

坚硬顶板断裂释放能量及其对煤层扰动影响研究

王同旭,周永晖,江东海

(山东科技大学 能源与矿业工程学院,山东 青岛 266590)

摘要:估算和评价坚硬顶板断裂对采煤工作面煤壁稳定性的影响,是煤矿开采中亟需研究解决的课题。引用坚硬顶板断裂震源函数,获得坚硬顶板断裂应力波速度时程曲线,估算顶板断裂震源能量,分析顶板厚度及顶板强度的影响特征;在FLAC^{3D}数值模型中设置结构面,模拟基本顶破断及下方直接顶受迫断裂,在此基础上引入顶板断裂应力波速度时程曲线,从扰动能量角度对采煤工作面煤壁稳定性进行动力学模拟分析。研究结果表明:顶板断裂震源应力波主要受断裂顶板厚度和顶板强度的影响,且随着断裂顶板厚度和强度的增大,应力波最大振幅增大、震源释放能量增加;坚硬顶板断裂对下方采煤工作面的影响主要集中在煤壁前方0~6 m,特别是0~2 m范围内。回归出了断裂震源能量对煤壁前方0~2 m范围扰动能量传递率表达式。分析表明,断裂扰动后煤壁前方发生岩爆的剧烈程度等级增加,且扰动后煤壁前方极限平衡区能量增幅达26%~32%,易发生煤壁失稳甚至冲击性破坏。

关键词:坚硬顶板;数值模拟;断裂扰动;能量传递率;煤壁稳定性

中图分类号:TD324

文献标志码:A

Study on energy released from hard roof fracture and its influence on coal seam disturbance

WANG Tongxu, ZHOU Yonghui, JIANG Donghai

(College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology,
Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: How to estimate and evaluate the influence of hard roof fracture on the stability of coal wall in coal mining face is an urgent problem to be solved in coal mining. By using the hard roof fracture source function, the time history curve of the hard roof fracture stress wave velocity was obtained. Then, the roof fracture source energy was estimated and the influence characteristics of the roof thickness and roof strength were analyzed. The structural plane was set in the FLAC^{3D} numerical model to simulate the main roof fracture and the immediate roof forced fracture below. On this basis, the time history curve of roof fracture stress wave velocity was introduced and the dynamic simulation analysis of coal wall stability of coal mining face was carried out from the perspective of disturbance energy. The results show that the stress wave of the roof fracture source is mainly affected by the thickness and strength of the fractured roof. With the increase of the thickness and strength of the fractured roof, the stress wave maximum amplitude increases whereas the source release energy increases. The influence of hard roof fracture on the working face below is mainly concentrated on the area 0~6 m ahead of the coal wall, especially within the range of 0~2 m. The disturbance energy transfer rate expression of fault source energy to the area 0~2 m ahead of coal wall was regressed. The analysis shows that the severity level of rock burst ahead of the coal wall increases after the fault disturbance, and the energy increase of the limit equilibrium zone ahead of the coal wall after the disturbance reaches 26%~32%, which is prone to instability or even impact failure of the coal wall.

收稿日期:2021-05-08

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2016EEM36)

作者简介:王同旭(1963—),男,山东海阳人,教授,博士生导师,主要从事矿山岩石力学方面的研究。

周永晖(1997—),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要从事矿山岩石力学方面的研究,本文通信作者。

E-mail: 1962002832@qq.com

Key words: hard roof; numerical simulation; fracture disturbance; energy transfer rate; coal wall stability

坚硬顶板厚度较大,整体性强,突然断裂会释放大量能量,对采煤工作面围岩稳定性构成较大影响,甚至引发冲击地压事故。坚硬顶板断裂机制、演化进程及灾害预测技术研究已取得较丰富成果^[1-3]。李新元等^[4]通过建立坚硬顶板初次断裂前后力学模型,推导了弹性基础梁能量计算公式,分析了坚硬顶板断裂前后能量积聚,并数值模拟了能量释放分布规律;王恩元等^[5]通过分析顶板断裂过程的动力学演化特征,推导坚硬顶板断裂滑移时空分布函数,建立了顶板断裂震源模型。而工作面煤壁片帮失稳的研究成果也很多,张强^[6]通过能量非稳定平衡准则分析得到顶板-煤体系统的稳定条件;文献^[7]通过线弹性准则和脆性准则建立了煤岩体岩爆倾向性的判别式。目前在坚硬顶板断裂机制及断裂能量释放规律等方面已有较为详细的研究,但在如何估算和评价坚硬顶板断裂对采煤工作面煤壁稳定性的影响等方面尚需进一步研究与完善。

本研究在文献^[5]的基础上,分析了坚硬顶板断裂释放能量大小的影响因素;通过设置结构面模拟煤层上覆坚硬顶板(基本顶)破断及下方直接顶、伪顶受迫断裂,获得了传递到煤壁前方煤层扰动能量的分布规律及估算方法;通过能量方法分析采煤工作面煤壁稳定性,提供了对处于极限稳定状态的煤壁受瞬时扰动影响程度的评价方法。

1 坚硬顶板断裂震源速度时程曲线与震源能量

在研究顶板断裂过程中,可采用顶板断裂震源函数^[5]计算断裂震源速度时程曲线。震源速度指的是坚硬顶板断裂位置处震动的速度。根据顶板断裂震源函数可知影响断裂震源速度时程曲线的主要因素为断裂顶板厚度和顶板强度。其中断裂顶板强度可由顶板断裂震源函数中抗拉强度、剪切模量、膨胀波速度、剪切波速度来表征;断裂顶板厚度则需通过顶板断裂震源函数中裂纹扩展速度对时间的积分来表征,并通过裂纹扩展速度影响断裂震源函数。顶板断裂震源函数如式(1)^[5]所示:

$$\Delta \dot{u} = \dot{u}(r, \pi - \text{Inf}, v, t) - \dot{u}(r, -\pi + \text{Inf}, v, t),$$

$$\dot{u}(r, \theta, v, t) = \frac{v \alpha_d K_1}{u \sqrt{2\pi r} [4 \alpha_d \alpha_s - (1 + \alpha_s^2)]} \left[(1 + \alpha_s^2) \frac{\sin(\theta_d/2)}{\sqrt{r_d}} - 2 \frac{\sin(\theta_s/2)}{\sqrt{r_s}} \right]. \quad (1)$$

式中:Inf 为一个与裂纹开度有关的无穷小量, t 为任意时刻, v 为裂纹扩展速度, r 为该点到裂纹尖端的距离, $r_s, r_d, \alpha_s, \alpha_d, \theta_s, \theta_d$ 为与剪切波和膨胀波波速相关的中间变量, K_1 为张性裂纹动态应力强度因子。相关参数计算方法及取值参照文献^[5]获得。

煤岩体断裂过程中裂纹扩展速度 v 可采用 Bell 函数描述^[7],即

$$v = \frac{v_{\max}}{1 + \left| \frac{t - c}{a} \right|^{2b}}. \quad (2)$$

其中: v_{\max} 为裂纹扩展极限速度, a, b, c 为控制参数。

将式(2)中裂纹扩展速度对时间进行积分可得到顶板断裂的厚度^[7]。其中,裂纹扩展极限速度通常为 Rayleigh 波速的 0.2~0.57 倍^[8],本研究取 800 m/s。经试算可知,当参数 a, b, c 取值分别为(1,2,5)、(2,3,5)、(3,4,5)时,对应的顶板断裂厚度分别为 9、15 和 22 m。

为分析断裂顶板厚度和强度的影响,取 5 种不同厚度和强度的顶板分组如表 1 所示,其中 1、2、3 组研究顶板厚度的影响,2、4、5 组研究顶板强度的影响。不同强度顶板参数取值如表 2 所示。

根据式(1),使用 MATLAB 软件获得不同断裂顶板厚度及强度时震源速度时程曲线如图 1 所示。可见,随断裂顶板强度及厚度的增大,应力波最大振幅增大,较坚硬顶板厚度为 9、15 和 22 m 时对应最大振幅速度分别为 14.8、17.9 和 21.2 m/s;

表 1 断裂顶板分组

Tab. 1 Grouping of fractured roofs

编号	顶板强度	顶板厚度/m
1	较硬	9
2	较硬	15
3	较硬	22
4	较软	15
5	坚硬	15

断裂厚度 15 m 顶板较软、较硬、坚硬时对应的最大振幅速度分别为 10.9、19.1 和 22.2 m/s。厚度越大的顶板震动持续时间越长,较坚硬顶板厚度为 9、15 和 22 m 时对应的震动持续时间分别为 0.24、0.42 和 0.63 s;强度不同的顶板震动持续时间几乎相同。

表 2 不同强度顶板参数^[9]

Tab. 2 Parameters of roofs with different strengths

顶板类别	抗拉强度/MPa	剪切模量/GPa	膨胀波波速/(m/s)	剪切波波速/(m/s)
坚硬	8.0	15.2	4 500	2 887.6
较硬	5.2	6.8	3 600	2 204.3
较软	1.2	1.6	2 850	1 645.4

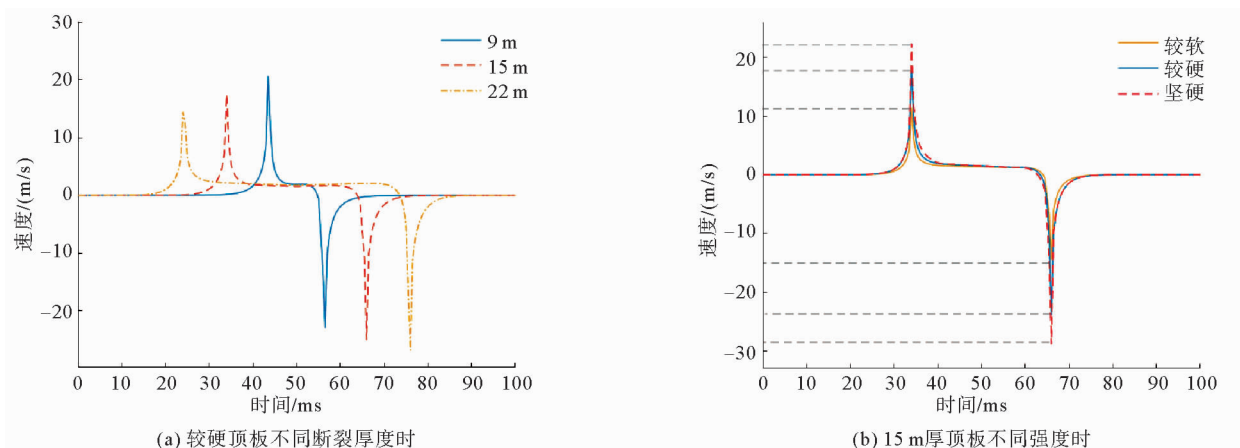


图 1 震源速度时程曲线

Fig. 1 Time history curve of source

断裂震源能量可由图 1 震源速度时程曲线通过包络线面积法^[7]得到,5 种顶板情况的断裂震源能量估算值见表 3。可见,顶板断裂震源能量与顶板厚度和顶板强度有关,随着断裂顶板厚度或

强度的增大而增大。较硬顶板断裂厚度 9、15、22 m,对应的断裂震源能量为 21 031、24 820 和 30 971 J,依次增长幅度分别为 18.0% 和 24.8%;断裂顶板厚 15 m 强度由较软、较硬、坚硬,对应的断裂震源能量为 16 202、24 820 和 28 009 J,依次增长幅度分别为 53%、12%。

2 顶板断裂扰动 FLAC^{3D} 模拟方案

为研究坚硬顶板断裂扰动对采煤工作面煤壁稳定性的影响,利用 FLAC^{3D} 软件进行模拟分析。首先模拟采煤工作面煤层开采后伪顶及直接顶垮落后、基本顶断裂前的应力场(扰动前);然后在煤壁前方 1.0 m 处基本顶和直接顶及伪顶中设置一竖向结构面,以模拟基本顶断裂及下方顶板受迫断裂;设置断裂面(结构面)后将断裂基本顶右侧边界处水平约束解除,模拟其回转和沉降;以矸石材料替换开采煤层及垮落直接顶及伪顶,模拟采空区矸石;将两侧的滑动约束及底部的固定约束改为动力学边界条件^[10-12],吸收传递到边界处的应力波,消除应力波反射影响;通过 Table 命令在 FLAC^{3D} 中施加图 1 所示震源速度时程曲线,断裂扰动施加在基本顶断裂线正下方的岩层上(煤壁前方 1.0 m)(见图 2)。模拟 5 种不同情况基本顶断裂及其对煤层扰动影响。

表 3 震源能量

Tab. 3 Energy of source

断裂顶板编号	1	2	3	4	5
震源总能量	21 031	24 820	30 971	16 202	28 009

模型尺寸(长×宽×高)为 60 m×1 m×100 m,网格尺寸为 1 m×1 m×1 m,模型煤岩层及结构面参数如表 4 所示(以表 1 中第 2 组基本顶为例)。

表 4 煤岩层及结构面参数
Tab. 4 Parameters of coal strata and structural plane

岩层名称	密度 /(kg/m ³)	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /MPa	抗拉强度 /MPa	厚度/m	法向刚度 /(MPa/m)	切向刚度 /(MPa/m)
上覆岩层	2 500	4.8	2.4	24	2.0	10.0	46	—	—
基本顶	2 700	11.1	8.3	33	9.0	3.0	15	—	—
直接顶	2 300	2.7	1.4	32	4.2	2.9	7	—	—
伪顶	2 100	1.4	0.2	23	0.6	0.7	3	—	—
煤层	1 415	2.4	1.0	20	3.6	1.4	4	—	—
直接底	2 300	2.6	1.0	23	4.5	1.8	6	—	—
基本底	2 500	3.9	1.2	26	20.0	4.0	10	—	—
下覆岩层	2 500	4.8	2.4	24	20.0	10.0	15	—	—
矸石	1 500	1.4	0.2	23	1.3	0.7	—	—	—
结构面	—	—	—	21	0	—	—	20	20

初始应力场模拟时,模型底部为固定约束,四周为法向约束,顶部施加 10.875 MPa 竖向载荷以模拟模型上覆 435 m 岩层自重。

在工作面煤壁前方 2 m(断裂线前后各 1 m)范围煤层内设置 3 条竖向监测线,分别位于煤壁前方 2、1 和 0 m 处,监测范围(长×宽×高)为 2 m×1 m×4 m。模型及监测范围如图 2 所示。

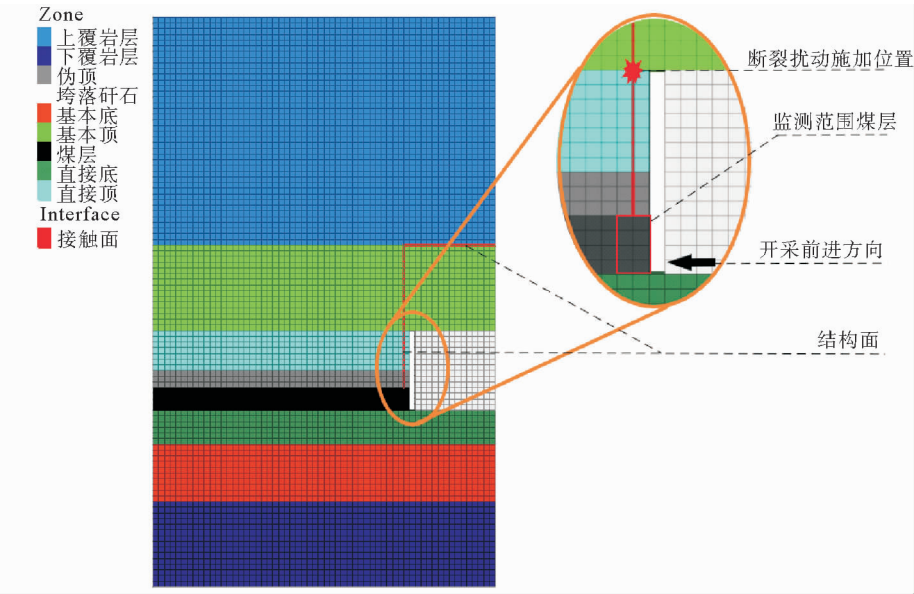


图 2 数值模型示意图
Fig. 2 Diagram of the numerical model

模拟时,根据表 1 及表 2,改变基本顶厚度和顶板强度参数,并施加对应的震源速度时程曲线(图 1),得到相应的模拟结果。

3 顶板断裂扰动数值模拟结果与分析

以采煤工作面煤壁受到的扰动能量为分析指标,扰动能量的大小同样采用测点震动速度包络线方法^[7]

进行计算。

3.1 煤壁前方煤层扰动能量分布特征

利用震动速度包络线面积,计算煤壁前方 10 m 所有监测点(单元节点)的扰动能量,将煤层中距煤壁相同距离单元的扰动能量相加,可得扰动能量在采煤工作面前方 10 m 范围煤层中分布规律。

监测点速度包络线示意图及扰动能量在工作面前方 10 m 范围煤层中分布规律,如图 3 所示。

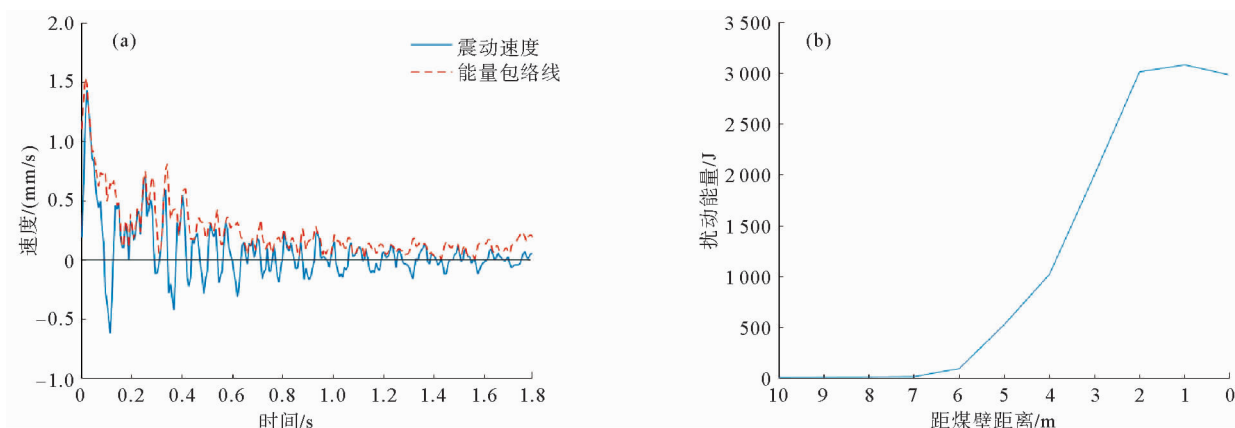


图 3 震动速度包络线及煤层扰动能量分布规律

Fig. 3 Vibration velocity envelope and disturbed energy distribution law of coal seam

可见,在时间上煤层所受的扰动能量主要集中在 0.8 s 内,之后逐渐变缓,并在 1.8 s 左右结束;在空间上煤层受到的扰动能量主要集中在采煤工作面煤壁前方 0~6 m 范围,其中煤壁前方 2 m 范围的扰动能量占传递到煤层中总扰动能量的 69.8%。考虑工作面前方煤壁失稳破坏的最大范围一般不超过 2 m^[13-14],因此下面的分析中,主要分析煤壁前方 2 m 范围的监测区域,以下简称“监测范围煤层”。

利用震动速度包络线面积法,计算监测范围煤层所有单元节点的扰动能量,并在 MATLAB 软件中采用插值方法,得到不同断裂顶板厚度及不同顶板强度时监测范围煤层中扰动能量等值线图如图 4~5 所示。

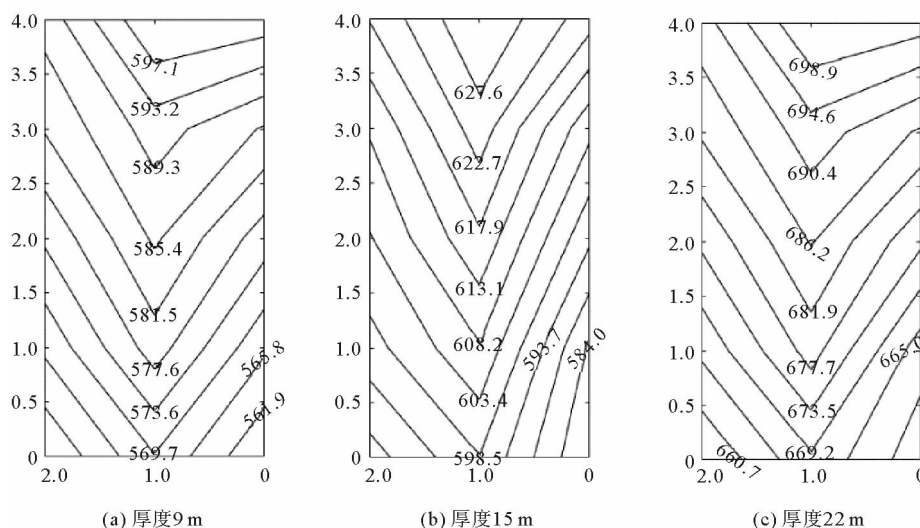


图 4 较硬基本顶不同厚度情况下监测范围煤层扰动能量等值线(单位:J)

Fig. 4 Energy isoline map of coal seam in monitoring range with different thicknesses of hard base roof

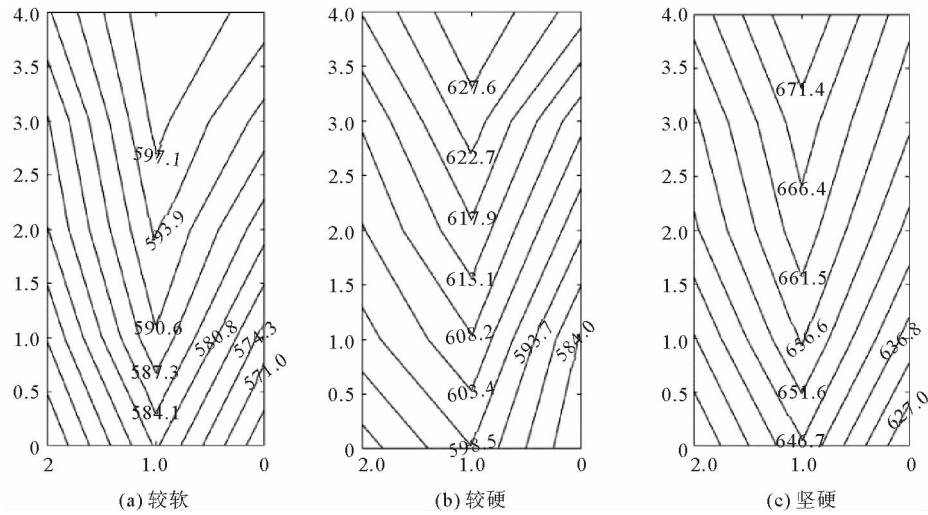


图 5 厚度 15 m 基本顶不同强度情况下监测范围煤层扰动能量等值线(单位:J)

Fig. 5 Energy isoline map of coal seam in monitoring range with different strengths of the 15-meter-thick basic roof

由图 4 可知,监测范围煤层受到扰动能量,沿煤层厚度自上至下逐渐衰减,且震源正下方(煤壁前方 1.0 m 处)能量最大,向两侧逐渐衰减。扰动能量随断裂顶板厚度和强度的增加而增加,其中断裂顶板厚度 9、15 和 22 m,对应扰动能量最大值为 597、627 和 699 J;断裂顶板较软、较硬、坚硬时,对应扰动能量最大值为 597、627 和 671 J。

3.2 顶板断裂能量传递规律

监测范围煤层内所有单元的扰动能量相加,可得监测范围内扰动总能量大小,将扰动总能量与震源总能量比值定义为断裂能量传递率,计算结果如表 5 所示,表中顶板分组编号见表 1。

将震源总能量和所对应的能量传递率数据,采用离散傅里叶拟合法,得到拟合曲线如图 6 所示。

表 5 震源应力波对监测范围煤层能量传递率

Tab. 5 Energy transfer rate of source stress wave to coal seam in monitoring range

断裂顶板编号	1	2	3	4	5
扰动能量/J	8 679.7	9 076.6	10 179.9	8 354.5	9 753.9
能量传递率/%	41.3	36.6	32.8	51.6	34.8

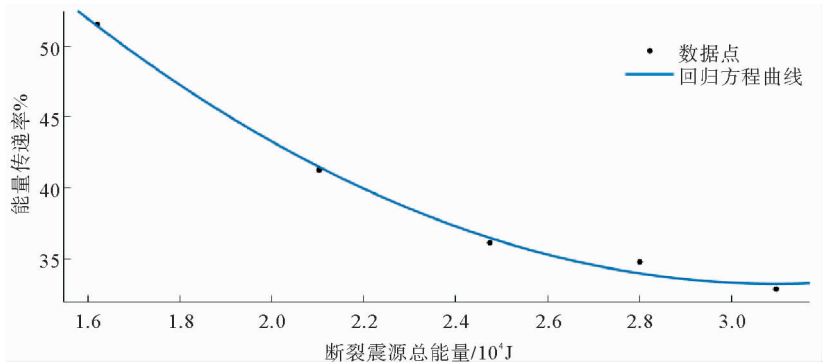


图 6 能量传递率回归曲线

Fig. 6 Energy transfer rate regression curve

设断裂震源总能量为 u_h (单位 J),则能量传递率 η 的回归方程为:

$$\eta = a_0 + a_1 \cos(\tau u_h) + b_1 \cos(\tau u_h) \tag{3}$$

式中: $a_0 = 72.1, a_1 = -7.1, b_1 = -10.7, \tau = 4.8 \times 10^{-7}$ 。

由图5可知,虽然随断裂震源总能量越大,传递到监测范围煤层的能量越多,但能量在传递过程中的损耗也越多,即能量传递率随断裂震源总能量的增加而减小。同时能量传递率与震源总能量拟合度很高,因此在本工况下,可根据能量传递率回归方程,由顶板断裂释放总能量,近似估计传递到监测范围煤层的扰动能量。

3.3 扰动能量对监测范围煤层稳定性影响

为分析顶板断裂扰动情况下监测范围煤层稳定性,类比采用岩爆剧烈程度等级能量判据指标,如式(4)所示^[15]:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 < \frac{U}{U_0} \leq 0.3 (\text{I级, 弱岩爆}), \\ 0.3 < \frac{U}{U_0} \leq 0.4 (\text{II级, 中等岩爆}), \\ 0.4 < \frac{U}{U_0} \leq 0.5 (\text{III级, 强烈岩爆}), \\ \frac{U}{U_0} > 0.5 (\text{IV级, 严重岩爆}). \end{array} \right. \quad (4)$$

其中, U 为单位体积的实际能量, U_0 为单位体积的极限储存能。煤体的极限储存能可通过经验公式^[15] $U_0 = -8 \times 10^{-6} \sigma_3^3 - 0.0002 \sigma_3^2 + 0.0546 \sigma_3 + 0.3645$ 计算得到,其中 σ_3 为最小主应力。

由于扰动能量一部分转变为煤层中的弹性能,另一部分随煤层的破裂而释放,所以不能以扰动结束后的应变能作为煤层受扰动后的总能量,故将受扰动前应变能与表5中扰动能量之和,作为煤层受扰动后总能量。为此,在扰动前的应力场中,取出监测范围煤层各单元3个主应力值,代入弹性应变能密度公式,计算各单元的应变能并累加,得到5种情况下监测范围煤层变形能量(受扰动前);并将监测范围煤层各单元最小主应力值,代入 U_0 经验公式计算各单元极限储存能值并累加,得到5种情况下监测范围煤层极限储存能,由此即可计算扰动前后岩爆剧烈程度等级指标。计算时泊松比取0.3,弹性模量为2.88 GPa。

另一方面,由于在施加扰动前监测范围煤层已经处于极限平衡状态,理论上内部应力和能量都处于极限状态(或临界状态),且顶板断裂产生的扰动能量几乎是瞬时(本模拟结果为1.8 s)完成的,因此可将监测范围煤层所受扰动能量占受扰动前应变能的百分比,作为衡量煤层稳定性的指标(称为扰动能量影响程度)。

基于以上两个评价指标,本算例模拟计算结果见表6所示。结果表明:考虑扰动影响后,岩爆剧烈程度等级有所提高。5种顶板情况下,监测范围煤层考虑扰动后的岩爆剧烈程度均由I级提升为II级;扰动前监测范围煤层处于极限平衡状态,扰动能量占比较大,几种断裂顶板厚度及强度时的扰动能量影响程度达26%~32%,瞬时扰动下本已处于临界稳定状态的煤壁失稳可能性较大。

表6 监测范围煤层岩爆等级及扰动能量影响程度

Tab. 6 Rock burst grade and disturbance energy influence degree of coal seam in monitoring range

断裂顶板分组	1	2	3	4	5
监测范围极限储存能/J	95 936	96 583	95 936	93 116	93 134
受扰动前总能量/J	31 786	31 827	31 871	31 230	31 890
受扰动后总能量/J	40 465	40 903	42 051	39 584	41 944
未扰动时岩爆剧烈程度等级指标	0.33	0.32	0.33	0.34	0.34
扰动时岩爆剧烈程度等级指标	0.42	0.42	0.43	0.43	0.45
扰动能量影响程度/%	27.31	28.52	31.94	26.75	30.59

需要说明的是,扰动对于煤岩体的影响并不是简单的能量叠加关系^[16]。如果在围岩的某些部位形成了高储能体,且其应力已接近于岩体的强度时(极限储能状态),由顶板断裂或其他因素引起扰动时,即使瞬时扰动量级很小,也可能使高储能煤岩体或极限储能状态煤岩体的应力或能量迅速超载,发生剧烈的脆性破坏,这种扰动与储能体的耦合作用尚需进一步研究。

4 结论

通过建立 FLAC^{3D}数值模型并设置结构面,模拟了煤层上覆坚硬顶板(基本顶)破断及下方直接顶受迫断裂,在此基础上引入坚硬顶板断裂震源函数,从扰动能量角度对采煤工作面前方煤壁稳定性进行了动力学模拟。研究结果表明:

1) 顶板断裂震源应力波主要受断裂顶板厚度和顶板强度的影响,且随着断裂顶板厚度和强度的增大,应力波最大振幅增大、震源释放能量增加。

2) 坚硬顶板断裂产生的能量在短时间释放,且对下方采煤工作面的影响主要集中在煤壁前方 0~6 m,特别是 0~2 m 范围内(即断裂线前后 1.0 m 范围)。

3) 模拟得到断裂震源能量对监测范围煤层扰动能量传递率的回归式,据此可估算该范围煤层中扰动能量大小。

4) 断裂扰动后煤壁前方发生岩爆的剧烈程度等级提升,扰动前后煤壁前方极限平衡区的能量增幅达 26%~32%,且在短时间内急速释放,处于极限平衡状态下的煤体易发生失稳破坏。本研究提供的扰动能量估算方法及处于极限稳定状态的煤壁受瞬时扰动影响程度评价方法,尽管还需要进一步完善,但仍有一定理论意义和工程价值。

参考文献:

- [1]卿颖,冯建伟,杨少春,等.基于物理-数值联合模拟的多期断裂形成机制及演化研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2018,37(1):60-70.
QING Ying, FENG Jianwei, YANG Shaochun, et al. Formation mechanism and evolution of multi-phase fault based on physical and numerical simulation[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2018, 37(1): 60-70.
- [2]谭云亮,张明,徐强,等.坚硬顶板型冲击地压发生机理及监测预警研究[J].煤炭科学技术,2019,47(1):166-172.
TAN Yunliang, ZHANG Ming, XU Qiang, et al. Study on occurrence mechanism and monitoring and early warning of rock burst caused by hard roof[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 166-172.
- [3]李志华,窦林名,陆菜平,等.断层冲击相似模拟微震信号频谱分析[J].山东科技大学学报(自然科学版),2010,29(4):51-56.
LI Zhihua, DOU Linming, LU Caiping, et al. Frequency spectrum analysis on micro-seismic signal of similar simulation test of fault rock burst[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2010, 29(4): 51-56.
- [4]李新元,马念杰,钟亚平,等.坚硬顶板断裂过程中弹性能量积聚与释放的分布规律[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增1):2786-2793.
LI Xinyuan, MA Nianjie, ZHONG Yaping, et al. Storage and release regular of elastic energy distribution in tight roof fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 2786-2793.
- [5]王恩元,冯俊军,孔祥国,等.坚硬顶板断裂震源模型及应力波远场震动效应[J].采矿与安全工程学报,2018,35(4):787-794.
WANG Enyuan, FENG Junjun, KONG Xiangguo, et al. A hard roof fracture source model and its far-field seismic impact by stress wave[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(4): 787-794.
- [6]张强.大采高煤层开采煤壁片帮内在影响因素分析[J].煤矿安全,2019,50(12):207-211.
ZHANG Qiang. Analysis of internal influencing factors of coal rib spalling in large mining height coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(12): 207-211.
- [7]冯俊军.应力波产生机制及对冲击地压影响研究[D].徐州:中国矿业大学,2016:26-43.
FENG Junjun. Research on stress wave formation and its influence mechanism on rock burst[D]. Xuzhou: China University

- of Mining and Technology, 2016; 26-43.
- [8] STEKETEE J A. Some geophysical applications of the elasticity theory of dislocations[J]. Canadian Journal of Physics, 1958, 36(9): 1168-1198.
- [9] 朱永鹏. 不同围岩条件下沿空留巷技术研究及应用[D]. 青岛: 山东科技大学, 2010: 19-20.
ZHU Yongpeng. Research and application of gob side entry technology under different surrounding rock conditions[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2010: 19-20.
- [10] 吴森, 王平, 许梦国, 等. 巷道断裂顶板的力学分析与数值模拟研究[J]. 化工矿物与加工, 2020, 49(2): 34-37.
WU Sen, WANG Ping, XU Mengguo, et al. Mechanical analysis and numerical simulation of broken roof in roadway[J]. Chemical Minerals and Processing, 2020, 49(2): 34-37.
- [11] 鲁健, 刘士奇, 郭萌, 等. 复采区顶板断裂数值模拟研究[J]. 煤炭技术, 2019, 38(4): 36-38.
LU Jian, LIU Shiqi, GUO Meng, et al. Numerical simulation study of roof fracture in mining area[J]. Coal Technology, 2019, 38(4): 36-38.
- [12] 于文鑫, 丁艳春, 刘磊, 等. 基于顶板剪切梁理论的顶板破坏及断裂力学特性分析[J]. 中国矿业, 2020, 29(3): 149-153.
YU Wenxin, DING Yanchun, LIU Lei, et al. Analysis of roof failure and fracture mechanics based on roof shear beam theory[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(3): 149-153.
- [13] 闫长斌, 徐国元, 李夕兵. 爆破震动对采空区稳定性影响的 FLAC^{3D} 分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2894-2899.
YAN Changbin, XU Guoyuan, LI Xibing. Stability analysis of mined-out areas influenced by blasting vibration with FLAC^{3D} [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2894-2899.
- [14] 尚振华, 唐绍辉, 焦文宇, 等. 基于 FLAC^{3D} 模拟的大规模采空区破坏概率研究[J]. 岩土力学, 2014, 35: 3000-3006.
SHANG Zhenhua, TANG Shaohui, JIAO Wenyu, et al. Failure probability of goaf in large-scale based on simulation of FLAC^{3D} [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35: 3000-3006.
- [15] 吕森鹏. 高地应力下地下工程岩爆机理及应用研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2009: 71-75.
LÜ Senpeng. Rock burst mechanism in high in-situ stress and application in underground engineering[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009: 71-75.
- [16] 谭云亮, 王子辉, 刘学生, 等. 采动诱冲动能估算及冲击危险性评价[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 123-131.
TAN Yunliang, WANG Zihui, LIU Xuesheng, et al. Estimation of dynamic energy induced by coal mining and evaluation of burst risk[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 123-131.

(责任编辑: 吕海亮)