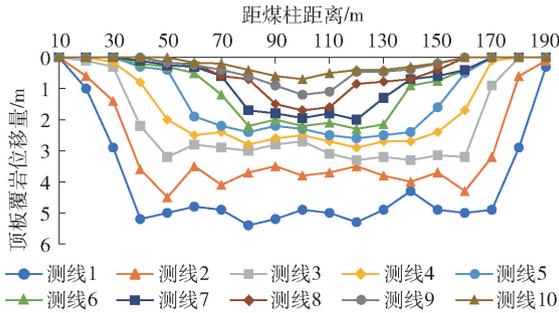


图3 覆岩垂直位移变化曲线图

从图中可以看出,测线 1 与测线 2 之间的距离较大,测线 2 至测线 4 之间的距离逐渐减小,在周期来压处,测点的位移量达到最大值,且测线 1 的下沉量接近煤层厚度,因此可以认为测线 2 下方为冒落带。测线 4 至测线 7 之间测点位移量变化幅度不大,测线之间的距离较为紧密,为裂隙带。裂隙带和弯曲下沉带范围内的岩体,呈现连续动态下沉的移动过程具有连续性,且离顶板距离越大,连续性越强。在冒落带之下的覆岩,其最大位移量基本上在周期来压处,而弯曲下沉带和裂隙带内最大位移量基本位于采空区中部。结合物理相似模拟试验和覆岩位移规律,得到冒落带高度为 39.1 m,裂隙带高度为 127.9 m。

### 3 采动裂隙场数值模拟

UDEC 数值模拟软件是一种以非连续体为模拟单元的二维数值模拟计算程序,具有内置节理多、可选材料丰富特点,可以表征不同力学性质的岩体采动影响后其节理、裂隙的发育变化规律,能够定量分析采动过程中覆岩点位应力及位移的变化量。本次数值模拟基于北 1103 工作面的实际地质条件,采用离散元程序 UDEC 分析工作面回采过程中上覆岩层塑性区演化范围、采动裂隙场应力分布、位移分布、裂隙分布特征。

#### 3.1 模型的建立

##### 1) 初始条件

煤岩层力学参数是数值模拟的关键环节,北 1103 工作面煤岩层力学参数见表 4。

表4 煤岩层力学基本参数

岩性	容重/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模量/MPa	抗压强度/MPa
泥岩	13.86	65.92	0.069
砂质泥岩	17.58	189.23	0.162
中砂岩	17.63	168.12	0.216
煤	9.74	47.16	0.042
细砂岩	17.48	143.42	0.232
粉砂岩	17.34	182.44	0.196

##### 2) 边界条件

在充分考虑边界效应的基础上,建立二维煤岩体几何模型,设置模型长为 350 m,高为 220 m,工作面长度 170 m,同时设置随机分布的微裂隙表示岩体的初始损伤。上部边界设置 6.85 MPa 的均匀向下载荷(模拟上覆岩层的自重载荷);下部边界设定为固定位移边界条件;两侧边界条件均为实体煤岩体,设定为位移边界条件,边界设置按深度变化的载荷,测压系数为 1。数值模型如图 4 所示。

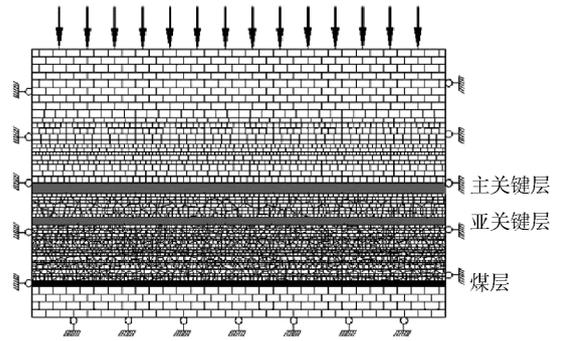


图4 数值计算模型

##### 3) 模拟方案

魏家地矿北 1103 工作面采用走向长臂一次采全高采煤法,煤层可采厚度为 5.71 ~ 16.96 m,平均可采厚度 9.2 m,本次研究选取煤层厚度分别为 6 m、8 m、10 m、12 m(不同采高均采用 1 步开挖方式)作为变量来模拟不同采高对采动裂隙场分布规律的影响。

#### 3.2 模拟结果分析

##### 1) 采动裂隙场的应力分布

煤层开采后,图 5 所示为不同采高条件下工作面开采稳定后围岩垂直应力的分布二维变化。

从图 5 可以看出,随着工作面的开挖,采空区上覆岩层在重力的作用下,产生的载荷向采空区两侧煤体转移并产生应力集中现象,形成应力集中区,应力分布范围为 9.08 ~ 20.1 MPa,应力呈轴对称分布。同时,上覆岩层发生卸压塑性破坏,岩体出现变

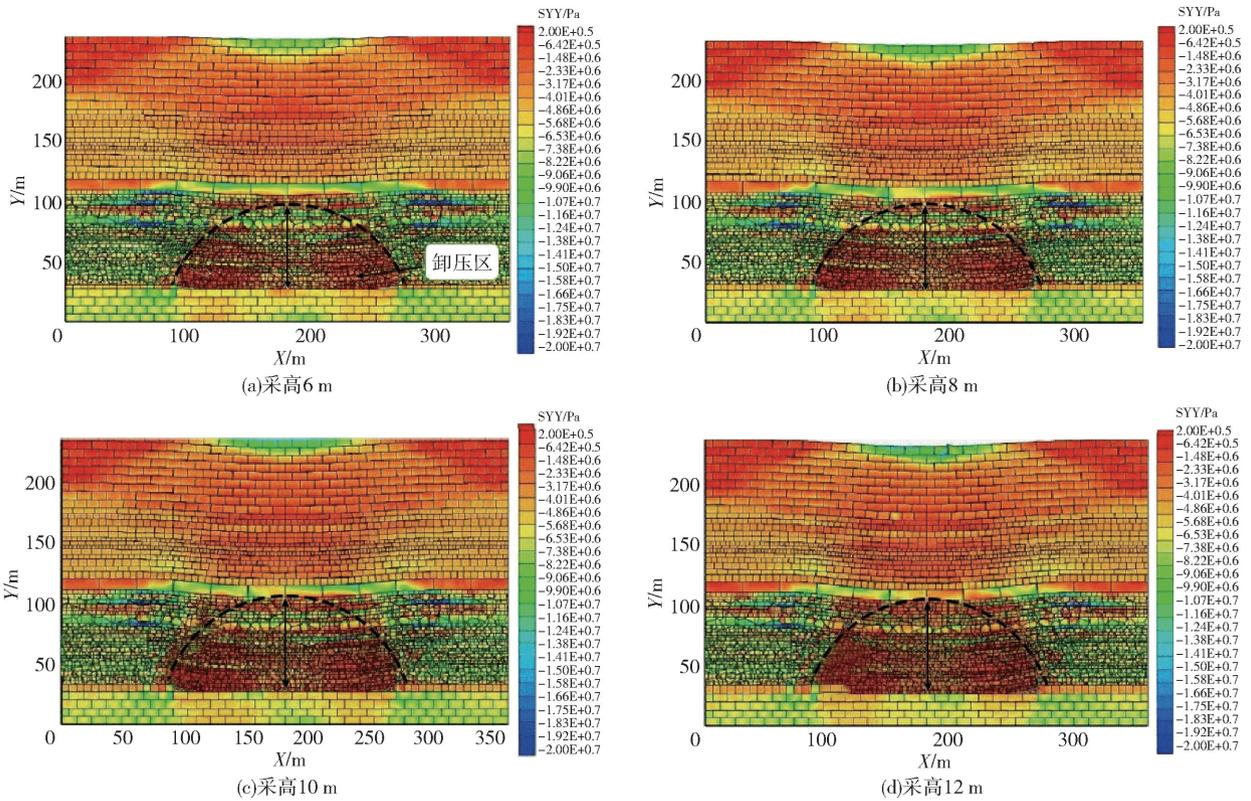


图5 采动裂隙场应力分布

形破坏,部分岩体发生垮落,垂直应力急剧减小并形成采动卸压区,应力分布范围为 $0.22 \sim 1.46$  MPa,应力呈抛物线形状分布。受主关键层影响,随着采高的增加,卸压区高度随之增大,变化范围为 $70.4 \sim 81.2$  m,但卸压高度未超过主关键层。

### 2) 采动裂隙场的位移分布特征

随着煤层的开挖,顶板覆岩在矿压的影响下由弹性状态向塑性状态变化并发生弯曲断裂,部分岩体发生垮落,不同区域岩体产生的位移也不同。不同采高条件下采动裂隙场的垂直位移分布如图6所示。

从图6可以看出,煤层开采后,采空区的顶板覆岩失去煤体的支撑作用,中间部位的岩体受到的应力效果最为集中,该部位断裂垮落后的位移变化量也最大。随着采高的增大,顶板覆岩的垮落高度增加,采空区在水平方向上的空间也随之增大,高度变化范围从 $52.4$  m增大到 $74.8$  m,但未超过主关键层位。同时,随着采高的增加,在岩石的碎胀作用下,位移最大区宽度呈减少趋势,从 $102.3$  m减至 $71.6$  m。

### 3) 采动裂隙场的裂隙分布特征

工作面开采后,顶板覆岩会产生破断裂隙和离

层裂隙,二者纵横交错形成采动裂隙网络,不同采高条件下工作面开采稳定后覆岩采动裂隙分布如图7所示。

从图7可以看出,当采高为 $6$  m时,采动裂隙网络较为稀疏,裂隙主要集中在裂隙带内瓦斯优势通道处,中部压实区有少量贯通的微观裂隙通道,采空区两侧煤岩体也存在一定量的次生裂隙,亚关键层下方以离层裂隙和破断裂隙交错发育,亚关键层至主关键层之间以离层裂隙居多,主关键层之上几乎不存在离层裂隙。随着采高的增大,采动影响范围进一步扩大,采场内裂隙数目也不断增多,采空区压实区内微观裂隙通道、采空区两侧煤岩体的次生裂隙及亚关键层上方的破断裂隙显著增多,压实区宽度减小但高度增加。当采高为 $12$  m时,主关键层出现显著的下沉变形,但主关键层的上方没有产生明显的裂隙,但主关键层的下方产生的裂隙激增,且裂隙发育程度较为丰富。

## 4 结论

(1)在工作面回采期间,首次来压步距为 $30$  m,周期来压步距在 $10 \sim 21$  m,平距周期来压步距为 $16.5$  m,冒落带高度为 $39.1$  m,裂隙带高度为 $127.9$  m。

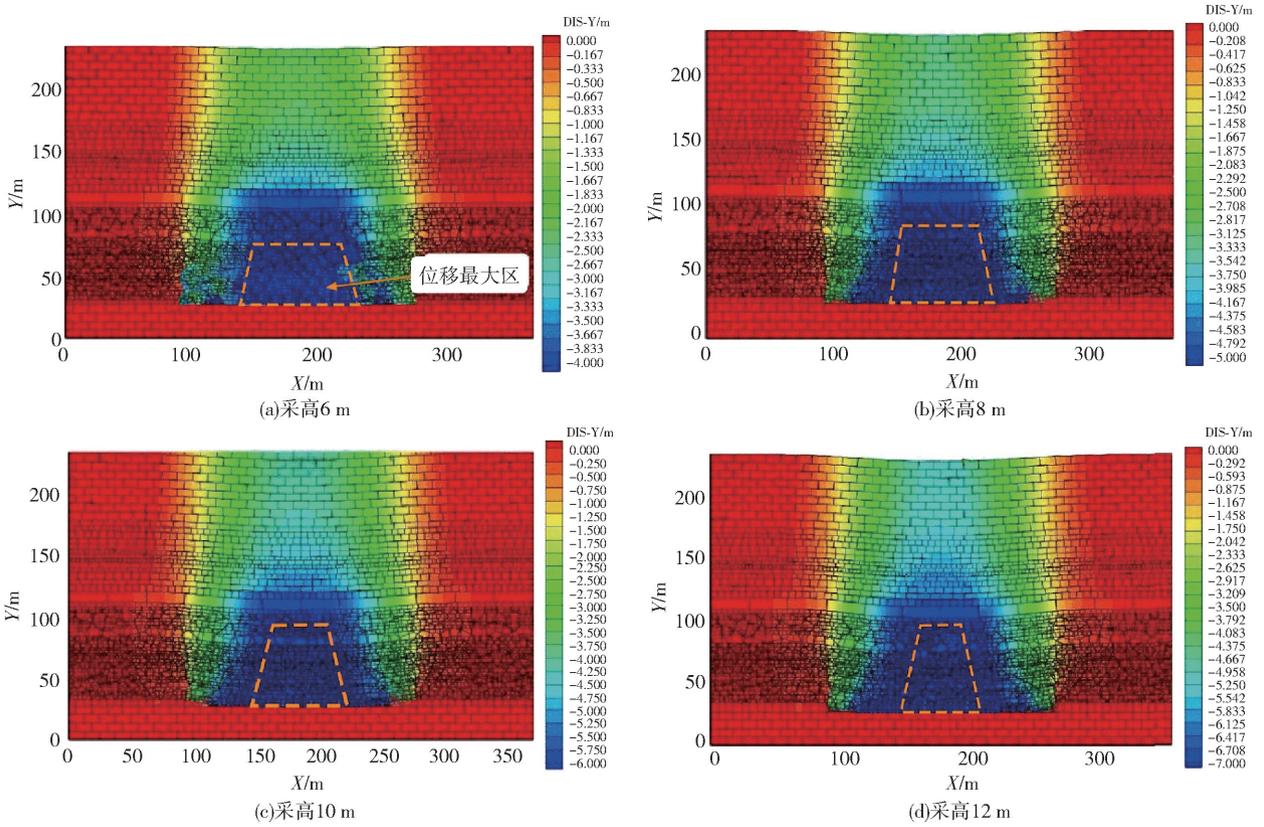


图6 采动裂隙场位移分布

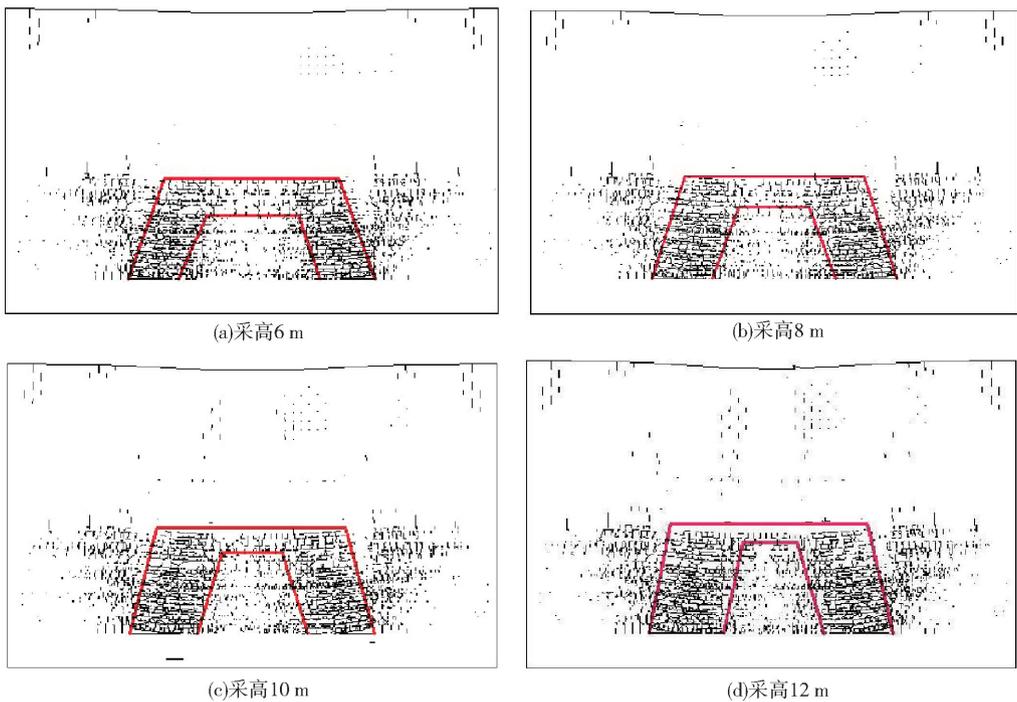


图7 采动裂隙场裂隙分布

(2)工作面开挖后,在不同的围岩区域形成卸压区和应力集中区,应力卸压区的应力呈抛物线分布,应力分布范围为0.22 ~ 1.46 MPa,应力集中区

的应力呈轴对称分布,应力分布范围为8.94 ~ 19.8 MPa;随着煤层采高的增大,卸压区的高度会随之逐渐增加,增高趋势趋缓,卸压区高度变化范围为

70.4 ~ 81.2 m。随着煤层采高的增加,位移最大区的高度也增大,变化范围为 52.4 ~ 74.8 m,位移最大区的宽度逐渐减小,其变化范围为 102.3 ~ 71.6 m。

(3)随着采高的增加,主关键层出现显著的下沉变形,上方无明显裂隙,下方裂隙激增,采空区两侧煤岩体的次生裂隙及亚关键层上方的破断裂隙显著增多,采空区压实区宽度减小、高度增加,内部微观裂隙通道增多。

### [参考文献]

- [1] 李树刚,乌日宁,赵鹏翔,等.综采工作面上隅角瓦斯流动活跃区形成机理研究[J].煤炭科学技术,2019,47(1):207-213.
- [2] 刘秀保,逢锦伦,范彦阳,等.顶板走向高位长钻孔分源抽采采空区瓦斯技术研究与应[J].矿业安全与环保,2019,46(5):70-74.
- [3] 王耀锋.中国煤矿瓦斯抽采技术装备现状与展望[J].煤矿安全,2020,51(10):67-77.
- [4] 冯培云,张嘉勇,武建国,等.基于主应力判定的高位钻孔抽采瓦斯参数优化研究[J].工业安全与环保,2022,48(9):13-17.
- [5] 曹文超,龚选平,孙峰,等.综放工作面高位定向钻孔布置优化分析[J].矿业安全与环保,2020,47(3):82-86.
- [6] 钱鸣高,许家林.覆岩采动裂隙分布的“O”形圈特征研究[J].煤炭学报,1998(5):20-23.
- [7] 袁亮,顾金才,薛俊华,等.深部围岩分区破裂化模型试验研究[J].煤炭学报,2014,39(6):987-993.
- [8] 伍永平,王同,高喜才,等.岩溶陷落柱围岩支承压力-渗流演化特征数值模拟[J].西安科技大学学报,2021,41(2):187-195.
- [9] 李树刚,刘李东,赵鹏翔,等.综采工作面覆岩压实区裂隙动态演化规律影响因素分析[J].煤炭科学技术,2022,50(1):95-104.
- [10] 杨科,刘帅.深部远距离下保护层开采多关键层运移-裂隙演化-瓦斯涌出动态规律研究[J].采矿与安全工程学报,2020,37(5):991-1000.
- [11] 刘洪涛,罗紫龙,韩子俊,等.厚煤层大采高综放工作面覆岩断裂演化规律研究[J/OL].煤炭科学技术:1-12[2023-03-18].
- [12] 何清波,张文进,王绪友,等.倾斜厚煤层采动覆岩裂隙演化规律数值模拟[J].西安科技大学学报,2022,42(6):1080-1087.
- [13] 肖鹏,韩凯,双海清,等.基于微震监测的覆岩裂隙演化规律相似模拟试验研究[J].煤炭科学技术,2022,50(9):48-56.
- [14] 徐超,王凯,郭琳,等.采动覆岩裂隙与渗流分形演化规律及工程应用[J].岩石力学与工程学报,2022,41(12):2389-2403.
- [15] 吴群英,郭重威,翟鸿良,等.重复采动覆岩裂隙率空间分布相似模拟研究——以陕北矿区为例[J].煤炭科学技术,2022,50(1):105-111.
- [16] 李江华,王东昊,黎灵,等.不同覆岩类型高强度采动裂隙发育特征对比研究[J].煤炭科学技术,2021,49(10):9-15.
- [17] 刘文静,杨琛,贺斌雷,等.复合采空区卸压瓦斯抽采技术研究[J].太原科技大学学报,2022,43(4):300-306.
- [18] 陶云奇,张剑钊,郭明功,等.采动卸压瓦斯抽采以孔代巷技术研究与工程实践[J].矿业安全与环保,2022,49(5):43-48.