

文章编号: 1000-7598-(2013) 增 1-0479-07

长壁孤岛工作面冲击失稳能量场演化规律

王宏伟¹, 姜耀东^{1,2}, 高仁杰¹, 刘 帅¹

(1. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 煤矿冲击地压一直是困扰中国煤矿安全的主要问题, 而煤矿开采过程中跳采形成的孤岛工作面由于容易产生应力集中, 来压强度提高, 极容易发生冲击地压。基于唐山矿 T₂193 孤岛工作面的地质条件, 从数值分析的角度研究了煤岩体材料的非均匀性, 揭示了孤岛工作面顶板周期来压时煤岩体能量释放的动态特征, 分析了工作面前方能量释放激增机制。数值模拟结果显示, 长壁工作面回采过程中直接顶的不断垮落造成了老顶悬空距离的不断增大, 工作面周期来压时, 积聚于老顶岩层内的弹性应变能将瞬间释放, 容易引发工作面及巷道的冲击失稳。孤岛工作面由于其特有的矿压显现特征, 老顶周期破断时所释放的弹性应变能将更加剧烈, 冲击地压势必愈加强烈。孤岛工作面顶底板和煤层的能量释放激增可以作为判断煤岩体冲击失稳的前兆信息。孤岛工作面前方发生冲击破坏的主要原因是由于工作面回采过程中围岩所积聚的大量弹性能在顶板断裂时所伴随的巨大能量释放而造成的。

关 键 词: 孤岛工作面; 冲击地压; 弹性应变能; 周期来压; 数值分析

中图分类号: TU 443 **文献标识码:** A

Evolution of energy field instability of island longwall panel during coal bump

WANG Hong-wei¹, JIANG Yao-dong^{1,2}, GAO Ren-jie¹, LIU Shuai¹

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Coal bumps have been a major safety concern in underground coal mines in China for more than fifty years. In general, a coal bump refers to a sudden and violent failure of a coal seam that releases contained elastic energy and expels a large amount of coal and rock into the roadway or working face where men and machinery are present. It can cause fatality, injury and significant economic loss for the coal mining industry. Coal bumps occur more frequently in an island longwall panel, which is surrounded by previously mined panels, than in other longwall panels because of its high-stress concentration. In order to investigate the suddenly release of strain energy during extraction of mining face, the nonhomogeneity of materials will be considered to understand the mechanism of energy explosion during periodic weighting of the island longwall panel. Numerical simulations were conducted to study the dynamical character of elastic strain energy relief based on the geological conditions of T₂193_B island longwall panel in the Tangshan coal mine. Numerical results suggest that the constant collapse of immediate roof will cause continuously increasing of the main roof suspension. Meanwhile, the accumulated elastic strain energy in main roof will abruptly release when the periodic weighting occurs. At this moment, the coal bumps will occur more frequently in the mining face and roadways. It can be revealed that elastic strain energy explosion of main roof and coal seam during periodic weighting is considered to be an important precursor of coal bump occurrence during the extraction of an island longwall panel. Therefore, the significant reason of occurrence of coal bump is the suddenly elastic strain energy explosion during the periodic weighting of man roof. This study of coal bumps in the island longwall panel is of significant importance for coal mine safety and productivity.

Key words: island longwall panel; coal bump; elastic strain energy; periodic weighting; numerical simulation

1 引 言

煤矿冲击地压是指采煤工作面和巷道周围煤岩

体突然、急剧、猛烈突出而造成井巷的严重破坏和人员的重大伤亡, 甚至引起地表塌陷和引发局部地震, 威胁人员和设备的安全^[1-2]。近 50 多年来, 煤

收稿日期: 2013-05-07

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(No.2010CB226801); 中国博士后科学基金特别资助(No.2012T50161); 中国博士后科学基金资助(No.2011M500448); 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金项目资助 (No.SKLCRSM11KFB07); 国家自然科学基金项目(No.51174213)。

第一作者简介: 王宏伟, 男, 1981 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩石力学与采矿工程的研究工作。E-mail: whw@cumt.edu.cn

矿冲击地压一直是困扰中国煤矿安全的主要问题。

煤矿开采中,为了避免连续工作面之间的干扰和保证安全开采的需要,采区内工作面之间有时需要采用跳采接续方式。由于煤层开采的地质条件限制,如断层等构造的存在,切割了煤层的连续性,全国各大矿区都普遍存在着多种形式的孤岛工作面^[1]。孤岛工作面安全高效生产将会遇到下列突出问题:①孤岛工作面由于容易产生应力集中,来压强度提高,采用常规的措施将不能对工作面围岩实施有效控制,极容易发生冲击地压,影响工作面的快速推进;②围岩破坏严重,巷道支护困难,覆岩离层和断裂现象十分明显,采用已有的巷道布置和支护技术体系,难以有效地控制孤岛开采顺槽巷道围岩变形量,影响工作面正常回采。因此,长壁孤岛工作面冲击地压机制研究对于煤矿安全和生产意义重大。

众所周知,由于直接顶的不断垮落,工作面前方支承压力在随着工作面回采不断增大^[2-3],直到老顶出现周期来压时,支承压力达到最大。此时,老顶出现周期断裂,回采过程中积聚的弹性应变能瞬间释放,容易引发工作面及顺槽巷道的冲击失稳。而孤岛工作面由于其特有的矿压显现特征,老顶周期破断时所释放的弹性应变能将更加剧烈,冲击地压的发生势必愈加强烈,所以孤岛工作面冲击地压的预测预报是否准确直接影响到孤岛工作面的安全回采。

本文基于唐山矿孤岛工作面的地质条件,从数值分析的角度来研究煤岩体材料非均匀性情况下,揭示孤岛工作面顶板周期来压时煤岩体能量释放的动态特征,研究工作面前方能量场的演化规律,分析煤岩体能量释放激增机制。

2 孤岛工作面工程概况

唐山矿位于河北省唐山市,井田范围由市中心经西南郊延至丰南市。优越的地理位置使得唐山矿水、陆交通便利。唐山矿全井田共有 8 个可采煤层,其中 5[#]、8[#]、9[#]煤层全井田范围可采。由于成煤期井田范围内的沉积环境的差异,致使 8、9 煤层出现分叉和合并现象,合并区为一特厚煤层,该煤层的厚度一般大于 10 m。本文的研究重点区域是赋存于 8[#]、9[#]煤层及合区煤层的 T₂193_下孤岛工作面。该工作面北部为 T₂194 采空区,南部为 T₂193 上采空区,西邻 T₂293、T₂294 采空区,东至新风井工业广场保护煤柱,如图 1 所示。T₂193_下孤岛工作面顶板岩性变化很大,一般为灰色砂质泥岩,厚度为

23.0 m;直接底为深灰或黑灰色泥岩,厚 1.0~4.5 m,井田地质柱状图如图 2 所示。T₂193_下工作面采深为-670~-696 m。走向长度为 860 m,倾斜长度为 124 m,采用走向长壁综采放顶煤方法开采^[2]。

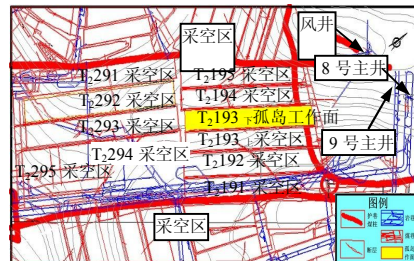


图 1 唐山矿 T₂193_下工作面与周边工作面示意图

Fig.1 Layout of T₂193_B island mining panel

层号	埋深/m	层厚/m	柱状	层岩名称
1	662.1	2.1		5 [#] 煤层
2	663.3	1.2		深灰色砂质泥岩
3	671.3	8.0		灰色细砂岩
4	671.9	0.6		6 [#] 煤层
5	673.7	1.8		灰色泥岩
6	678.4	4.7		深灰色细砂岩
7	678.6	0.2		7 [#] 煤层
8	681.7	3.1		深灰色砂质泥岩
9	684.6	2.9		深灰色砂质泥岩
10	695.6	11.0		8 [#] 、9 [#] 煤层
11	700.1	4.5		深灰色泥岩
12	702.1	2.0		深灰砂质泥岩

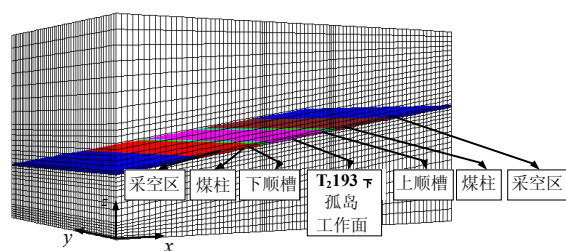
图 2 唐山矿岩层柱状图

Fig.2 Columnar section of rock strata of Tangshan coal mine

3 孤岛工作面数值模型

3.1 数值模型的建立

基于唐山矿 T₂193_下孤岛工作面的地质条件,建立了合理的有限差分 FLAC^{3D} 模型。数值模型长为 700 m,宽为 500 m,高度为 300 m,如图 3 所示。模型中,煤层厚度为 3 m,煤层的单元尺寸恒定为 1.0 m×1.0 m×1.0 m,顶板和底板单元尺寸为 2.0 m×2.0 m×2.0 m。孤岛工作面煤柱的宽度是 15 m,两顺槽巷道宽 4 m、高 3 m。模型中 4 个垂直面的水平位移限制为法向方向,且在模型的底部垂直位移为 0。在模型的顶部,施加竖向荷载($p = \gamma H$)用于模拟上覆岩层自重。基于唐山煤矿中的大量地应力监测数据,沿 x 方向和 y 方向(水平方向)的侧向压力系数都取为 0.8。采空区处理方法为充满软弹性材料,大致模拟顶板垮落岩石的支承能力。此材料的杨氏模量设定为 190 MPa,泊松比设定为 0.25^[2]。

图 3 T₂193_B 孤岛工作面数值模型Fig. 3 FLAC^{3D} mesh for the T₂193_B island longwall panel

计算中采用 Mohr-Coulomb 屈服准则判断煤岩体材料的屈服, 采用应变软化模型以反映煤体破坏后随变形发展残余强度逐步降低的性质^[2-4]。根据现场地质调查和相关研究提供的岩石力学试验结果, 考虑到岩石的尺度效应, 模拟计算采用的岩体力学参数见表 1。

表 1 地层岩体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of strata

岩石名称	密度 (/kg/m ³)	弹性模 量/GPa	泊松比	内聚力 /MPa	摩擦角 φ /(°)	抗拉强度 /MPa
老顶	2 873	18.0	0.235	2.6	36	1.40
直接顶	2 680	16.0	0.147	1.6	37	0.35
煤层	1 380	5.9	0.320	1.2	28	0.20
直接底	2 461	10.0	0.260	1.8	32	0.25

3.2 数值模拟方案的确定

为了确定 T₂193_B 孤岛工作面回采过程中的周期来压步距以及矿压分布规律, 进而为数值分析中周期来压的模拟方案提供参考数据, 在 T₂193_B 工作面倾向布置了支架载荷自记仪, 用来观测支架在回采过程中的承载情况, 如图 4 所示。

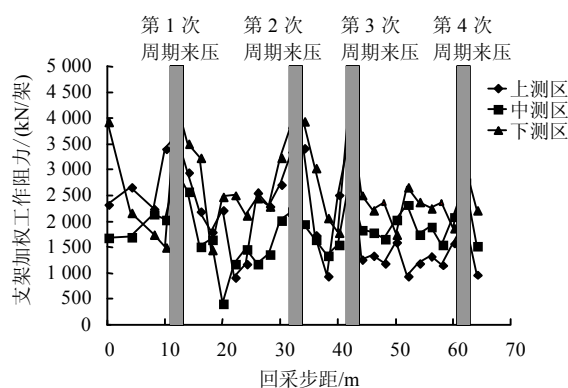
图 4 T₂193_B 工作面支架加权工作阻力变化曲线Fig. 4 Average pressures of hydraulic supports for T₂193_B island longwall panel

图 4 中记录了工作面 3 次周期来压时工作面支架工作阻力变化情况。观测结果表明, 工作面在回采期间, 支架承载特征十分明显, 且受力起伏较大、来压明显。由图 4 可知, 周期来压步距平均为 20 m

左右。所以, 以上述 3 次周期来压为例, 简要模拟老顶随着采空区悬顶距离的不断增大而伴随的周期垮落, 周期垮落步距为 20 m。

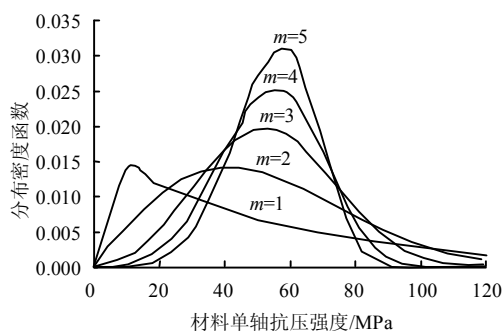
3.3 煤岩体非均匀性参数设置

3.3.1 Weibull 分布概率密度函数

为了描述孤岛工作面煤岩体材料性质的非均匀性, 假定组成材料细观单元的力学性质满足 Weibull 分布, 该分布可以按照如下分布密度函数来定义^[5]:

$$f(x) = \frac{m}{\eta^m} x^{m-1} \exp \left[-\left(\frac{x}{\eta} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中: m 为 Weibull 分布的形状参数, 定义了 Weibull 分布密度函数的形状; η 为尺度参数, 定义了所研究单元参数的平均值, 但其数值并不等于参数平均值。 m 和 η 是两个正参数。

图 5 形状参数 m 不同时材料单轴抗压强度的 Weibull 随机分布密度Fig. 5 Uniaxial compressive strength corresponding to various parameters m for Weibull distribution density functions

Weibull 随机分布能够描述煤岩体材料参数, 如弹性模量、抗压强度等参数的非均匀分布特征。对于材料的上述物理力学参数, 可以在给定其 Weibull 分布参数的条件下, 按照式 (1) 决定的随机分布赋值。当 $m=1\sim5$ 变化时, Weibull 分布密度函数的曲线如图 5 所示。显然, Weibull 随机分布中, m 越大, 组成材料的细观单元模量和强度属性越趋于均匀。

3.3.2 煤岩体非均匀性参数的随机分布与赋值

对于给定的 Weibull 分布尺度参数 η , 可以计算出符合式 (1) 的某一区间上的材料物理力学参数, 而将其赋值到 FLAC^{3D} 单元上的概率可用 Fish 随机函数 urand 生成。

FLAC^{3D} 数值单元的具体赋值过程是, 首先采用循环函数, 统计各岩层的单元个数和单元号; 然后利用随机函数生成与各岩层单元数量相等的物理力学随机参数; 最后遍历模型中的单元, 依次对各

单元赋值。这里需要特别指出的是,材料的非均匀性包括弹性模量、泊松比、黏聚力、摩擦角以及单轴抗压强度等参数的非均匀性,如果将每个参数分别利用 Fish 语言编写程序进行随时分布赋值,势必导致所研究问题的复杂化,所以,这里只将弹性模量和单轴抗压强度(反映到 FLAC^{3D} 里为抗拉强度)作为随机参数进行赋值,如图 6 所示即模型抗压强度的随机赋值结果。

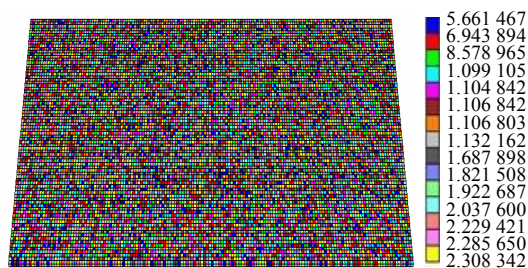


图 6 煤层抗压强度的随机赋值结果(单位: MPa)

Fig. 6 Random results of compressive strength of coal seam (Unit: MPa)

3.4 煤岩体弹性应变能

如前所述,本文数值分析采用 Mohr-Coulomb 屈服准则判断煤岩体材料的屈服,即最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 满足如下表达式^[6]:

$$\sigma_1 = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (2)$$

式中: c 和 φ 分别为煤岩体的黏聚力和摩擦角。

在工作面回采过程中,数值模型中单元应力是一个动态变化的过程,当单元应力满足 Mohr-Coulomb 屈服准则时,记录单元的弹性应变能密度,即

$$u = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \quad (3)$$

利用 FLAC^{3D} 内嵌语言 Fish 编写程序,在 FLAC^{3D} 运行时,每隔一定时步判断模型中单元是否达到 Mohr-Coulomb 屈服准则,达到屈服准则的单元用白色圆圈(代表岩层)和红色圆圈(代表煤层)表示其弹性应变能的大小。

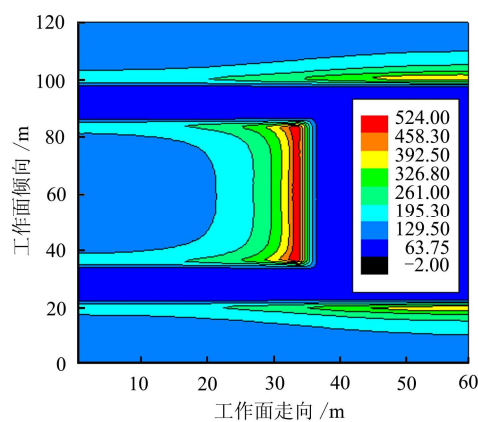
4 孤岛工作面冲击能量演化规律

本节分顶底板和煤层两种情况讨论孤岛工作面回采过程中周期来压时能量积聚和释放的演化规律。

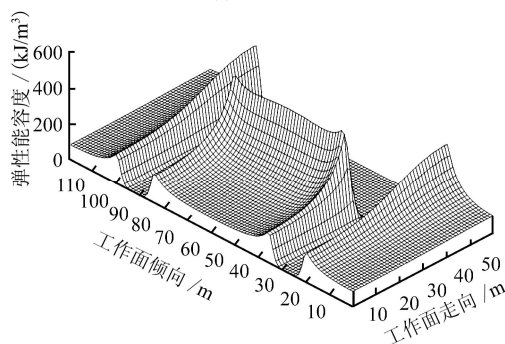
4.1 工作面采场能量分布规律

通过研究煤层厚度为 3、5、7 m 三种情况下,研究孤岛工作面煤层垂直应力和能量场的变化规

律,讨论不同煤层厚度对孤岛工作面发生冲击破坏的影响。如图 7 所示,为煤厚为 3 m 时的孤岛工作面煤层能量场云图及三维视图。



(a) 能量场云图



(b) 能量场三维视图

图 7 煤厚为 3 m 时孤岛工作面煤层能量场云图及三维视图

Fig.7 Nephogram and 3D view of energy field for 3 m coal height in island longwall panel

孤岛工作面煤层能量场的特征可以概括如下:

①工作面前方超前支承压力范围内出现能量峰值,随着远离工作面能量逐渐降低直至未受采动影响水平;②靠近煤壁的巷帮由于卸压能量有大幅度降低,随着深入煤层内部出现能量峰值;③工作面和顺槽巷道的交界处能量峰值较工作面处大;④工作面后方煤柱由于采空区卸压,能量积聚程度较高。图中数据显示,随着煤厚的增加,工作面前方能量积聚程度逐渐增大,能量峰值距工作面煤壁距离也逐渐增大,即峰值位置逐渐远离工作面向煤层内部转移。顺槽巷道与工作面叠加应力汇交处的能量峰值同时也随着煤厚的增加而逐渐远离工作面。图 8 为不同煤厚孤岛工作面能量变化曲线,图中曲线显示,当煤厚为 3 m 时,工作面前方能量峰值为 472 kJ/m³,峰值位置距工作面煤壁 6.5 m;当煤厚为 7 m,能量峰值为 549 kJ/m³,位置距煤壁 14.5 m。所以,运用能量理论分析不同煤厚的孤岛工作面煤

层发生冲击破坏的规律是,随着煤层厚度的增加,工作面前方发生冲击破坏的可能性逐渐增大,而且危险区域逐渐向煤层内部转移。顺槽巷道与工作面叠加应力的汇交处发生冲击破坏的危险程度最高,随着煤厚的增加,此区域的应力峰值也向煤层内部转移,所以应对此部位实施防冲措施。

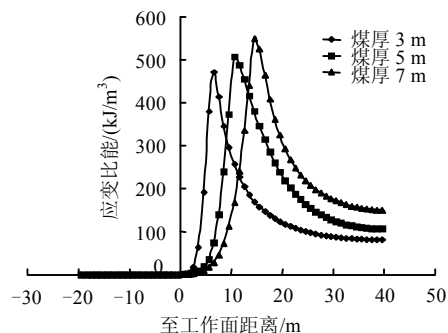


图 8 不同煤厚孤岛工作面能量变化情况

Fig.8 Energy distribution of island longwall panel for various coal thicknesses

4.2 周期来压时顶底板冲击失稳能量演化规律

图 9 为工作面经历 3 次周期来压时顶底板的能量释放和演化过程示意图。图中将顶底板的塑性破坏

坏区和能量释放的动态规律结合起来说明周期来压时能量释放的激增机制。

由图 9 可知,工作面前方顶底板和煤层内的能量积聚到一定程度时,随着孤岛工作面的回采逐渐释放。如果用微震数或者声发射数来解释,则可以认为是工作面的回采造成了前方顶底板和煤层的卸压,从而顶底板和煤体发生塑性破坏,这个过程中不断有能量的释放,即上述图片中白色圈所代表的意义。

随着孤岛工作面的回采,顶板的悬空距离逐渐增大,当工作面推进到距切眼 46 m 时,顶板发生初次垮落。此时由于顶板的突然破碎,造成了巨大的冲击破坏,顶板初次垮落之后,随着工作面的进一步推进,顶板迎来了第 1 次到第 3 次周期来压,垮落步距均为 20 m,在这 3 次周期垮落过程中,能量释放同样巨大。如图 9 所示,随着工作面的回采,老顶悬空距离逐渐增大,老顶所积聚的弹性应变能也在逐渐增大,当顶板周期垮落时,能量会突然释放,此现象从图 9 的周期垮落和回采步骤对比中显而易见,即能量有很明显的激增。所以,工作面前方发生冲击破坏的主要原因是由于顶板的初次垮落和周期垮落所伴随的巨大能量释放而造成的。

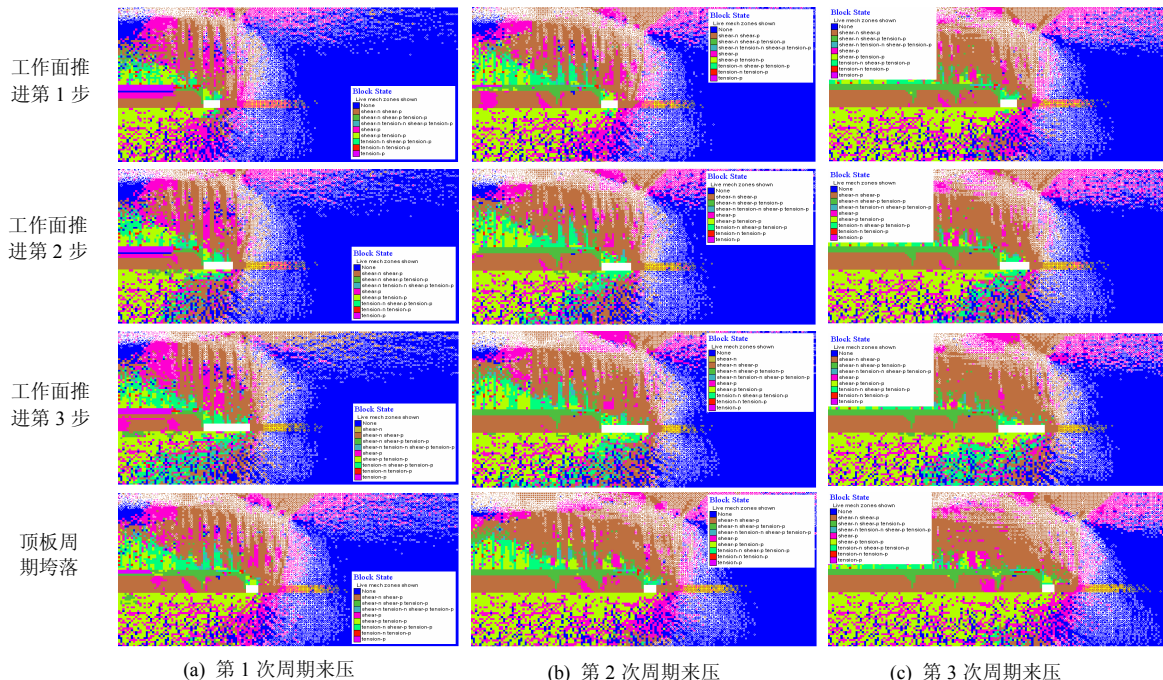


图 9 3 次周期垮落过程中顶底板能量释放

Fig.9 Energy release of surroundings during three periodic weighting

4.3 周期来压时煤层冲击失稳能量演化规律

图 10 为工作面经历 3 次周期来压时孤岛工作面煤层的能量释放和演化过程示意图。图中同样将煤层的塑性破坏区和能量释放的动态规律结合起来说

明周期来压时能量释放的激增机制。与图 9 不同的是,由于本节研究的只有孤岛工作面煤层,所以能量释放和演化规律用黄色圆圈来表示。所以,从煤层在回采过程中的能量演化规律能更明显地显示工

工作面周期来压时的能量释放激增机制。

随着工作面的回采,工作面前方能量释放逐渐增大。当推进到距切眼 46 m 时,顶板引来了初次垮落,造成了巨大的能量释放。图 10 显示,孤岛工作面不断推进在煤层内引起的能量释放是显而易见的。继顶板初次破断之后,工作面的继续推进又造成了顶板的第 1 次到第 3 次周期垮落,每次周期垮落时,由于顶板的突然断裂,造成了巨大的能量释放,影响范围也

随之较远。

由图 10 同样可知,当顶板周期垮落时,工作面前方煤层内总有一个区域是处于能量释放最为频繁的状态,而且影响范围较远。这是因为顶板的突然垮落造成了积聚已久的弹性能瞬间释放,所以比周期来压之前能量释放影响范围大,此时极易引发工作面冲击失稳。这一规律很好地说明了孤岛工作面周期来压时的能量释放激增机制。

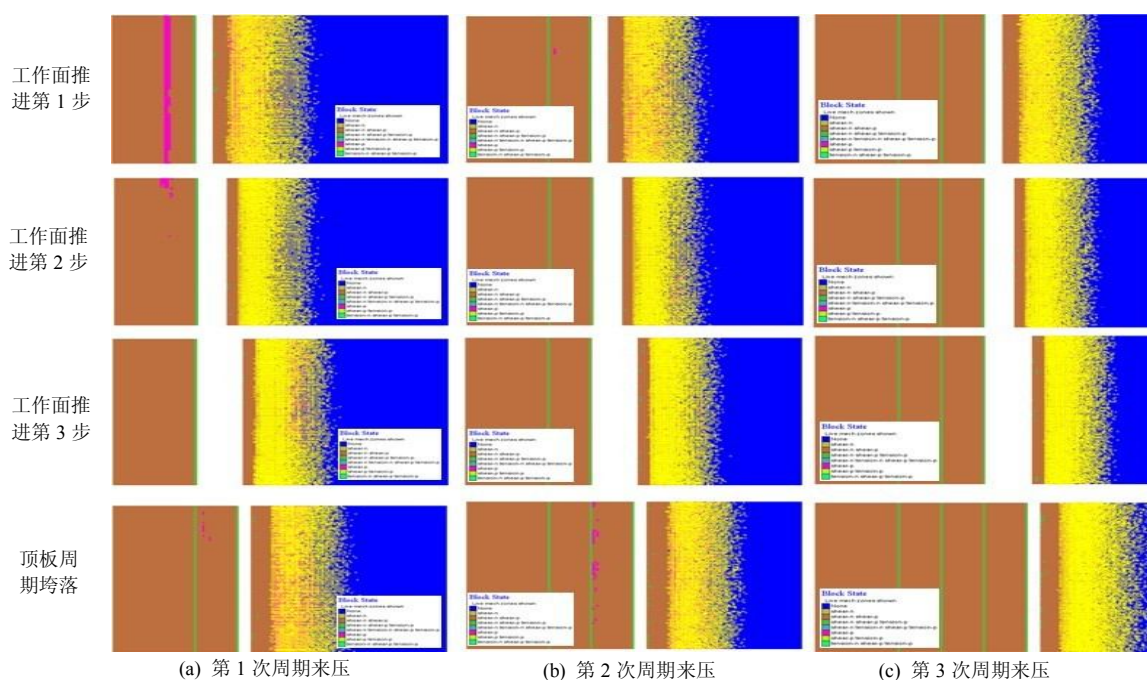


图 10 3 次周期垮落过程中顶底板能量释放

Fig.10 Energy release of coal seam during three periodic weighting

为了能够更加直观地说明工作面回采过程中老顶能量演化规律和周期来压时能量突然释放规律,在数值计算过程中,统计单元的能量释放总和,绘制图 11 所示的老顶 3 次周期垮落过程中能量释放率变化曲线。图中数据显示,周期来压之前老顶能量释放率在 50% 以下,较为平稳。当老顶周期断裂时,积聚于老顶中的弹性能瞬间释放,能量释放率大幅增加,工作面和巷道容易发生冲击地压。

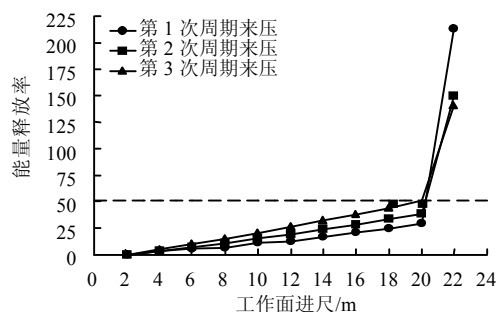


图 11 3 次周期垮落过程中老顶能量释放率变化曲线

Fig.11 Energy release of main roof during three periodic weighting

总之,孤岛工作面的不断推进造成了采空区顶板的大面积悬空,这时是冲击地压的多发时段。当顶板初次垮落或者周期垮落时,极容易发生煤岩体冲击失稳。

4.4 周期来压时工作面支承压力分布规律

上述分析得到工作面周期来压时,顶底板和煤层的能量释放会突然增大,而此时的工作面超前支承压力势必也达到峰值,以第 2 次周期来压时的支承压力云图和三维视图为例,如图 12 所示。

图 12 表示在第 2 次周期来压的过程中孤岛工作面应力场的分布规律,图中同样给出周期来压时工作面塑性状态和垂直应力云图。由图中数据可以看出,由工作面回采引起的超前支承压力在工作面附近相对较低,但升高速度较快。支承压力峰值点位于顺槽巷道与工作面所产生的叠加应力汇交处。老顶周期来压时,支承压力的峰值将到达一次最高峰。即在工作面回采过程中,随着顶板的不断垮落,超前支承压力的峰值是逐渐增大的。由于采空区空间

的不断增大,工作面顶板会突然破断,形成一次周期来压,此时的超前支承压力峰值达到最大,甚至出现激增。

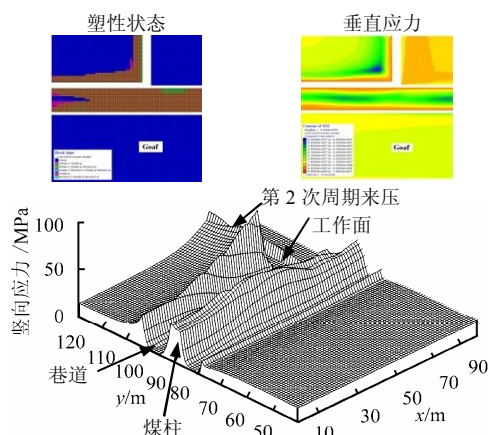


图 12 第 2 次周期来压时工作面支承压力分布特征
Fig.12 Abutment pressure of the island longwall panel during the second periodic weighting of roof

5 结 论

基于唐山矿孤岛工作面的地质条件,从数值分析的角度来研究煤岩体材料非均匀性情况下,揭示孤岛工作面顶板周期来压时煤岩体能量释放的动态特征,分析工作面前方能量释放激增机制,得到如下结论:

(1) 孤岛工作面的不断推进造成了采空区顶板的大面积悬空,老顶所积聚的弹性应变能也在逐渐增大,这时是冲击地压的多发时段。当顶板发生突然断裂或者垮落时,顶底板和煤层的能量积聚会有激增,释放十分突然,极容易发生煤岩体冲击失稳。所以,孤岛工作面前方发生冲击破坏的主要原因是由于顶板的突然垮落所伴随的巨大能量释放而造成的。

(2) 随着煤层厚度的增加,工作面前方发生冲击破坏的可能性逐渐增大,而且危险区域逐渐向煤层内部转移。顺槽巷道与工作面叠加应力的汇交处

发生冲击破坏的危险程度最高,随着煤厚的增加,此区域的应力峰值也向煤层内部转移,所以应对此部位实施防冲措施。

(3) 工作面超前支承压力峰值点位于顺槽巷道与工作面所产生的叠加应力汇交处。随着工作面的推进,超前支承压力峰值不断增大,当周期来压时会有激增。这是由于采空区空间的不断增大,工作面顶板会突然破断,能量释放突然且十分剧烈,此时的超前支承压力峰值达到最大,甚至出现激增。

参 考 文 献

- [1] 姜耀东, 赵毅鑫, 刘文岗, 等. 煤岩冲击失稳的机制和实验研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] JIANG YAODONG, WANG HONGWEI, XUE SHENG, et al. Assessment and mitigation of coal bump risk during extraction of an island longwall panel[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 95 (1): 20—33.
- [3] MOHAMED K M. Design considerations for longwall yield pillar stability [D]. West Virginia: West Virginia University, 2003
- [4] 王学滨. 不同强度岩石的破坏过程及声发射数值模拟[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(8): 837—843.
WANG Xue-bin. Numerical simulation of failure processes and acoustic emissions of rock specimens with different strengths[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2008, 30(8): 837—843.
- [5] 朱道建, 杨林德, 蔡永昌. 柱状节理岩体各向异性特性及尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1405—1414.
ZHU Dao-jian, YANG Lin-de, CAI Yong-chang. Research on anisotropic characteristics and size effect of columnar jointed rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28 (7): 1405—1414.
- [6] Itasca Consulting Group Inc. Fast Lagrangian analysis of continua in 3 dimensions(version 3.1)[M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc., 2006.