

# 基于微震群震动波能量衰减特性的冲击地压 危险预测方法

刘耀琪<sup>1</sup>, 曹安业<sup>1,2,3</sup>, 王崧玮<sup>1</sup>, 杨 耀<sup>1</sup>, 郭文豪<sup>1</sup>, 薛成春<sup>1</sup>, 白贤栖<sup>1</sup>, 李 震<sup>4</sup>

(1.中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州 221116;2.中国矿业大学 江苏省矿山地震监测工程实验室,江苏 徐州 221116;3.徐州物研信息技术有限公司,江苏 徐州 221116;4.陕西小保当矿业有限公司,陕西 榆林 719302)

**摘 要:**煤岩体应力调整和破裂伴随弹性能的聚散并对外辐射震动波,通过震动波的能量特性可描述煤岩体的累积损伤以及弹性能集聚,综合两者可用于冲击地压危险的预测。研究了微震震动波的能量衰减规律,特别讨论了大尺度破裂下震动波能量对震源能量、半径、能量衰减系数以及受载点距震源距离的衰减响应规律,以甘肃某矿 250106-1 工作面微震实测数据为基础统计分析了不同震源能级的能量衰减系数分布规律;提出了基于震动波损伤效应的静载强度指标  $\phi_s$  以及描述弹性能集聚程度的动载强度指标  $\phi_d$ ,基于动静载叠加原理构建了冲击危险的综合预测指标  $\phi_{sd}$ ,并进行了预测实例分析。结果表明:250106-1 工作面 24 起冲击事件统计结果说明其工作面超前 300 m 临空回采巷道为冲击发生的高风险区域;震源能量、半径、受载点距震源的距离对能量衰减的影响较大,而能量衰减系数的影响相对较小;预测实例分析结果表明  $\phi_s$  对冲击显现区域的预测效果较好,而对大能量事件的预测效能较低; $\phi_d$  仅可对部分大能量事件进行预测,同时预测的冲击危险区域较广,侧面降低了  $\phi_d$  对冲击显现区域的预测效能;对于综合预测指标  $\phi_{sd}$ ,大能量事件位于中等冲击危险区域的概率超过 70%,并且冲击明显显现区域全部位于中等冲击危险区内,说明  $\phi_{sd}$  可有效预测大能量事件和冲击显现区域,预测效果较好。

**关键词:**冲击地压;震动波;能量衰减;冲击显现;大能量事件;微震

**中图分类号:**TD324 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2022)04-1523-11

## Prediction method of coal burst based on attenuation characteristics of seismic cluster energy

LIU Yaoqi<sup>1</sup>, CAO Anye<sup>1,2,3</sup>, WANG Songwei<sup>1</sup>, YANG Yao<sup>1</sup>, GUO Wenhao<sup>1</sup>, XUE Chengchun<sup>1</sup>, BAI Xianxi<sup>1</sup>, LI Zhen<sup>4</sup>

(1.School of Mines, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Jiangsu Engineering Laboratory of Mine Earthquake Monitoring and Prevention, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Xuzhou Wushuo Information Co., Ltd., Xuzhou 221116, China. 4. Shanxi Xiaobaodang Mining Co., Ltd., Yulin 719302, China)

**Abstract:** The shock wave radiated from the coal and rock fracture causes dynamic load disturbance in the mining space, which results in cumulative damage of the coal and rock mass and elastic energy accumulation. It is easy to induce dynamic disasters such as coal burst under the combined action of the two aforementioned factors. This paper is focus on the seismic energy attenuation law of shock wave, especially under large-scale fracturing of energy to the source energy, radius, the energy attenuation coefficient and loading point away from the epicenter distance. Based on

收稿日期:2021-09-01 修回日期:2021-11-23 责任编辑:郭晓炜 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2021.1384

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51734009);山东省重大科技创新工程资助项目(2019SDZY02);江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(KYCX21\_2350)

作者简介:刘耀琪(1995—),男,陕西神木人,博士研究生。E-mail:lyqcumt@foxmail.com

通讯作者:曹安业(1982—),男,江苏盐城人,教授,博士生导师。E-mail:caoanye@163.com

引用格式:刘耀琪,曹安业,王崧玮,等.基于微震群震动波能量衰减特性的冲击地压危险预测方法[J].煤炭学报,2022,47(4):1523-1533.

LIU Yaoqi, CAO Anye, WANG Songwei, et al. Prediction method of coal burst based on attenuation characteristics of seismic cluster energy[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1523-1533.



移动阅读

statistical analysis of recorded data from Longwall 250106-1 of a coal mine in Gansu Province, we got the distribution of energy attenuation coefficient of the different source level. The static load intensity index  $\phi_s$  based on the damage effect of shock wave and the dynamic load intensity index  $\phi_d$  describing the disturbance degree of shock wave were proposed, and the comprehensive prediction index of burst risk  $\phi_{sd}$  was constructed based on the principle of static and static load superposition, in which a prediction example was analyzed. The results show that the statistical results of 24 coal bursts in Longwall 250106-1 indicate that the 300 m overhead gob side of the longwall face is the high-risk area. Source energy, radius and distance between load point and source have great influence on energy attenuation, while energy attenuation coefficient has relatively low effect. The prediction examples show that  $\phi_s$  for the prediction effect of the coal burst area is ideal, but the prediction effect of the high-energy event is low. As for  $\phi_d$ , Only part of high-energy events can be predicted, and the prediction of coal burst area is wide, which reduces the prediction efficiency of burst risk area. For the comprehensive prediction index  $\phi_{sd}$ , the probability of high-energy event located in the moderate impact risk area is more than 70%, and the obvious coal burst areas are all located in the moderate impact risk area, indicating that the high-energy event and occurrence area of coal burst can be effectively predicted, which shows a good prediction performance.

**Key words:** coal burst; shock wave; energy attenuation; occurrence of coal burst; high-energy event; microseismic

我国煤矿开采深度持续增加,地质条件与开采布局等愈加复杂,冲击地压灾害风险日益增加<sup>[1]</sup>,成为制约矿井安全高效生产的主要灾害之一<sup>[2]</sup>。如何建立有效的监测预警方法对降低冲击地压风险以及冲击地压防治等方面尤为重要。

煤岩体破裂向外辐射震动波,通过微震系统可进行捕捉并记录为微震事件。微震事件可定义为煤岩体一定体积内的突然非弹性变形<sup>[3]</sup>,伴随着采掘空间周围,通过微震监测技术可实现冲击地压等动力灾害的监测预警。诸多学者依据微震特性在冲击地压预测预警方面进行了尝试,如震动波波速层析成像技术<sup>[4]</sup>、 $b$ 值<sup>[5]</sup>、震源参数<sup>[6]</sup>、冲击变形能<sup>[7]</sup>等。现场应用方面,丛利等<sup>[8]</sup>建立了一种基于动静载叠加的综合预警方法,并将其应用于强矿震的预警。WANG等<sup>[9]</sup>建立了基于微震定位误差的聚类分析方法,并将其用于冲击危险区域的预测,初步确定了预警指标。HE等<sup>[10]</sup>建立了动载应力集中系数以定量评价矿震对煤岩体的动载扰动程度。田向辉等<sup>[11]</sup>分析了某冲击地压频发工作面的微震能量、频次变化特征,并建立了一种定量-趋势冲击危险预警方法,有效提高了预警效能。李宏艳等<sup>[12]</sup>基于统计损伤力学原理建立了以响应能量异常系数和无响应时间异常系数为指标的冲击危险性动态评价技术,可实现对现场冲击危险的实时连续评价。然而,由于煤矿井下条件复杂,采掘扰动、顶板破断、断层滑动等均会对煤岩体造成动载扰动,如何科学评估震动波扰动下的冲击危险程度是预测预警方面亟需开展的工作。

震动波扰动会使煤岩体内部裂隙发育扩展,造成煤岩体损伤劣化,整体强度降低;另一方面震动波携

带的能量会在煤岩体内部产生集聚,使得煤岩体内部聚集大量弹性能,两者均会导致冲击危险性迅速升高。震动波对煤岩体的损伤研究方面,周朝等<sup>[13]</sup>提出了一种微震损伤效应的围岩稳定性分析方法,可有效反应施工扰动和地质构造活化的微震信息。刘书贤等<sup>[14]</sup>量化分析了采动区域开采变形和地震对建筑物的损害程度。李铁等<sup>[15]</sup>提出了一种基于采动顶、底板岩层损伤的冲击地压预测方法。震动波的扰动研究方面,曹安业等<sup>[16]</sup>研究得出矿震动载作用于煤岩体,造成煤岩体能量标量叠加和应力矢量叠加,使得煤岩系统“差能”增加,当满足冲击地压发生条件时可诱发冲击。王桂峰等<sup>[17]</sup>构建了微震累积能量密度指标并用于冲击危险性预测。上述研究主要针对震动对煤岩体的损伤或者扰动效应单方面进行研究,未考虑两者的叠加效应,并且未考虑震动波能量衰减效应造成的影响。因而亟待提出一种基于震动波能量衰减特性,并综合考虑震动对煤岩体的损伤以及动载扰动的冲击危险预测方法及指标。

笔者以甘肃某矿冲击地压频发工作面为背景,统计分析了工作面回采期间冲击明显显现位置和冲击震源的分布特征;在统计了工作面不同震源能级的能量衰减系数的基础上,理论分析了影响震动波能量衰减的因素,特别讨论了震源能量、震源半径、受载点距震源的距离以及能量衰减系数对能量衰减的影响。在考虑震动波能量衰减的基础上,分别构建了基于震动波损伤作用的静载强度指标和动载强度指标,将两者结合并赋予不同权重,提出一种基于震动波能量衰减特性的危险性预测方法及指标,并进行了方法应用及验证。

## 1 工程实例背景

### 1.1 250106-1 工作面概况

甘肃某矿主采煤层为5煤层,煤层厚度为17.58~48.01 m,平均厚度37.51 m,煤层具有强冲击倾向性,顶、底板分别具有弱冲击倾向性。采用分层综采放顶煤采煤法开采,共分上、中、下3个分层。

250106-1 工作面为5煤层上分层工作面,平均开采厚度为12.9 m,煤层平均倾角7°。工作面布置如图1所示,综合柱状图如图2所示。

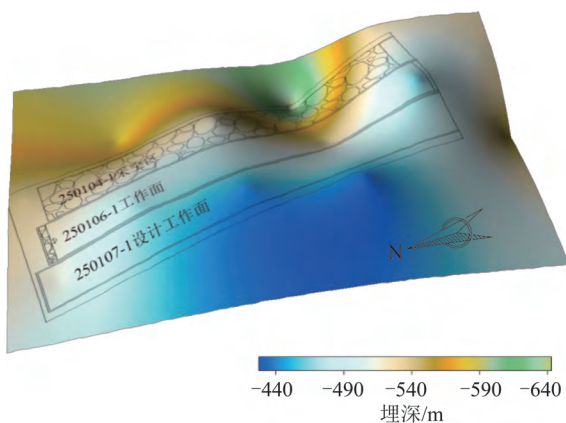


图1 250106-1 工作面布置

Fig.1 Longwall face layout of Longwall 50106-1

厚度/m	柱状	岩性
11.19		粉砂岩
4.19		粗砂岩
10.45		粉砂岩
1.08		石英砂岩
5.24		粉砂岩
5.84		含砾粗砂岩
5.47		粉砂岩
3.55		炭质泥岩、泥岩
42.05		5煤
1.60		含砾细砂岩
0.80		泥岩
2.65		泥质粉砂岩
0.84		粉砂岩
3.82		粗砂岩

图2 250106-1 工作面综合柱状

Fig.2 Synthesis column around Longwall 250106-1

该矿已安装 SOS 微震系统用于冲击危险的监测与预警,250106-1 工作面回采期间(2016 年 7 月—2018 年 7 月)监测到的大量微震数据可为后续分析提供基础。

### 1.2 冲击显现概况

250106-1 工作面自 2016 年 7 月—2017 年 11 月期间发生 24 起冲击事件,造成工作面两回采巷道不同程度损坏,冲击震源定位如图 3 所示。

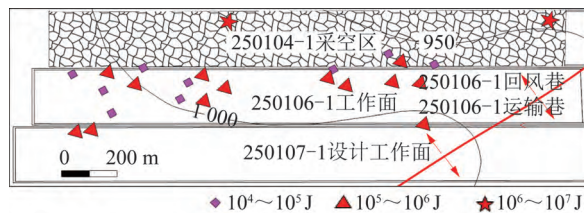


图3 250106-1 工作面回采期间冲击震源定位

Fig.3 Location of coal burst sources during retreat of Longwall 250106-1

如图 4 所示,250106-1 工作面冲击显现形式以底臃为主,底臃量可达 0.1~1.0 m;部分区域伴随顶板冒落或两帮移近、锚杆失效等现象,顶板下沉量 0.15~0.20 m,两帮移近量 0.2~0.7 m。工作面开采初期破坏程度较为严重,严重时可能造成巷道整体发生收缩。

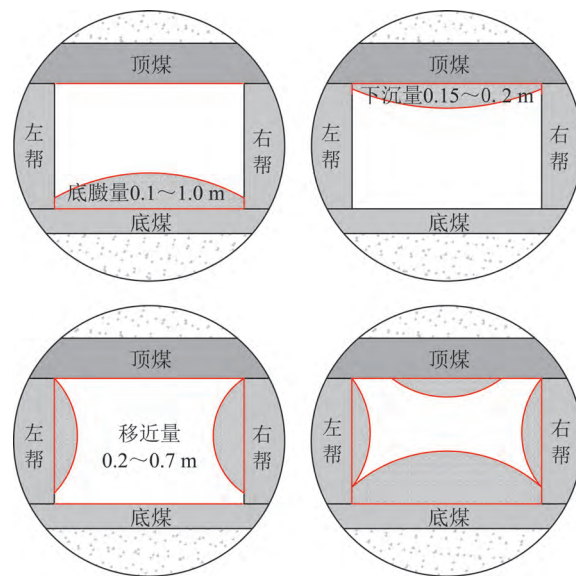


图4 工作面典型冲击显现特征素描

Fig.4 Sketch of typical impact characteristics of Longwall 250106-1

统计了冲击明显显现位置距工作面的距离如图 5 所示。由图 5 可知,24 起冲击事件中有 20 起发生于临空侧(回风巷),此外同样有 20 起事件发生于工作面超前 300 m 范围内,说明工作面超前 300 m 内为冲击发生的高风险区域,并且临空侧回采巷道的冲击地压发生概率显著高于实体煤侧。

由图 6(a)可知,冲击震源能量介于  $10^4 \sim 10^7$  J,其中能量  $10^4 \sim 10^6$  J 的事件有 22 起(91.22%),能量

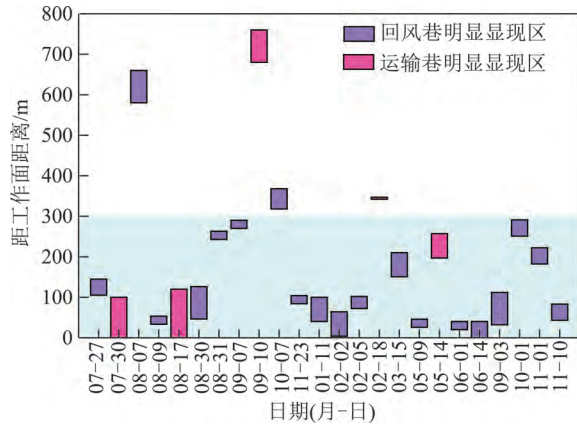


图5 24起冲击事件明显显现范围统计

Fig.5 Statistics of the apparent occurrence range of 24 coal burst incidents

$10^6 \sim 10^7$  J 的事件有 2 起,因此当震源能量大于  $10^4$  J 时便存在诱发冲击的可能。由图 6(b)可知,冲击震源中 23 个震源距明显显现区的距离小于 300 m,说明当震源距离巷道小于 300 m 时诱发冲击的概率迅速升高。

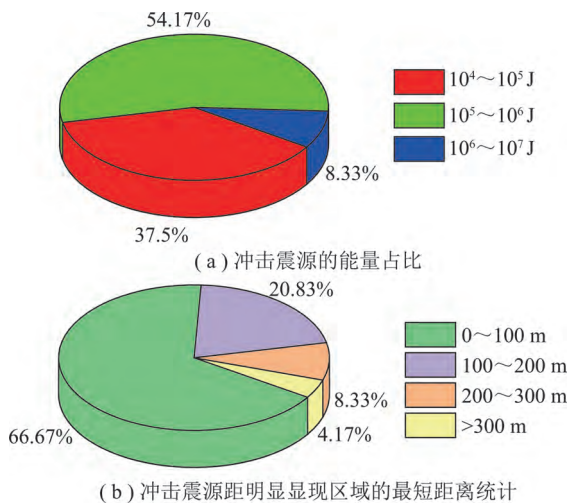


图6 冲击震源的能量及距离显现区域的最短距离统计

Fig.6 Energy of coal burst sources and the shortest distance statistics from the occurrence area

不难发现,巷道冲击的可能性与震源能量和距震源的最短距离密切相关,当震源能量越大,距离巷道距离越短时诱发冲击的可能性也越大。

## 2 震动波能量衰减规律

### 2.1 震动波能量衰减的理论模型

采掘过程中顶板的破断失稳、断层滑移等会产生矿震并向外辐射震动波,其震源破裂尺度往往较大,例如震源能量为  $10^6$  J 的矿震破裂尺度可达上百米<sup>[18]</sup>,震源的破裂尺度范围内、外煤岩体变形差异巨

大,甚至有学者提出震源破裂尺度范围内煤岩体产生永久非弹性变形,而破裂尺度范围外仅为弹性变形<sup>[19]</sup>,意味着例如如图 5 中统计的冲击事件,冲击震源对不同距离的巷道或者煤岩体的作用是显著不同的。

此外,由于震动波的几何和固有衰减,震源能量由  $j$  点传播到  $i$  点的残余能量<sup>[8,18]</sup>可表达为

$$E_{ij} = E_j R_{ij}^{-1} e^{-\eta R_{ij}} \quad (1)$$

式中,  $E_{ij}$  为受载点的残余能量;  $E_j$  为微震事件在  $j$  点的能量;  $R_{ij}$  为  $i$  点和  $j$  点间的空间距离;  $\eta$  为能量衰减系数。

为体现震源破裂尺度内外震动效应的差异,将震源假设为半径为  $r_0$  的震源球,假设震动波能量在球体内不变,能量从球面开始衰减,则震源能量的衰减过程可表述为

$$\begin{cases} E_{ij} = E_j & (R_{ij} \leq r_0) \\ E_{ij} = E_j r_0^{-2} R_{ij}^{-2} e^{-\eta(R_{ij}-r_0)} & (R_{ij} > r_0) \end{cases} \quad (2)$$

$$r_0 = \sqrt[3]{\frac{3V_A}{4\pi}}, V_A = \frac{M_0^2}{2GE_j}$$

其中,  $r_0$  为震源的视半径<sup>[20]</sup>;  $V_A$  为震源的视体积;  $M_0$  为震源的地震矩;  $G$  为震源区域的剪切模量。估算震源半径的典型模型有 Brune 模型<sup>[21]</sup>、Madariaga 模型<sup>[22]</sup>、拉伸破裂模型<sup>[23]</sup>以及视半径模型等,但是前 3 者多基于一定的震源破裂机制的假设,在煤矿中适用性较差,而视半径为震源发震时期内煤岩体塑性变形的标量估计,与描述震源强度的地震矩和震源能量相关,与震源破裂机制、震源模型无关,可对震源破裂半径(扰动范围)进行较好的估计,因此本文选择视半径估算震源半径。从式(2)中不难发现,影响震动波能量衰减的因素主要有能量衰减系数、震源能量、半径以及受载点距震源的距离。

### 2.2 不同能级震源的能量衰减系数特征

在波前几何扩散和介质的阻尼作用下,震动波传播过程中质点的质点峰值速度( $v_p$ )与能量均会发生衰减,可描述<sup>[18]</sup>为

$$\begin{cases} v_{p_{ij}} = v_{pj} R_{ij}^{-1} e^{-\beta R_{ij}} \\ E_{ij} = E_j R_{ij}^{-2} e^{-\eta R_{ij}} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $v_{p_{ij}}$  为受载点的质点峰值速度;  $v_{pj}$  为震源处的质点峰值速度;  $\beta$  为振幅衰减系数; 质点处的震动速度和动能满足关系<sup>[24]</sup>:

$$E_j = \frac{1}{2} m A_j^2 \quad (4)$$

式中,  $E_j$  为质点  $j$  的能量;  $m$  为质点  $j$  介质的单位质量;  $A_j$  为质点  $j$  的质点峰值速度。

联立式(2)~(4),可得

$$\begin{cases} E_{ij} = E_j & (R_{ij} \leq r_0) \\ E_{ij} = E_j r_0^{-2} R_{ij}^{-2} e^{-\eta(R_{ij}-r_0)} & (R_{ij} > r_0) \\ v_{p_{ij}} = v_{p_j} R_{ij}^{-1} e^{-\beta R_{ij}} & (R_{ij} > r_0), \eta = 2\beta \end{cases} \quad (5)$$

该矿 SOS 微震系统使用速度型微震探头, 仅可捕捉到探头布置点的速度波形, 通过拟合距震源不同距离探头的  $v_p$  可拟合出振幅衰减系数  $\beta$ <sup>[25]</sup>, 以 250106-1 工作面回采期间监测到的一起微震事件为例进行说明该拟合过程(图 7)。

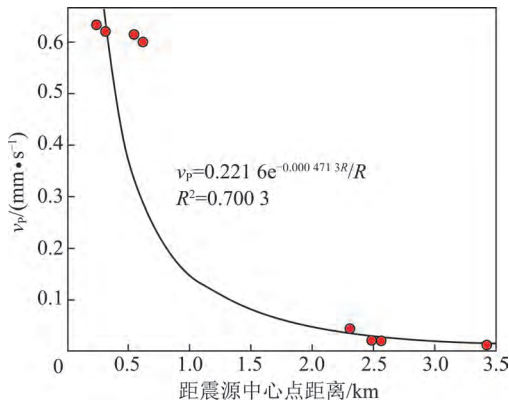


图 7  $v_p$  传播衰减特征拟合曲线

Fig.7 Fitting curve of  $v_p$  propagation attenuation characteristic

如图 7 为  $v_p$  衰减拟合曲线, 由图 7 可知该次事件的衰减系数  $\beta = 0.000 471 3$ , 则能量衰减系数  $\eta = 2\beta = 0.000 942 6$ 。

图 8 为 250106-1 工作面 2016 年 7 月—2017 年 11 月共 11 578 次微震事件的  $v_p$  衰减系数拟合结果。由图 8 可知能级为  $10^2 \sim 10^3$  J 时衰减系数最大, 为  $6.983 9 \times 10^{-4}$ ; 能级为  $10^6 \sim 10^7$  J 时衰减系数最小, 为  $2.785 7 \times 10^{-4}$ ; 随震源能级不断增大, 衰减系数持续减小, 但是减小的幅度越来越小, 并趋于平缓。

根据能量衰减系数  $\eta$  和  $v_p$  衰减系数  $\beta$  的换算关系, 可得不同能级微震事件的能量衰减系数见表 1。

### 2.3 震动波能量对不同因素的衰减响应规律

从冲击地压与煤岩体震动的关系来看, 诱发冲击

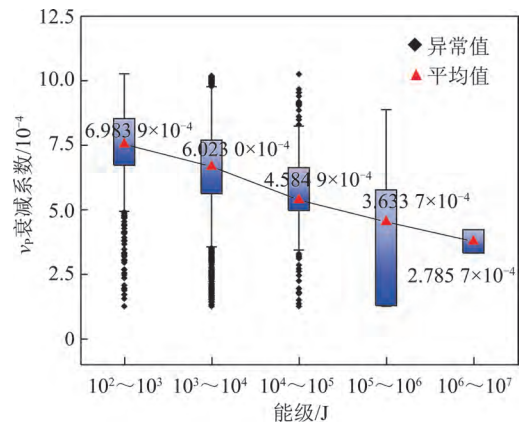


图 8 250106-1 工作面不同能级的  $v_p$  衰减系数拟合结果

Fig.8 Fitting results of  $v_p$  attenuation coefficient for different energy levels of Longwall 250106-1

表 1 250106-1 工作面不同能级的能量衰减系数

Table 1 Energy attenuation coefficient of different energy levels at Longwall 250106-1

能级/J	能量衰减系数
$10^2 \sim 10^3$	$1.396 8 \times 10^{-3}$
$10^3 \sim 10^4$	$1.204 6 \times 10^{-3}$
$10^4 \sim 10^5$	$9.169 8 \times 10^{-4}$
$10^5 \sim 10^6$	$7.267 4 \times 10^{-4}$
$10^6 \sim 10^7$	$5.571 4 \times 10^{-4}$

地压的最低能量为  $1 \times 10^4$  J<sup>[26]</sup>。但是如何准确理解诱发冲击地压的最低能量却是一个问题, 对一个震源能量为  $1 \times 10^4$  J 的微震事件来说, 其震源能量为  $1 \times 10^4$  J, 但是其传播过程中的衰减导致震动波残余能量(即真正作用于煤岩体的能量)急剧减少, 如图 9(a)中④号曲线所示, 其震源能量为  $10^4$  J, 当传播 100 m 时, 残余能量约为 100 J; 当传播 400 m 时, 残余能量约为 10 J, 此时仅凭 10 J 的震动能量是难以诱发冲击的, 对图 9(a)中其余情况的分析也可得到类似的结论; 同时从图 9(a)中不难发现震动波传播相同

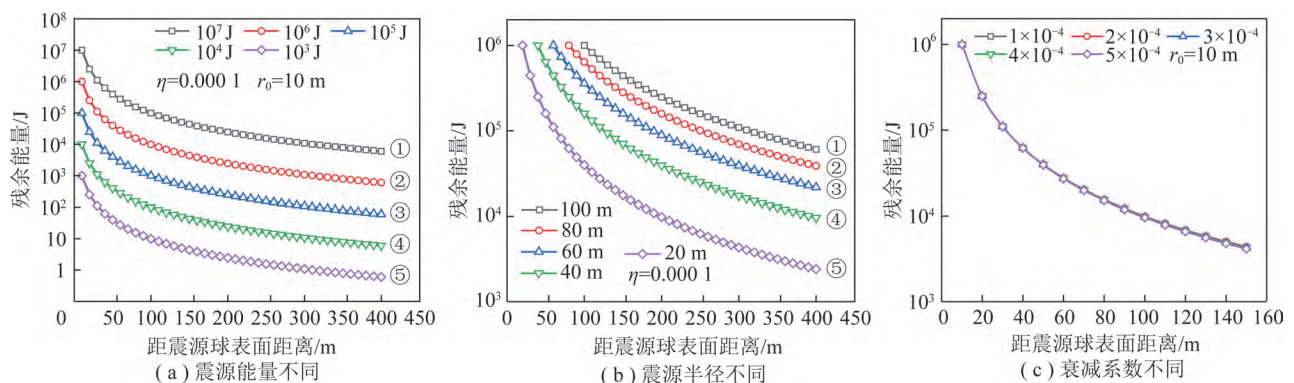


图 9 不同因素对震动波能量衰减的影响

Fig.9 Effect of different factors on the energy attenuation of shock wave

距离时,震源能量越大,则残余能量也越大。因此,涉及从能量角度解释冲击地压的相关问题时,不应单考虑震源能量,应从震动波传播的能量衰减效应入手,重点考量衰减后的残余能量对煤岩体的影响。

如图 9(b) 所示,当震源能量、能量衰减系数相同,震源半径不同时,其能量衰减差异仍较大。当震源半径为 20, 40 m 时,以残余能量  $1 \times 10^4$  J 为界限,其具有冲击地压风险的最大距离分别为 200, 400 m 左右;当震源半径为 60, 80 或 100 m 时,传播距离为 400 m 时,残余能量仍远大于  $1 \times 10^4$  J。说明震源半径越大,震动波能量衰减也越慢,易诱发煤岩体发生冲击的范围也越广。

如图 9(c) 所示,当震源能量、震源半径相同,能量衰减系数不同时,其能量衰减差异较小。结合表 1 中不同能级的能量衰减系数统计结果可发现,不同能级的微震事件传播过程中衰减系数差异较小,究其原因,能量衰减系数主要与震动波的固有衰减有关,即主要与震动波频率、波速与耗散品质因子等相关<sup>[27]</sup>,而煤矿井下不同能级的微震事件传播环境类似,因此衰减系数的差异较小,进而导致其对能量衰减的影响较弱。

综上所述:① 微震事件能否诱发冲击与震源能量、震源半径以及距离震源的距离密切相关,而不同能级微震事件的衰减系数差异对其影响较小。② 震动波的残余能量随震源能量、震源半径的增加而增加,诱发冲击的有效范围相应增加,冲击危险性升高。③ 受震动波固有性质以及井下传播环境的影响,不同能级微震事件的能量衰减系数差异不明显,但利用能量衰减效应进行冲击地压的监测预警时,为进一步提高监测预警的准确率,则必须考虑该差异性。

### 3 基于震动波能量衰减特性的冲击危险预测指标构建

#### 3.1 基于震动波损伤效应的静载强度指标

震动波作用导致煤岩体原有缺陷进一步劣化<sup>[13]</sup>,造成煤岩体强度降低。根据连续介质损伤力学<sup>[28]</sup>,损伤条件下的煤岩体全应力应变曲线如图 10 所示,表达式为

$$\sigma = E\varepsilon(1 - D_s) \quad (6)$$

式中, $\sigma$  为煤岩体所受应力; $E$  为弹性模量; $\varepsilon$  为应变; $D_s$  为损伤参量。

矿井尺度下运用式(6)描述煤岩体的应力状态时,如何定量表述煤岩体的应变,以及损伤参量  $D_s$  的构建是关键。BENIOFF<sup>[3]</sup> 研究发现地震的弹性应变增量与其能量平方根(即 Benioff 应变)成正比,并且可线性叠加,因此震动波作用下煤岩体产生的累积应

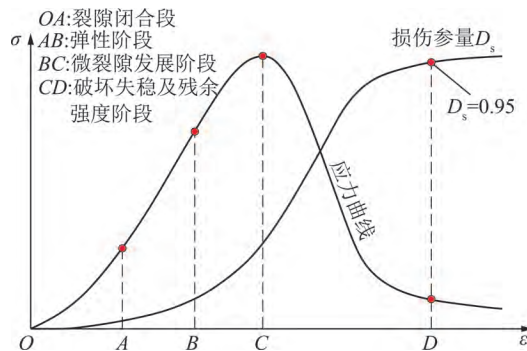


图 10 煤岩体受载过程中全应力应变及损伤参量变化  
Fig.10 Variation diagram of total stress-strain and damage parameters of coal and rock mass under loading

变可采用能量的平方根之和来近似估计。

如图 11 所示,将研究区域划分成若干网格,假设在研究时间段内共发生  $N$  次微震事件,可根据式(2)计算出单个震源对所有网格节点(即受载点)的残余能量,依次对每个震源进行计算可得出受载点  $i$  在  $N$  次微震事件累积作用下的 Benioff 应变。

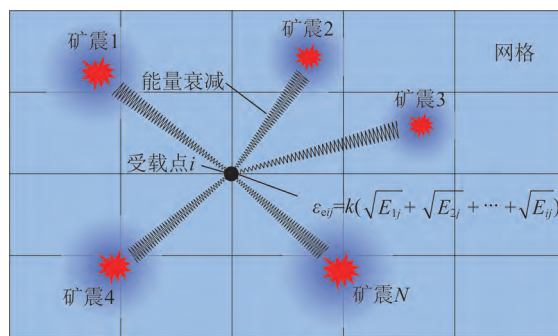


图 11 任一受载点  $i$  的累积 Benioff 应变计算示意

Fig.11 Calculation of cumulative Benioff strain for any load point  $i$

据此,可通过 Benioff 应变来估算煤岩体产生的应变以及构建损伤参量  $D_s$ <sup>[28]</sup>:

$$\begin{cases} \varepsilon_{eij} = \sum_{i=1}^N k \sqrt{E_{ij}} \\ D_s = 1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon_{eij}}{\varepsilon_f}\right) \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\varepsilon_{eij}$  为受载点  $i$  的累积 Benioff 应变; $k$  为比例系数; $N$  为微震次数;临界应变  $\varepsilon_f$  的计算公式为

$$\varepsilon_f = -\frac{\varepsilon_{ef}}{\ln(1 - D_F)} \quad (8)$$

式中, $\varepsilon_{ef}$  为研究区域内  $\varepsilon_{eij}$  的最大值; $D_F$  为临界损伤值,对应于煤岩体完全损伤状态<sup>[7]</sup>, $D_F = 0.95$ 。

联立式(6)~(8),可得基于震动波损伤效应的静载应力表达式:

$$\sigma_{si} = E\varepsilon \exp\left(-\frac{\varepsilon_{eij}}{\varepsilon_f}\right) \quad (9)$$

由于研究区域内不同位置的应力水平可能相差较大,即不同节点的应力数值相差较大,绘制云图时降低可视化效果,因而为增强计算结果的可视化程度,对 $\sigma_{si}$ 进行归一化处理,得到基于震动波损伤效应的静载强度指标:

$$\phi_{si} = \frac{\sigma_{si} - \sigma_{s \min}}{\sigma_{s \max} - \sigma_{s \min}} \quad (10)$$

式中, $\sigma_{s \max}$ 和 $\sigma_{s \min}$ 分别为研究区域内 $\sigma_{si}$ 的最大和最小值。

### 3.2 描述弹性能集聚程度的动载强度指标

煤岩体应力调整和破裂伴随弹性能的聚散并向外辐射震动波,可被微震系统捕捉为微震事件。据此,前人利用微震事件的异常集聚来判断冲击危险性,但缺点是该类图像便于主观判断,无法定量分析。因而本文通过构建能量集聚指数来定量描述煤岩体的弹性能集聚程度:

$$\sigma_{di} = \sum_{j=1}^{N_m} E_{ij} \quad (11)$$

其中, $\sigma_{di}$ 为研究区域内某一受载点*i*的能量集聚指数; $N_m$ 为研究区域一定时间内的微震事件总数; $E_{ij}$ 为根据式(2)计算所得的受载点*i*的残余能量。同样为增强可视化效果,对 $\sigma_{di}$ 归一化后得到受载点*i*的动载强度指标 $\phi_{di}$ 为

$$\phi_{di} = \frac{\sigma_{di} - \sigma_{d \min}}{\sigma_{d \max} - \sigma_{d \min}} \quad (12)$$

式中, $\sigma_{d \max}$ 和 $\sigma_{d \min}$ 分别为研究区域内 $\sigma_{di}$ 的最大和最小值。

### 3.3 综合预测指标的构建及计算流程

根据冲击地压发生的动静载叠加原理<sup>[26]</sup>,冲击地压发生时满足条件:

$$\sigma_j + \sigma_d \geq \sigma_{\min} \quad (13)$$

式中, $\sigma_j$ 和 $\sigma_d$ 分别为静载和动载应力; $\sigma_{\min}$ 为冲击地压发生临界应力。

据此,应从静载和动载2方面对冲击危险进行评价,因而本文采用静载强度指标 $\phi_s$ 衡量煤岩体的静载集中程度,采用动载强度指标 $\phi_d$ 衡量煤岩体的动载扰动强度,进一步建立动静载危险指标叠加的综合预测指标 $\phi_{sd}$ ,受载点*i*的综合预测指标 $\phi_{sdi}$ 可表示为

$$\phi_{sdi} = w_1 \phi_s + w_2 \phi_d = w_1 \frac{\sigma_{si} - \sigma_{s \min}}{\sigma_{s \max} - \sigma_{s \min}} + w_2 \frac{\sigma_{di} - \sigma_{d \min}}{\sigma_{d \max} - \sigma_{d \min}} \quad (14)$$

其中, $w_1, w_2$ 分别为静载和动载强度指标的权重因子,取值范围为0~1。为使预测的结果更贴合实际,此处采用标准离差法确定权重,计算公式为

$$w_1 = \frac{s_{td}(\phi_{si})}{s_{td}(\phi_{si}) + s_{td}(\phi_{di})}, w_2 = \frac{s_{td}(\phi_{di})}{s_{td}(\phi_{si}) + s_{td}(\phi_{di})} \quad (15)$$

其中, $s_{td}(\phi_s), s_{td}(\phi_d)$ 分别为研究区域内 $\phi_{si}$ 和 $\phi_{di}$ 的标准差。表2为 $\phi_s, \phi_d$ 与 $\phi_{sd}$ 冲击危险性的对应关系。本方法的计算流程如图12所示。

表2  $\phi_s, \phi_d, \phi_{sd}$ 与冲击危险性的对应关系

Table 2 Corresponding relationship between  $\phi_s, \phi_d, \phi_{sd}$  and impact risk

$\phi_s, \phi_d, \phi_{sd}$	冲击危险等级
$0 < \phi \leq 0.25$	无危险
$0.25 < \phi \leq 0.50$	弱冲击危险
$0.50 < \phi \leq 0.75$	中等冲击危险
$0.75 < \phi \leq 1$	强冲击危险

注:表中 $\phi$ 为 $\phi_s, \phi_d, \phi_{sd}$ 其中的任意一个。

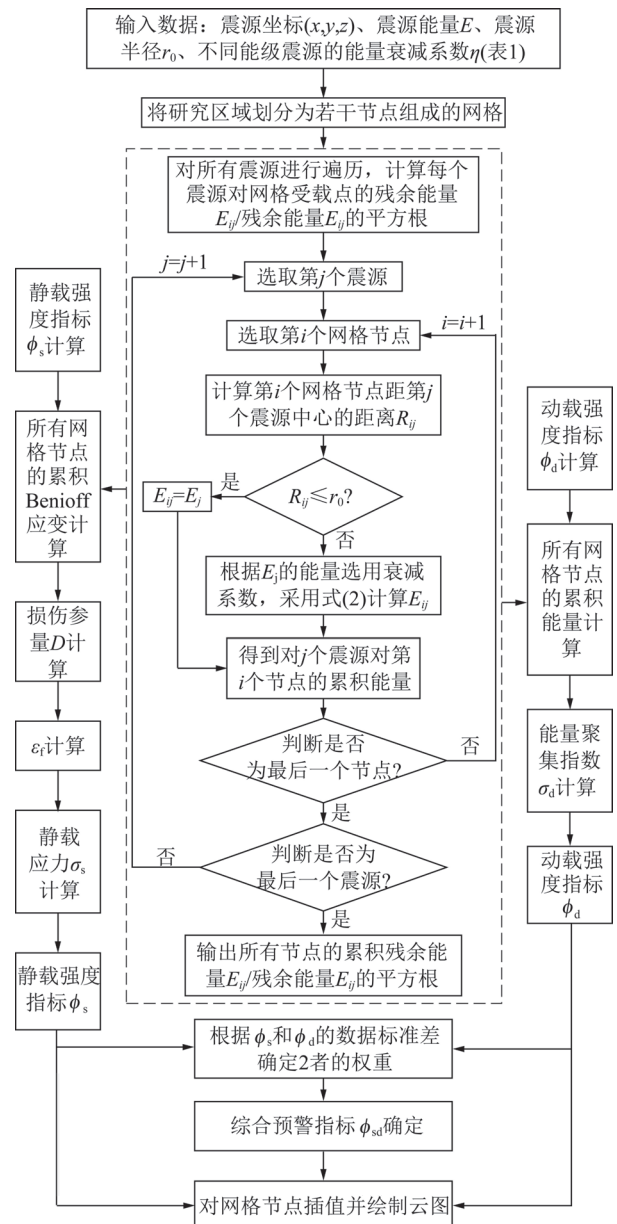


图12 基于震动波能量衰减特性的冲击危险预测方法计算流程  
Fig.12 Calculation flow chart of coal burst prediction method based on energy attenuation characteristics of shock waves

#### 4 方法验证和实践

受篇幅所限,选取 2016-08-30 发生的一起较为严重的冲击事件(巷道破坏长度可达 80 m,后文记为“8·30”冲击事件,“8·30”冲击明显显现区域记为显现区域)进行方法验证。如图 13 所示,冲击发生前微震日频次和日总能量均有明显上升趋势,并且频繁发生大能量事件,表明工作面冲击危险性急剧升高。

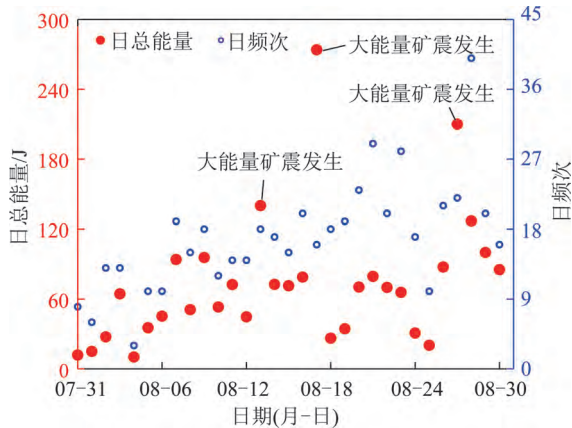


图 13 “8·30”冲击事件发生前微震变化情况

Fig.13 Changes of seismicity before the “8·30” coal burst

以 10 d 为时间窗,统计了“8·30”冲击事件发生前 250106-1 工作面的微震分布情况。如图 14(a)所示,受开切眼外错影响,工作面外错区域采空区覆岩活动剧烈,大能量事件(震源能量  $\geq 10^4$  J)频发。同时受 250104-1 采空区侧向支承压力和本工作面超前支承压力的影响,小能量事件(震源能量  $< 10^4$  J)多向工作面前方以及临空侧回采巷道集聚,表明临空侧回采巷道冲击危险性较高。

如图 14(b)所示,当工作面继续向前推进,受开切眼外错以及采空区悬顶范围增加影响,采空区顶板活动更为剧烈,大能量事件有向工作面中部以及临空侧回采巷道转移的趋势,同时小能量事件仍在临空侧回采巷道集聚较为明显,表明工作面临空侧回采巷道冲击危险性进一步升高。

图 14(c)为“8·30”冲击发生前微震定位图,由图 14(c)可知冲击发生前微震活动范围缩小,并明显向工作面周围集聚,尤其在显现区域附近大能量事件集中明显,同时震源能量  $0 \sim 10^3$  J 的微震事件也向该区域集聚,说明该区域冲击危险性较高,但是存在多个微震异常聚集区域,凭借微震聚集情况仅能主观判断冲击危险区域,无法准确预测冲击危险区域及危险程度。

为评价  $\phi_s, \phi_d$  以及  $\phi_{sd}$  指标预测大能量事件与显

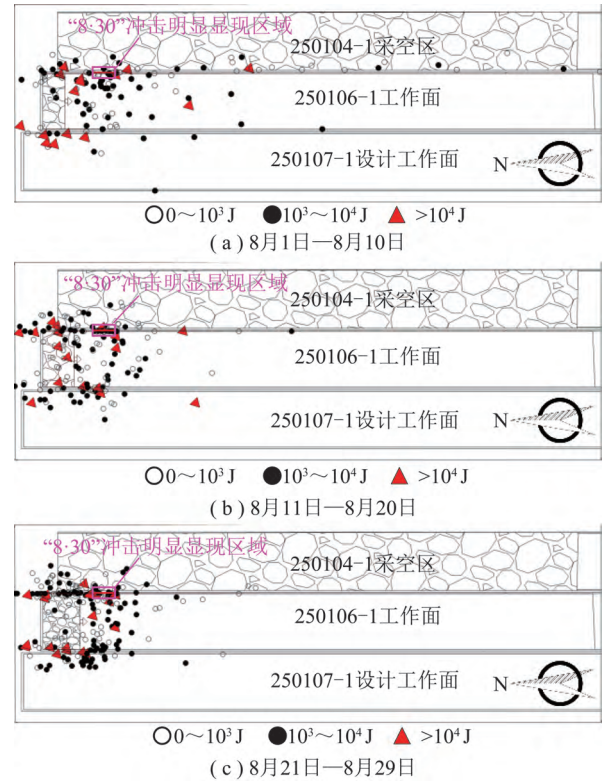


图 14 250106-1 工作面微震分布

Fig.14 Microseismic distribution of Longwall 250106-1

现区域的效果,后文在计算了  $\phi_s, \phi_d$  以及  $\phi_{sd}$  分布云图的基础上,采用未来 10 d 内的大能量事件位置以及显现区域与预测的冲击危险区域的重合情况进行验证。

需要注意的是,在计算  $\phi_s, \phi_d$  以及  $\phi_{sd}$  时,需选用合理的时间窗以便有足够的保证计算效果。“8·30”冲击发生前 250106-1 工作面微震日频次平均为 25 个(图 13),经笔者多次尝试并充分考虑  $\phi_s, \phi_d$  的物理含义,分别采用 10, 3 d 为时间窗可满足对  $\phi_s, \phi_d$  的反演效果。例如图 15(a)和图 16(a)中“8月 11 日”的云图,分别是以 8 月 1 日—8 月 10 日和 8 月 8 日—8 月 10 日期间的微震数据计算所得;其中大能量事件定位为 8 月 11 日—8 月 20 日的定位数据所得。

图 15 为“8·30”冲击发生前一个月内的  $\phi_s$  的分布云图与微震定位。由图 15 可知随工作面推进位置不同,工作面静载集中水平变化较大,其中工作面初采阶段(8 月 11 日)应力集中范围主要位于采空区后方以及实体煤回采巷道一侧;当工作面继续向前推进,工作面静载应力有向临空侧回采巷道转移的趋势(图 15(b)),尤其后续显现区域附近也出现了一定程度的应力集中;当工作面继续向前推进直至发生冲击前一天,工作面应力集中范围进一步发生转移,



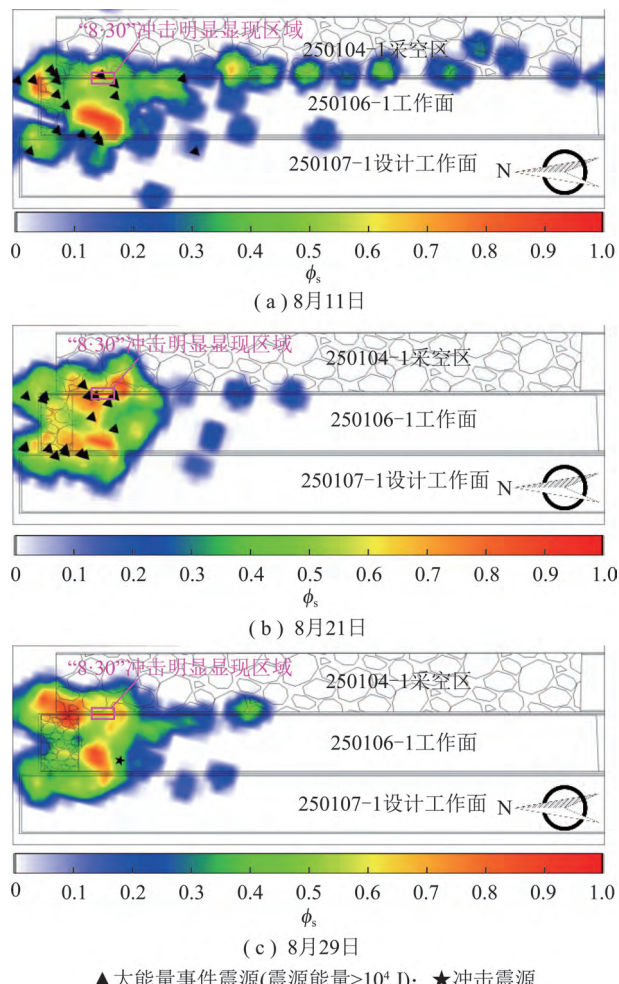


图15 250106-1工作面  $\phi_s$  分布云图与微震定位

Fig.15  $\phi_s$  and seismic events distribution of LW250106-1

应力集中程度最高的区域位于临空侧工作面端头附近;同时显现区域附近仍处于应力集中区域内,具有中等冲击危险性。

从图15中大能量事件、显现区域与 $\phi_s$ 预测的中等以上冲击危险区域的重合程度来看:①大能量事件与中等以上冲击危险区重合度较差,说明 $\phi_s$ 对大能量事件的预测效果较差;②显现区域与中等冲击危险区重合度较高,说明 $\phi_s$ 对显现区域预测效果较好。

图16为“8·30”冲击发生前一个月内 $\phi_d$ 的分布云图与微震定位。由图16发现:① $\phi_d$ 仅可对部分大能量事件进行预测,说明 $\phi_d$ 对大能量事件的预测效率较低;②工作面前方尤其是临空侧超前区域较大范围预测为强冲击危险,侧面说明显现区域与强冲击以上危险区域重合程度较差,说明 $\phi_d$ 对显现区域的预测效果较差。

图17为对 $\phi_s, \phi_d$ 叠加后的 $\phi_{sd}$ 分布云图与微震定位情况。由图17(a)可知,工作面前方约300 m范

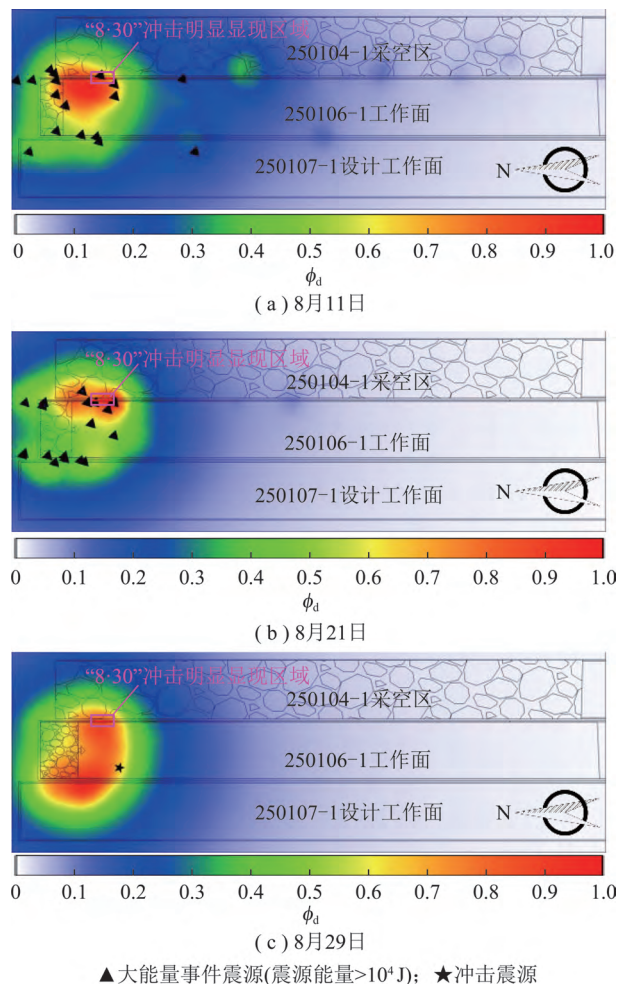


图16 250106-1工作面  $\phi_d$  分布云图与微震定位

Fig.16  $\phi_d$  and seismic events distribution of Longwall 250106-1

围以及采空区临空侧 $\phi_{sd} > 0.5$ ,具有中等冲击危险性,工作面前方中部局部区域 $\phi_{sd}$ 大于0.75,具有强冲击危险性。8月11日—8月20日共发生17起大能量事件,其中有12起位于中等冲击危险区域( $\phi_{sd} > 0.5$ )内, $\phi_{sd}$ 对大能量事件预测准确率为71%。

由图17(b)可知,此时工作面前方 $\phi_{sd}$ 的分布与8月11日相比发生较大变化。 $\phi_{sd}$ 较高的区域由工作面中部向临空侧区域转移,其中显现区域附近 $\phi_{sd}$ 进一步增大,局部超过0.75,具有强冲击危险性。此外,8月21日—8月29日期间19起大能量事件中17起位于中等冲击危险区域( $\phi_{sd} > 0.5$ )内, $\phi_{sd}$ 对大能量事件预测准确率为89%。

由图17(c)可知“8·30”冲击震源和显现位置均位于中等冲击危险区域,其 $\phi_{sd}$ 分别高达0.64和0.67,说明通过 $\phi_{sd}$ 有效预测了该次冲击震源和显现区域。

综上所述:① $\phi_s$ 可对冲击明显显现区域进行预测,而对大能量事件的预测效果较差;② $\phi_d$ 仅可对部分大能量事件进行预测,但预测的危险区域较广,侧

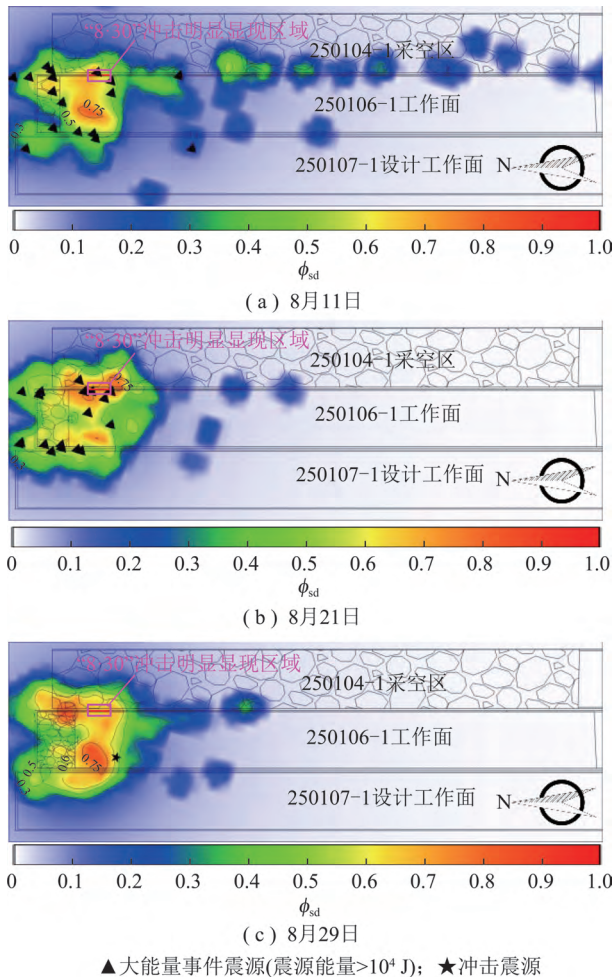


图17 250106-1工作面  $\phi_{sd}$  分布云图与微震定位

Fig.17  $\phi_{sd}$  and seismic events distribution of Longwall 250106-1  
面说明  $\phi_{sd}$  对冲击明显显现区域预测效能较低;③  $\phi_{sd}$  可有效预测大能量事件和冲击明显显现区域,预测效果较好。

## 5 结 论

(1)250106-1 工作面 24 起冲击事件统计结果表明工作面超前 300 m 为冲击发生的高风险区域,临空侧回采巷道的冲击显现概率显著高于实体煤侧。

(2)煤矿井下震源破裂尺度对微震能量的衰减影响较大,分析得出影响能量衰减的主要因素有震源的能量、半径、衰减系数以及距受载点的距离;震源的能量、半径以及距受载点的距离对能量衰减的影响较为明显,而衰减系数的影响相对较小。

(3)充分考虑震动波能量的衰减效应,通过基于震动波损伤作用的静载强度指标  $\phi_s$  来衡量静载应力集中程度,采用描述弹性能集聚程度的指标  $\phi_d$  来衡量动载扰动强度;综合两者构建了基于震动波能量衰减特性的冲击危险预测指标  $\phi_{sd}$ ,并采用标准离差法

量化指标权重。

(4)预测实例表明  $\phi_s$  对冲击显现区域的预测效果较好,而对大能量事件的预测效能较低; $\phi_d$  仅可对部分大能量事件进行预测,同时预测的冲击危险区域较广,侧面说明  $\phi_d$  对冲击显现区域的预测效能较低;对于综合预测指标  $\phi_{sd}$ ,大能量事件位于中等冲击危险区域的概率超过 70%,并且冲击明显显现区域全部位于中等冲击危险区内,说明  $\phi_{sd}$  可有效预测大能量事件位置和冲击显现区域,预测效果较好。

## 参考文献 (References) :

- [1] 魏立科,姜德义,王翀,等. 煤矿冲击地压灾害风险监察智能分析系统关键技术架构研究[J]. 煤炭学报,2021,46(S1):63-73. WEI Like,JIANG Deyi,WANG Chong,et al. Key technology architecture of the intelligent monitoring-analysis system for coal mine rockburst hazard risk supervision[J]. Journal of China Coal Society, 2021,46(S1):63-73.
- [2] 郭文豪,曹安业,温颖远,等. 鄂尔多斯矿区典型厚顶宽煤柱采场冲击地压机理[J]. 采矿与安全工程学报,2021,38(4):720-729. GUO Wenhao,CAO Anye,WEN Yingyuan,et al. Mechanism of rockburst in stopes with typical thick roof and wide coal pillars in Ordos mining area[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021,38(4):720-729.
- [3] BENIOFF H. Crustal strain characteristics derived from earthquake sequences [J]. Transactions-American Geophysical Union, 1951, 32(4):508-514.
- [4] CAO Anye,DOU Linming,WANG Changbin,et al. Microseismic precursory characteristics of rock burst hazard in mining areas near a large residual coal pillar:A case study from Xuzhuang Coal Mine, Xuzhou,China[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2016, 49:4407-4422.
- [5] WESSELOO J. Evaluation of the spatial variation of  $b$ -value [J]. Journal-South African Institute of Mining and Metallurgy, 2014, 114:823-828.
- [6] 陈凡. 煤矿矿震破裂机制及其震源力学参量响应规律研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2019:56-60. CHEN Fan. Failure Mechanism of mining induced tremor and response law of its source mechanics parameters [D]. Xuzhou:China University of Mining & Technology,2019:56-60.
- [7] CAI Wu,DOU Linming,SI Guangyao,et al. A new seismic-based strain energy methodology for coal burst forecasting in underground coal mines [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2019,123:1365-1609.
- [8] 丛利,曹安业,周远宏,等. 基于动静载冲击地压危险叠加的综合预警方法[J]. 采矿与安全工程学报,2020,37(4):767-776. CONG Li,CAO Anye,ZHOU Yuanhang,et al. The comprehensive pre-warning method of rock burst hazard based on theory of dynamic and static combined loading[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2020,37(4):767-776.
- [9] WANG C,CAO A,ZHANG C,et al. A new method to assess coal

- burst risks using dynamic and static loading analysis[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 53(3): 1113-1128.
- [10] HE Jiang, DOU Linming, GONG Siyuan, et al. Rock burst assessment and prediction by dynamic and static stress analysis based on microseismic monitoring [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 93: 46-53.
- [11] 田向辉, 李振雷, 宋大钊, 等. 某冲击地压频发工作面微震冲击前兆信息特征及预警方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(12): 2471-2482.
- TIAN Xianghui, LI Zhenlei, SONG Dazhao, et al. Study on microseismic precursors and early warning methods of rockbursts in a working face [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(12): 2471-2482.
- [12] 李宏艳, 莫云龙, 孙中学, 等. 基于响应能量和无响应时间的冲击危险性动态评价技术[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(9): 2673-2681.
- LI Hongyan, MO Yunlong, SUN Zhongxue, et al. Dynamic evaluation technology of rock burst based on response energy and non-response time [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(9): 2673-2681.
- [13] 周朝, 尹健民, 周春华, 等. 考虑累积微震损伤效应的荒沟电站地下洞室群围岩稳定性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(5): 1011-1022.
- ZHOU Chao, YIN Jianmin, ZHOU Chunhua, et al. Stability analysis of surrounding rock mass of underground caverns at Huanggou hydropower station considering cumulative microseismic damage effect [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(5): 1011-1022.
- [14] 刘书贤, 魏晓刚, 张弛, 等. 煤矿采动与地震耦合作用下建筑物灾变分析[J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(4): 526-534.
- LIU Shuxian, WEI Xiaogang, ZHANG Chi, et al. Catastrophe analysis of buildings caused by the coupling effect of mining subsidence and earthquake [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2013, 42(4): 526-534.
- [15] 李铁, 王维, 谢俊文, 等. 基于采动顶、底板岩层损伤的冲击地压预测[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(12): 2438-2444.
- LI Tie, WANG Wei, XIE Junwen, et al. Rockbursts prediction based on rock damage of roof and floor induced by mining [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(12): 2438-2444.
- [16] 曹安业, 范军, 牟宗龙, 等. 矿震动载对围岩的冲击破坏效应[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(12): 2006-2010.
- CAO Anye, FAN Jun, MOU Zonglong, et al. Burst failure effect of mining-induced tremor on roadway surrounding rock [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(12): 2006-2010.
- [17] 王桂峰, 窦林名, 蔡武, 等. 冲击地压的不稳定能量触发机制研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(1): 190-196.
- WANG Guifeng, DOU Linming, CAI Wu, et al. Unstable energy triggering mechanism of rock burst [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(1): 190-196.
- [18] 曹安业. 采动煤岩冲击破裂的震动效应及其应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009: 101-104.
- CAO Anye. Research on seismic effort of burst and failure of coal-rock mass associated with mining and its application [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2009: 101-104.
- [19] MENDECKI Aleksander J. Mine seismology reference book; Seismic Hazard [M]. Tasmania: Institute of Mine Seismology, 2015.
- [20] CAI M, KAISER P, MARTIN CA. A tensile model for the interpretation of microseismic events near underground openings [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1998, 153: 67-92.
- [21] BRUNE J N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75: 4997-5009.
- [22] MADARIAGA, R. Dynamics of an expanding circular fault [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1976, 66: 639-666.
- [23] CAI M, KAISER P K, MARTIN C D. A tensile model for the interpretation of microseismic events near underground openings [J]. *Pure & Applied Geophysics*, 1998, 153(1): 67-92.
- [24] 窦林名, 曹晋荣, 曹安业, 等. 煤矿矿震类型及震动波传播规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(6): 23-31.
- DOU Linming, CAO Jinrong, CAO Anye, et al. Research on types of coal mine tremor and propagation law of shock waves [J]. *Coal Science And Technology*, 2021, 49(6): 23-31.
- [25] CAI Wu, BAI Xianxi, SI Guangyao, et al. A Monitoring investigation into rock burst mechanism based on the coupled theory of static and dynamic stresses [J]. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 2020, 53: 5451-5471.
- [26] 窦林名, 牟宗龙, 曹安业, 等. 煤矿冲击矿压防治 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [27] WANG Changbin, CAO Anye, ZHANG Chenguo, et al. A new method to assess coal burst risks using dynamic and static loading analysis [J]. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 2020, 53: 1113-1128.
- [28] 蔡武. 断层型冲击矿压的动静载叠加诱发原理及其监测预警研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015: 81-82.
- CAI Wu. Fault rockburst induced by static and dynamic loads superposition and its monitoring and warning [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2015: 81-82.