



推荐阅读:

[综采工作面上隅角瓦斯流动活跃区形成机理研究](#)

[高瓦斯突出煤层综采工作面注水降尘技术应用研究](#)

[超大直径钻孔采空区瓦斯抽采技术研究](#)

[风速对近距离煤层采空区漏风及煤自燃影响研究](#)

[深部高瓦斯矿井大采高工作面立体抽采瓦斯技术](#)

[水力冲孔压裂卸压增透抽采瓦斯技术研究](#)

[巷道火灾时期流场及瓦斯浓度变化规律数值模拟研究](#)

[高突低渗透煤层超高压水力割缝卸压增透研究](#)

[高瓦斯综采工作面定向高位钻孔瓦斯抽采技术研究](#)

[寺河井田煤层气产能分布特征及影响因素分析](#)

[我国煤矿覆岩采动裂隙带卸压瓦斯抽采技术研究进展](#)

[基于高位定向长钻孔的上隅角瓦斯治理研究](#)

[松软突出煤层瓦斯抽采钻孔施工技术及发展趋势](#)

[综采工作面煤层注水防尘优化及效果研究](#)

[我国煤层气钻井技术及装备现状与展望](#)

[高瓦斯矿井高抽巷合理布置及终巷位置确定研究](#)

[原生结构煤与构造煤孔隙结构与瓦斯扩散特性研究](#)

[不同孔间距抽采孔对深孔预裂爆破增透效果影响研究](#)

[顺层瓦斯抽采钻孔封隔一体化封孔工艺研究](#)

[煤层瓦斯赋存特征及其关键地质因素影响研究](#)



移动扫码阅读

白建平,郝春生,杨昌永,等.新景矿综采面覆岩采动裂隙三维分布规律研究[J].煤炭科学技术,2020,48(11):106-112. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.11.013

BAI Jianping,HAO Chunsheng,YANG Changyong,et al.Study on the 3D distribution law of overlying rock cracks in fully mechanized mining face of Xinjing coal mine[J].Coal Science and Technology,2020,48(11):106-112. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.11.013

新景矿综采面覆岩采动裂隙三维分布规律研究

白建平^{1,2},郝春生^{1,3},杨昌永^{1,3},姚晋宝^{1,3},周建斌⁴,李生奇²,石晓红⁴

(1.易安蓝焰煤与煤层气共采技术有限责任公司,山西 太原 030000;2.山西蓝焰煤层气集团有限责任公司,山西 晋城 048006;
3.煤与煤层气共采国家重点实验室,山西 晋城 048000;4.阳泉煤业(集团)有限责任公司,山西 阳泉 045008)

摘 要:掌握高瓦斯煤层覆岩裂隙的分布规律,对于合理布置高抽巷或定向钻孔位置,提高瓦斯抽采效果有重要意义。以阳煤集团新景矿 3213 工作面为工程背景,运用相似模拟和 CDEM 三维离散元模拟等方法研究了工作面回采后覆岩运动和裂隙发育规律,得到了工作面基本顶初次破断和周期破断距离,覆岩裂隙发育高度及演化形态。结果表明:3213 工作面基本顶初次来压步距为 30 m,周期来压步距为 10~15 m;跨落覆岩呈底宽顶窄的“梯形”结构,工作面端的跨落角随周期来压发生变化,大小在 55°~65°之间;根据相似模拟的裂隙观测和数值模拟三维位移分布情况,确定垮落带高度为 8.6 m,是采高的 3.4 倍;裂隙带高度为 25.7 m,是采高的 10.3 倍。工作面上方覆岩裂隙发育具有很强的周期性,随基本顶破断呈阶梯状上升,且发育到一定高度后贯穿裂缝不再向上延伸,其上部裂隙均为离层裂隙,最终形成的裂隙带呈三维环状分布,环形截面为斜梯形,底面外环距采空区边界 9 m,底面宽 20 m,顶面宽 25 m,高度为煤层顶板上方 10~20 m。确定裂隙发育环三维位置和范围对工作面及采空区瓦斯治理有重要的意义,高抽巷或抽采钻孔应尽量布置在裂隙环顶部位置,既能够使巷道或钻孔保持完整,又能够达到最佳抽采效果。

关键词:覆岩运动;采动裂隙;三维分布;裂隙发育环;离散元

中图分类号:TD713 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2020)11-0106-07

Study on the 3D distribution law of overlying rock cracks in fully mechanized mining face of Xinjing coal mine

BAI Jianping^{1,2},HAO Chunsheng^{1,3},YANG Changyong^{1,3},YAO Jinbao^{1,3},ZHOU Jianbin⁴,LI Shengqi²,SHI Xiaohong⁴

(1.Yi'an Lanyan Coal and Coalbed Methane Co-mining Technology Co.,Ltd., Taiyuan 030000,China;2.Shanxi Lanyan CBM Group Co.,Ltd.,Jincheng 048006,China;3.State Key Laboratory of Coal and CBM Co-mining,Jincheng 048000,China;
4.Yangquan Coal Industry(Group) Co.,Ltd., Yangquan 045008,China)

Abstract: Understanding the distribution law of overburden cracks in high-gas coal seams is of great significance for rationally arranging high-drainage roadways or directional drilling positions and improving gas drainage effects. Taking the No.3213 working face of Xinjing Mine of Yangmei Group as the engineering background, using similar simulation and CDEM three-dimensional discrete element simulation and other methods to study the overburden movement and crack development law after the recovering of the working face, the basic top breaking and periodic breaking of the working face as well as the distance, the development height and evolution of overlying rock fractures were obtained. The results show that the first weighting interval of No.3213 working face was 30 m and periodic weighting interval was 10~15 m;the straddle overburden was a "trapezoid" structure with a wide bottom and a narrow top; periodic pressure changes, ranging from 55° to 65°; according to similar simulated fracture observations and numerical simulation of the three-dimensional displacement distribution, it is determined that the height of the collapse zone was 8.6 m, which was 3.4 times of the mining height, and the fracture zone height was 25.7 m which was 10.3 times of the mining height. The fracture development above the working face has a strong periodicity,

收稿日期:2020-06-10;责任编辑:李金松

基金项目:山西省科技重大专项资助项目(Q2015-02)

作者简介:白建平(1971—),女,山西晋城人,高级工程师。Tel:0356-3653836,E-mail:10932901@qq.com

and the fracture does not extend upward with the basic top fracture rising in a step shape, and the fracture is no longer extending upward after it reaches a certain height, and the upper cracks were all separated cracks, and the final crack zone was formed. It was distributed in a three-dimensional ring shape with an oblique trapezoid in cross section., the outer ring of the bottom face was 9 m away from the boundary of the gob, the bottom surface was 20 m wide, the top surface was 25 m wide, and the height was 10~20 m above the roof of the coal seam. Determining the three-dimensional position and range of the fracture development ring is of great significance to gas control in the working face and the gob. High drainage or drainage boreholes should be arranged at the top of the fracture ring as much as possible to keep the roadway or borehole intact and able to achieve the best drainage effect.

Key words: overburden stratum movement; mining fractures distribution; three-dimensional distribution; fracture development ring; discrete element method

0 引言

煤矿回采工作面推进过程中,采空区上覆岩层自然变形、移动、垮落,自下而上形成垮落带、断裂带和弯曲下沉带,简称“三带”^[1]。确定采空区上覆岩层“三带”形态、高度、范围等参数,对于卸压瓦斯抽采、顶板水灾防治、地表移动防控等工程有着十分重要的意义^[2-4]。

钱鸣高,许家林^[5]通过现场监测和试验揭示了长壁工作面覆岩采动裂隙的两阶段发展规律与“O”形圈分布特征,说明了覆岩离层和裂隙的发展时空分布特征。林海飞等^[6]基于采动裂隙“O”形圈理论,利用物理相似材料模拟试验,提出了“采动裂隙圆角矩形梯台带”工程简化模型,分析了覆岩采动裂隙的动态演化过程。李树刚等^[7]基于岩层控制关键层理论,建立了考虑采高及第 1 亚关键层与煤层顶板间距的采动裂隙椭圆带动态演化数学模型。文献[8-11]研究了相邻煤层采动后覆岩裂隙发育连通及矿压影响规律,利用相似模拟及现场试验的方法确定了下层煤覆岩层垮落带高度及与上层煤采空区的连通关系。文献[12-13]利用微震信号分析矿压活动与顶板断裂规律,确定了强矿震信号与上覆坚硬顶板的断裂活动关系,得到了由矿震事件空间分布反映的顶板断裂形态。刘晓刚等^[14]利用数值计算方法和钻孔双端堵水法确定了工作面覆岩破裂高度,提高了综放开采断裂带瓦斯抽采效率。文献[15-16]利用现场观测等方法,研究了采动后地表移动规律及地表裂隙分布,确定了地表构筑物的保护方法。冯锦艳等^[17]利用 UDEC 软件和相似材料模拟方法,分析了大倾角煤层开采过程覆岩裂隙的演化规律,得到了大倾角煤层采动裂隙分形维数和采深的关系,实现了定量化的裂隙表征。

由于覆岩采动裂隙受开采技术条件、煤层及覆岩结构、地质构造等众多因素影响,难以使用统一性的模型对裂隙分布规律进行描述;另外,以往的研究

更多关注裂隙带的发育高度,但实际上采场上覆裂隙带是类似三维环分布在煤层上方,依据不同矿井及工作面的实际条件,确定覆岩裂隙带的三维分布范围,对于煤矿企业具体工程的开展更有应用价值。因此,笔者以阳泉新景矿 3213 工作面为工程背景,采用三维 CDEM 数值计算、相似模拟与理论分析相结合的方法,确定采场覆岩的移动变形特征与采动裂隙的三维分布及演化规律。

1 工程概况

新景矿采用主斜-副立综合开拓方式,2 个水平开采,主采煤层有 3、8、9、15 号煤层,原煤产量约 600 万 t。回采工作面瓦斯最大绝对涌出量为 59.22 m³/min,掘进工作面最大绝对涌出量为 4.79 m³/min,CO₂ 绝对涌出量为 18.65 m³/min,相对涌出量为 1.61 m³/t,为煤与瓦斯突出矿井。

3213 工作面属于新景煤矿 525 水平,开采 3 号煤层,煤层赋存稳定,结构简单,平均煤厚 2.5 m,工作面长度 210 m,推进长度 1 620 m,煤层倾角 1°~3°,上覆基岩厚度为 460~520 m,使用综合机械化采煤工艺。工作面煤岩层柱状图及力学参数见表 1。

2 采场覆岩运移及裂隙演化相似模拟

2.1 相似模拟模型

以 3213 工作面走向中剖面为模拟对象,使用平面应变相似模拟试验台,搭建 2.5 m(长)×0.2 m(宽)×1.3 m(高)的物理相似模型。模拟试验的主要参数见表 2。

2.2 模型开挖及数据测量

为了研究煤层开采后的覆岩运移情况,分析垮落带和裂隙带随工作面开采的演化规律,在煤层上方沿竖直方向每隔 10 cm 布置 1 条水平位移监测线,共布置 6 条水平位移监测线,每条水平位移监测线由相互间隔 10 cm 的 24 个监测点组成。

表 1 3213 工作面煤岩层柱状图及力学参数

Table 1 Histogram and mechanical parameters of strata in No.3213 Longwall panel

序号	岩性	厚度/m	岩石强度/MPa		密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	模型强度/KPa		模型密度/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	配比号
			抗压	抗拉		抗压	抗拉		
1	砂质泥岩	24.0	6.7	1.0	2 340	67.0	10.0	1.56	773
2	中粒砂岩	6.0	20.2	3.2	2 650	202.0	32.0	1.77	355
3	砂质泥岩	9.5	6.7	1.0	2 340	67.0	10.0	1.56	773
4	中粒砂岩	1.8	20.2	3.2	2 650	202.0	32.0	1.77	355
5	砂质泥岩	6.8	11.5	1.1	2 340	115.0	11.0	1.56	373
6	中粒砂岩	6.0	66.8	4.1	2 810	668.0	41.0	1.87	955
7	砂质泥岩	3.3	11.5	1.1	2 480	115.0	11.0	1.65	373
8	3 号煤层	2.5	4.8	0.38	1 350	48.0	3.8	0.9	773
9	砂质泥岩	3.2	11.5	1.1	2 480	115.0	11.0	1.65	373
10	中粒砂岩	2.9	66.8	4.1	2 810	668.0	41.0	1.87	955
11	砂质泥岩	6.0	11.5	1.1	2 480	115.0	11.0	1.65	373

表 2 相似模拟试验的主要参数

Table 2 Main paramenters of the similar simulation experiment

模型尺寸/ mm	参数相似比					
	几何	时间	容重	泊松比	应力	强度
2 500×200×1 300	1 : 60	1 : 10	1 : 1.5	1 : 1.5	1 : 100	1 : 150

在模型两边留设 50 cm 的边界煤柱,以避免或减小边界效应。在煤层开挖 8 cm 处(对应现场 4.8 m)作为工作面的开切眼,然后按每 2 h 向前推进 8 cm 作为一个开挖步骤,记录开挖过程中的位移和岩层裂隙发育情况。相似模型实物及测点布置如图 1 所示。

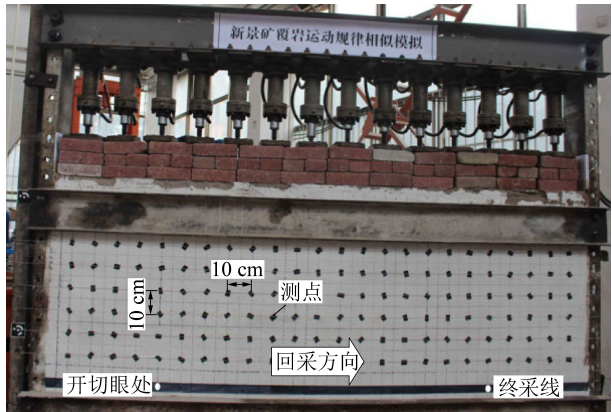


图 1 相似模型及测点布置

Fig.1 Similar simulation model and monitoring points

2.3 相似模拟试验结果分析

2.3.1 煤层开挖后覆岩运移情况

煤层开挖整个过程中上覆岩层的破坏和运动情况如图 2 所示。工作面推进到 15 m 时,直接顶断裂垮落,但上部基本顶无明显裂隙产生;工作面推进到

25 m 之后,基本顶离层,裂隙开始发育;当工作面推进到 30 m 时,基本顶岩层达到强度极限,出现大范围岩层冒落,工作面初次来压。工作面由 30 m 推进到 40 m 的过程中,直接顶岩层随采随垮,悬空基本顶垮落,表明第 1 次周期来压显现,离层裂隙发育至距离煤层顶部 16.2 m 处;工作面推进到 50 m 时,发生第 2 次周期来压,垮落岩层形成铰接结构。之后,工作面每推进 10~15 m,工作面会发生 1 次周期来压,随着来压的产生,上覆岩层的断裂高度逐渐变大。直到工作面推进到 90 m 时,基本顶第 7 次来压显现,裂隙闭合,采空区被逐渐压实,破断裂隙发育

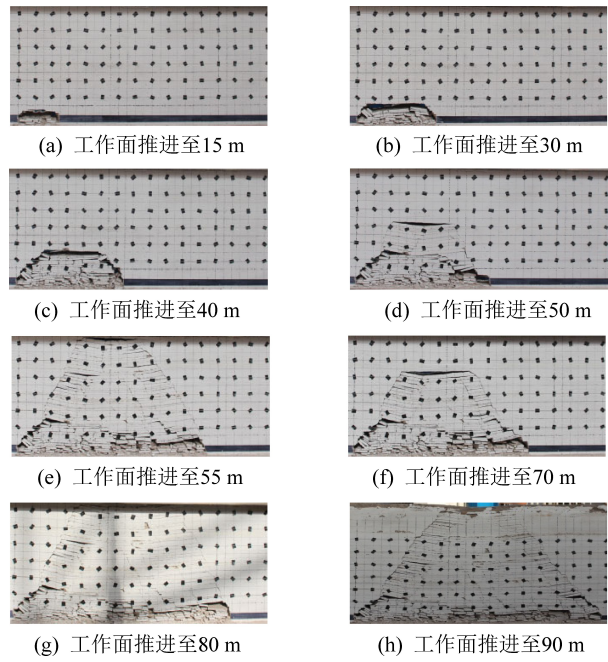


图 2 煤层开挖及覆岩垮落过程

Fig.2 Process of mining in coal seam and movement of overburden strata

至煤层顶部 54 m 处,如图 2h 所示。

顶板岩层在水平方向上的垮落形态呈底宽顶窄的“梯形”分布结构,如图 3 所示。“梯形”在工作面初次来压时开始形成,“梯形”的高度和两底角的大小,会随工作面周期来压而发生变化,边线垮落角为 55°~65°。

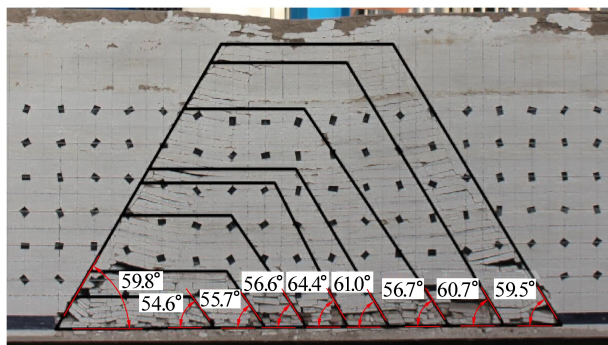


图 3 不同时刻覆岩垮落形态

Fig.3 Process of overburden movement in different mining length

2.3.2 覆岩裂隙演化规律

对不同推进距离时的岩层断裂高度和纵向宏观裂隙发育高度进行统计,如图 4 所示。由于不同岩层间的强度差异,会产生不同发育高度的纵向裂隙,产生纵向裂隙的岩层往往会在下次来压时发生垮落。岩层垮落高度与周期来压相关,在不发生周期来压时,垮落高度无明显增加,伴随基本顶周期破断的发生,垮落高度成阶梯状上升。

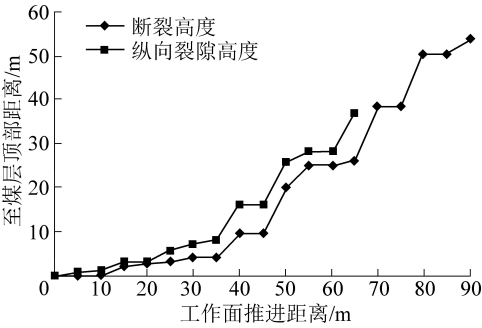


图 4 覆岩断裂与裂隙发育高度规律

Fig.4 The height of fracture zone of the overburden strata in mining process

为了定量描述在工作面推进过程中采动破断裂隙的发育程度,在水平方向上每 5 m 为 1 个计数单元统计该单元范围内裂隙的数量,以工作面推进到 45 m 和 90 m 时的裂隙密度(条/m)来表示裂隙网络的变化规律,工作面推进过程中裂隙密度的分布曲线如图 5 所示。由图 5 可以看出,在工作面推进 45 m 之前,垮落覆岩受上部载荷较小,采空区裂隙密度呈拱形分布;在工作面推进到 90 m 时,工作面

中部裂隙减少,这说明采空区中部破断岩层在上部载荷的作用下已经压实。在工作面回采完成后,裂隙分布主要集中在开切眼和终采线侧上方,且开切眼上部裂隙范围更多更宽。

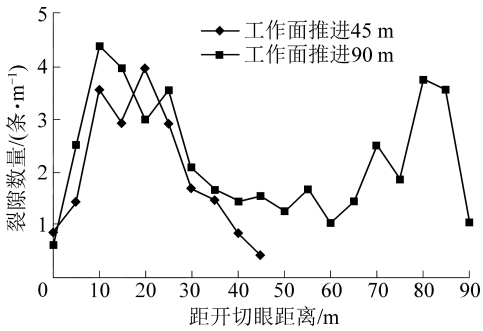
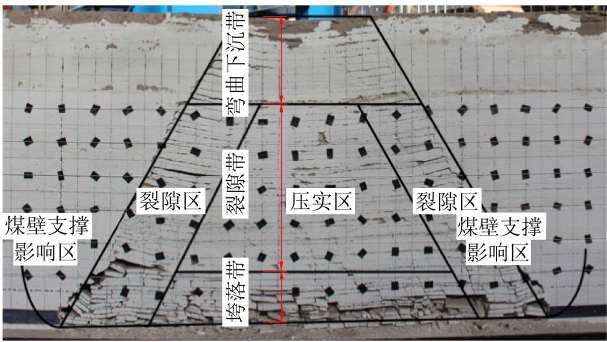


图 5 覆岩裂隙密度分布曲线

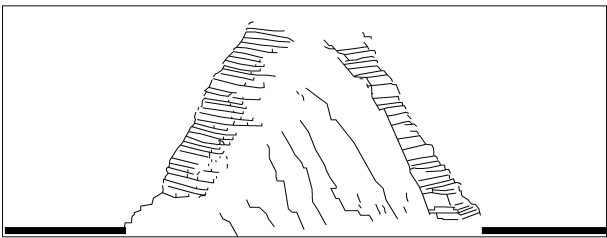
Fig.5 Fracture density distribution in overburden strata

2.3.3 覆岩裂隙区划分

通过实际测量和上文的分析将工作面裂隙分为横三区 and 竖三带,横三区为煤壁支撑影响区、裂隙区、重新压实区,竖三带为垮落带,裂隙带,弯曲下沉带,如图 6 所示。在水平方向上,开切眼处的裂隙区宽度为 17.93 m;终采线处的裂隙区宽度为 15.37 m;模型垮落区中部为重新压实区,可以观察到,垮落产生的大裂隙受压闭合。在垂直方向上,垮落带最大高度为 8.6 m,裂隙带高度为 25.7 m,裂隙带上部岩层为弯曲下沉带,该区域岩层主要表现为弯曲变形,两侧也有少量裂隙发育。



(a) 相似模拟



(b) 裂隙示意

图 6 覆岩裂隙区域分布

Fig.6 Regional distribution of overburden fractures

3 数值模拟及三维采动裂隙分布

3.1 数值模型

根据新景矿 3213 工作面煤岩层地质条件,运用 CDEM 软件进行煤层开采覆岩三维数值模拟。数值模型在 X 、 Y 、 Z 方向尺寸分别为 $600\text{ m} \times 255\text{ m} \times 400\text{ m}$, 共分为 23 层, 各岩层物理参数见表 1。模型最上部岩层的埋深为 240 m , 上覆岩层的平均容重 24 kN/m^3 , 因此在模型顶部施加 5.8 MPa 等效载荷。模型采用莫尔-库伦屈服准则, 煤层开挖范围为 $X=150\sim 450\text{ m}$, $Y=32.5\sim 35\text{ m}$, $Z=100\sim 300\text{ m}$, 在 X 轴方向两端预留边界均为 150 m , 在 Z 轴方向预留边界均为 100 m 。模型四周及底面位移固定, 如图 7 所示。

3.2 数值模拟结果分析

煤层开挖后的三维位移分布云图及煤层顶板上方不同高度岩层的位移如图 8 所示。可以看出, 三

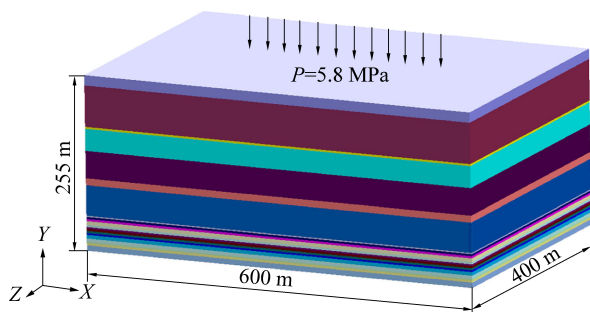


图 7 数值模型

Fig.7 Numerical model

维 CDEM 软件可以较好的模拟煤层开挖后破坏、垮落、重新压实的过程, 清楚的区分走向和倾向裂隙带, 重新压实区和弯曲下沉带。不同高度覆岩的位移分布, 也反映了覆岩的不连续活动状态, 如煤层上方 10 m 与 20 m 处的覆岩位移明显不同步, 而 20 m 与 40 m 处覆岩位移基本同步, 表明 $10\sim 20\text{ m}$ 范围内有坚硬岩层, 这与覆岩结构和相似模拟结果也基本一致。

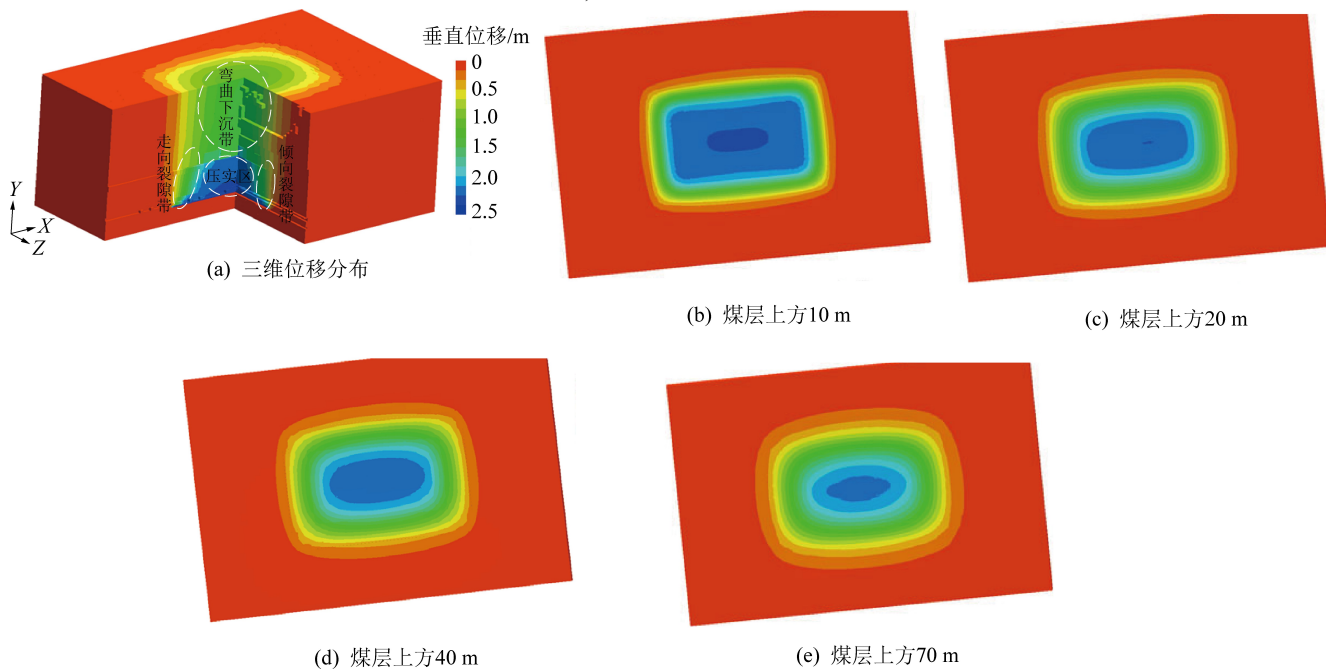


图 8 煤层开挖后模型位移分布

Fig.8 Displacement distribution of the model after mining of the coal seam

为了定量描述采动裂隙的发育程度, 对不同高度的覆岩离层率进行分析。离层率可通过上下岩层下沉量的差值与上下岩层间距的比值求得, 可以反映单位厚度岩层内离层裂隙带的发育程度^[1]。

提取不同高度覆岩层位移数据, 并计算离层率, 得到工作面上方覆岩位移等值线及离层发育带的分布, 如图 9 所示。在 $X=300\text{ m}$ 垂直面上取采空区上方 10 、 20 、 30 、 40 m 处离层率曲线, 如图 10 所示。可以看出, 裂隙发育带主要分布在 20 m 以下范围, 20 m 与 40 m 的位移曲线基本重合, 表明此范围岩层

基本同步运动, 30 、 40 m 处的 2 条曲线离层率很小。

根据图 9 和图 10 的结果, 结合三维位移数据分析, 可以绘制出采空区上方覆岩裂隙环的三维形状, 如图 11 所示。煤层开采到一定范围后, 采空区上方裂隙发育带呈三维环形分布, 采空区中部为压实区, 四周边缘附近形成有一定高度的裂隙环, 本例中裂隙环高度上限在 20 m 左右, 裂隙环截面是斜梯形, 具体尺寸及形状如图 11 所示。

裂隙发育环的位置和范围根据具体开采条件和覆岩条件会有变化, 并且裂隙环会随着工作面向前

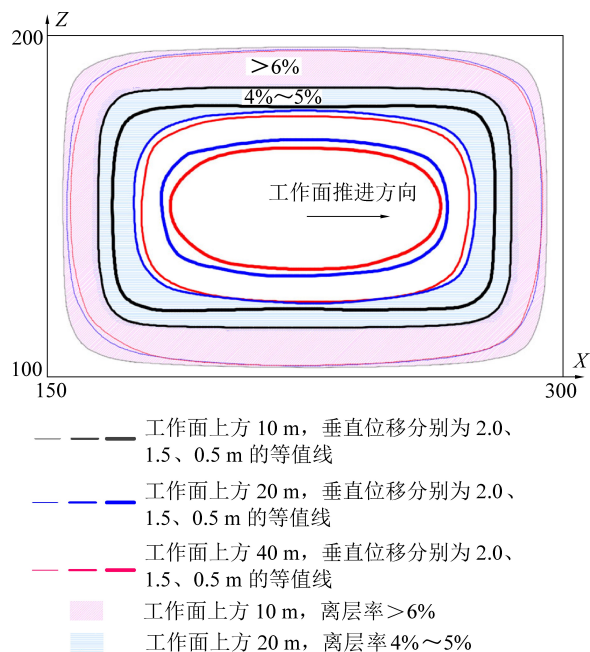


图9 采空区上方覆岩位移等值线及离层发育带分布

Fig.9 Displacement contour line at overburden stratum and the separation zone

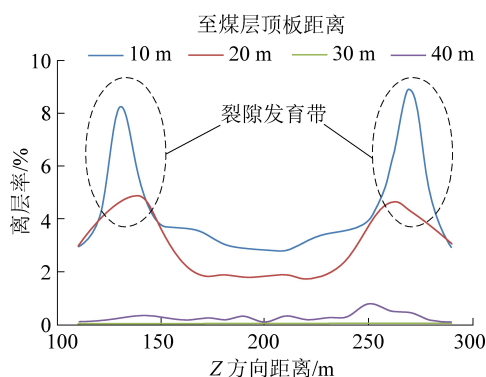
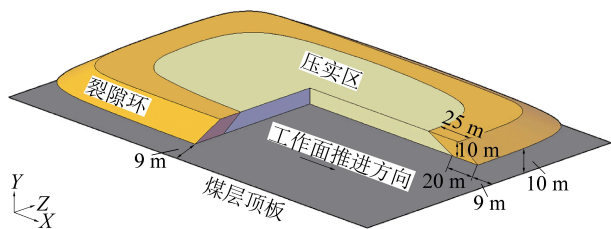
图10 $X=300$ m 垂直面上不同高度覆岩离层率曲线Fig.10 Separation rate on the lines of overburden strata on the vertical face of $X=300$ m

图11 采空区上方三维裂隙发育环状分布示意

Fig.11 Annular shape in 3D of fracture zone on the top of goaf 推进逐渐拉长。裂隙环位置的确定对于高瓦斯煤层布置高抽巷或抽采钻孔有重要的意义,高抽巷位置应该尽量布置裂隙环顶部。对于新景煤矿,高抽巷或抽采水平钻孔,应布置在回风巷内侧水平距离 20 m 左右,煤层上方 20 m 左右位置,即处于裂隙环顶部范围内,此范围裂隙发育,容易积聚瓦斯,并且离

下部垮落带有一定距离,能够避免巷道或钻孔塌落,抽采效果最佳。

4 结 论

1) 利用相似模拟,对新景矿 3213 工作面覆岩运移进行了研究,得到了顶板来压规律,基本顶初次来压步距为 30 m,周期来压步距为 10~15 m;得到了顶板破断和裂隙演化规律,根据裂隙的发育情况,确定垮落带高度为 8.6 m,为采高的 3.4 倍;裂隙带高度为 25.7 m,为采高的 10.3 倍。

2) 利用 CDEM 三维离散元软件,得到了覆岩位移场三维分布,以离层率为指标,得到了 3213 工作面裂隙发育带的三维形状和具体尺寸,即在煤层顶板上方呈三维环形分布,环形带切面为斜梯形。

3) 确定裂隙发育环三维位置和范围对工作面及采空区瓦斯治理有重要的意义,将高抽巷或抽采钻孔应尽量布置在裂隙环顶部位置,既能够使巷道或钻孔保持完整,又能够达到最好的抽采效果。

参考文献 (References):

- [1] 钱鸣高,石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2003.
- [2] 林海飞,李树刚,赵鹏翔,等. 我国煤矿覆岩采动裂隙带卸压瓦斯抽采技术研究进展[J]. 煤炭科学技术,2018,46(1):28-35.
LIN Haifei, LI Shugang, ZHAO Pengxiang, et al. Research progress on pressure released gas drainage technology of mining cracking zone in overburden strata of coal mine in China[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 28-35.
- [3] 袁亮,郭华,沈宝堂,等. 低透气性煤层群煤与瓦斯共采中的高位环形裂隙带[J]. 煤炭学报,2011,36(3):357-365.
YUAN Liang, GUO Hua, SHEN Baotang, et al. Circular overlying zone at longwall panel for efficient methane capture of multiple coal seams with low permeability[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 357-365.
- [4] 李全生,鞠金峰,曹志国,等. 基于导水裂隙带高度的地下水库适应性评价[J]. 煤炭学报,2017,42(8):2116-2124.
LI Quansheng, JU Jinfeng, CAO Zhiguo, et al. Suitability evaluation of underground reservoir technology based on the discriminant of the height of water conduction fracture zone[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(8): 2116-2124.
- [5] 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.
QIAN Minggao, XU Jialin. Study on the “O-SHAPE” circle distribution characteristics of mining-induced fractures in the overlying strata[J]. Journal of China Coal Society, 1998(5):20-23.
- [6] 林海飞,李树刚,成连华,等. 覆岩采动裂隙带动态演化模型的实验分析[J]. 采矿与安全工程学报,2011,28(2):298-303.
LIN Haifei, LI Shugang, CHENG Lianhua, et al. Experimental

- analysis of dynamic evolution model of mining-induced fissure zone in overlying strata [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2011, 28(2):298-302.
- [7] 李树刚, 林海飞, 赵鹏翔, 等. 采动裂隙椭圆抛带动态演化及煤与甲烷共采[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(8):1455-1462.
- LI Shugang, LIN Haifei, ZHAO Pengxiang, *et al.* Mining fissure elliptic paraboloid zone and dynamic evolution of coal and methane mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8):1455-1462.
- [8] 孟祥斌. 大同矿区双系特厚煤层相互影响下安全高效开采技术[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(8):114-120.
- MENG Xiangbin. Safety and high efficient mining technology of ultra thick seam with double system interaction in Datong Mining Area[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(8):114-120.
- [9] 任艳芳. 浅埋深近距离煤层矿压及覆岩运动规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(7):11-14.
- REN Yanfang. Study on mine pressure and overlying strata movement law of contiguous seams with shallow depth[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(7):11-14.
- [10] 吕兆海, 赵长红, 岳晓军, 等. 近距离煤层下行开采条件下覆岩运移规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(7):18-22, 32.
- LYU Zhaohai, ZHAO Changhong, YUE Xiaojun, *et al.* Study on law of in movement and deformation under downward mining in contiguous coal seams[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(7):18-22, 32.
- [11] 孔令海, 王永仁, 李少刚. 房柱采空区下回采工作面覆岩运动规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(5):26-29.
- KONG Linghai, WANG Yongren, LI Shaogang. Analysis on overburden strata movement law of coal mining face under goaf of room and pillar mining face[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(5):26-29.
- [12] 赵科, 张开智, 王树立. 巨厚覆岩破断运动与矿震活动规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(2):118-122.
- ZHAO Ke, ZHANG Kaizhi, WANG Shuli. Study on movement law of ultra thick overlying strata broken and coal mine earthquakes[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(2):118-122.
- [13] 汤国水, 朱志洁, 韩永亮, 等. 基于微震监测的双系煤层开采覆岩运动与矿压显现关系[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(1):212-218.
- TANG Guoshui, ZHU Zhijie, HAN Yongliang, *et al.* Relationship between overburden strata movement and strata behavior during dual system seam mining based on microseismic monitoring technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1):212-218.
- [14] 刘晓刚, 樊少武, 汪东, 等. 王坡煤矿综放工作面采动覆岩破裂高度研究[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(4):35-38, 62.
- LIU Xiaogang, FAN Shaowu, WANG Dong, *et al.* Study on fracturing height of mining overburden strata above fully mechanized top coal caving mining face in Wangpo Mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(4):35-38, 62.
- [15] 朱学军, 赵铁鹏, 郭惟嘉, 等. 厚硬覆岩地表移动斑裂产生判据研究[J]. *煤炭科学技术*, 2013, 41(6):26-28, 84.
- ZHU Xuejun, ZHAO Tiepeng, GUO Weijia, *et al.* Study on criterion of surface movement cracks occurred above thick and hard overburden strata[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(6):26-28, 84.
- [16] 孙东玲, 付军辉, 孙海涛, 等. 采动区瓦斯地面井破断防护研究及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(6):17-23.
- SUN Dongling, FU Junhui, SUN Haitao, *et al.* Study and application of gas surface well broken protection in mining area[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(6):17-23.
- [17] 冯锦艳, 刘旭杭, 于志全. 大倾角煤层采动裂隙演化规律[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(8):1971-1978.
- FENG Jinyan, LIU Xuhang, YU Zhiquan. Numerical simulation study on the mining-induced fracture evolution of steep coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(8):1971-1978.
- [18] 焦振华, 陶广美, 王浩, 等. 晋城矿区下保护层开采覆岩运移及裂隙演化规律研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2017, 34(1):85-90.
- JIAO Zhenhua, TAO Guangmei, WANG Hao, *et al.* Overburden strata movement and fissure evolution in lower protective layer in Jincheng mining district[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(1):85-90.
- [19] 李树刚, 丁洋, 安朝峰, 等. 近距离煤层重复采动覆岩裂隙形态及其演化规律实验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2016, 33(5):904-910.
- LI Shugang, DING Yang, AN Zhao Feng, *et al.* Experimental research on the shape and dynamic evolution of repeated mining-induced fractures in short-distance coal seams. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2016, 33(5):904-910.
- [20] 蒋金泉, 王普, 郑朋强, 等. 高位硬厚岩层下采动裂隙和支承应力演化特征及其对瓦斯运移的影响[J]. *采矿与安全工程学报*, 2017, 34(4):624-631.
- JIANG Jinquan, WANG Pu, ZHENG Pengqiang, *et al.* Evolution characteristics of mining-induced fracture and abutment stress under high-position hard thick stratum and its effect on gas migration[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(4):624-631.