



移动阅读

何学秋,王安虎,窦林名,等.突出危险煤层微震区域动态监测技术[J].煤炭学报,2018,43(11):3122-3129.doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.1810
HE Xueqiu, WANG Anhu, DOU Linming, et al. Technology of microseismic dynamic monitoring on coal and gas outburst-prone zone [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3122-3129. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.1810

突出危险煤层微震区域动态监测技术

何学秋^{1,2,6}, 王安虎^{1,2}, 窦林名^{3,4}, 宋大钊^{1,2}, 祖自银⁵, 李振雷^{1,2}

(1.北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室,北京 100083; 2.北京科技大学 土木与资源工程学院,北京 100083; 3.中国矿业大学 深部煤炭资源开采教育部重点实验室,江苏 徐州 221116; 4.中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州 221116; 5.贵州盘江精煤股份有限公司,贵州 盘州 553537; 6.中安安全工程研究院,北京 100013)

摘要:为弥补煤与瓦斯突出区域预测方法抽检、定点式指标存在的弊端,实现煤层突出危险性的区域连续监测,提出了突出危险煤层微震区域动态监测新方法,研究了微震监测技术实现区域监测的理论基础,建立了相应指标评价体系,并在突出矿井进行了应用试验。结果表明:利用微震频次指标、能量指标监测煤层采掘扰动、地质异常具有良好效果,利用震动波 CT 探测得出的区域应力场分布特征与理论分布相一致。这验证了微震监测技术实现突出危险煤层区域监测的可行性,为煤与瓦斯突出区域监测方法研究提供了新思路,可突破传统区域预测手段在时、空维度上的局限性,实现突出危险煤层区域动态、连续监测。

关键词:煤与瓦斯突出;微震;区域预测;动态监测

中图分类号:TD713 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2018)11-3122-08

Technology of microseismic dynamic monitoring on coal and gas outburst-prone zone

HE Xueqiu^{1,2,6}, WANG Anhu^{1,2}, DOU Linming^{3,4}, SONG Dazhao^{1,2}, ZU Ziyin⁵, LI Zhenlei^{1,2}

(1.Key Laboratory of Educational Ministry for High Efficient Mining and Safety in Metal Mine, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2.School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3.Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4.School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 5.Guizhou Panjiang Refined Coal Co., Ltd., Panzhou 553537, China; 6.Zhong-an Academy of Safety Engineering, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to address the shortcomings of sampling check or fixed-point indicators of the conventional regional prediction methods and achieve a continuous monitoring of coal seam outburst risk, a new method for a dynamic prediction of microseismic monitoring area in the seams with coal and gas outburst potential is proposed. Accordingly the indicator evaluation system is established and some application tests have been carried out in coal mines. The results show that the microseismic monitoring frequency indicators and energy indicators satisfactorily monitor coal seam mining disturbance and geological abnormal body, and the regional stress field distribution obtained by seismic wave CT detection is consistent with theoretical distribution. This verifies the feasibility of microseismic monitoring technology in the regional monitoring of outburst-prone coal seam. The study breaks the limitations of conventional methods in time and space dimension, and realizes a dynamic and continuous monitoring of coal and gas outburst-prone region.

Key words: coal and gas outburst; microseismic; regional prediction; monitoring and warning

收稿日期:2017-12-21 修回日期:2018-09-12 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801408);国家自然科学基金资助项目(51634001,51774023)

作者简介:何学秋(1961—),男,辽宁辽阳人,教授,博士生导师。E-mail:hxq@ustb.edu.cn

通讯作者:宋大钊(1985—),男,山东邹平人,副教授。E-mail: song.dz@163.com

煤与瓦斯突出是煤炭开采过程中破坏性最强、危害性最大的灾害事故之一^[1]。在煤层开采前,科学准确的预测煤与瓦斯突出区域危险性是提高煤与瓦斯突出灾害防治水平的关键。目前常用的煤与瓦斯突出区域预测方法主要分为瓦斯参数指标预测法^[2-3]、地质预测法^[4]、物探法^[5]和数学物理方法^[6-7]等四大类。以上区域预测方法采用的预测指标多为抽检、定点式指标,在时、空维度上缺乏连续性,难以反映采掘扰动、区域煤岩应力环境特征及煤与瓦斯突出危险动态演化过程。

近年来,微震监测技术^[8-10]在煤岩破裂监测理论研究与应用方面得到迅速发展,已是井下采矿过程中勘探断层、松动圈、隐藏裂隙、应力状态等方面的有力工具。国内外一般将微震分为三大类^[11],其监测尺度、监测震动主频与定位精度具有较大差异。第 1 类是大尺度监测,主要是监测大震级破裂事件,定位精度 500 m 左右,主要用于地震行业的监测;第 2 类是中等尺度监测,主要采用分布式微地震监测系统,监测震动频率一般在 150 Hz 以下,可监测小震级破裂事件,定位精度 30~80 m 左右,此方法已在冲击矿压区域探测与评价方面得到广泛应用;第 3 类是小尺度监测,以监测小范围(如巷道周围)煤岩体破裂为主,监测震动频率在 300 Hz 以上,通常被称为声发射(地音)系统。

在煤与瓦斯突出监测领域,小尺度微震监测如煤岩体破坏前的声发射前兆信息特性研究已经有大量成果发表^[12-13],证实了声发射在突出煤岩体单轴、常规三轴、循环加卸载破坏过程中均有较好反应。中等尺度微震监测在煤与瓦斯突出防治应用方面,龚林名等^[14]在理论上提出动载扰动和静载应力集中是煤与瓦斯突出的两个主要因素,利用微震监测判别煤与瓦斯突出区域危险性是可行的。另外,雷文杰、李绍泉等^[15-16]针对煤与瓦斯突出孕育、激发、发生、残余 4 个阶段的微震时频特征进行了研究。

以上利用微震监测技术区域动态监测煤与瓦斯突出多停留在理论分析、实验室研究阶段,在煤矿进行现场试验应用的不多。笔者提出了煤与瓦斯突出微震区域动态监测新方法,建立了相应指标评价体系,并在突出矿井进行了试验。

1 煤与瓦斯突出微震监测技术

1.1 理论基础

煤与瓦斯突出发生的力源^[17]包括煤岩体的静载应力 σ_1 、采掘扰动诱发的动载应力 σ_2 、煤岩体内瓦斯压力 P 。采掘扰动诱发的动载(主要是矿震)叠加到

临近工作面区域的煤岩体静载上产生组合载荷,当组合载荷超过煤岩体的承载强度 σ_c 时,煤岩体就会发生破坏,进而诱发煤与瓦斯突出灾害的发生。一般可用下式定性表达:

$$\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + P}{\sigma_c} \geq 1 \quad (1)$$

式中 σ_1 为煤岩体静载应力; σ_2 为采掘扰动诱发的动载应力; P 为煤层瓦斯压力; σ_c 为煤岩体承载强度。

以上因素中,采掘扰动对煤与瓦斯突出具有重要影响,直接关系着动载应力的产生及强度特征。其表现主要为爆破、顶底板破断、煤体失稳、煤炮、断层滑移等,这些动载源可统一称为矿震。具体影响可体现在以下 3 方面:

(1) 采掘扰动会破坏煤岩体原有应力平衡状态,煤岩体应力状态重新分布,产生扰动应力 σ_2 ,形成应力增高区;

(2) 受采掘扰动的煤岩体在某一方面的应力或应变得到释放,导致煤岩体产生变形,甚至断裂、破坏,大大降低煤岩体强度,造成 σ_c 降低;

(3) 采掘扰动促进煤层瓦斯的吸附解吸,促使瓦斯向采掘空间涌出,同时采掘扰动会引起煤层瓦斯压力的分布变化。相关研究^[18]认为煤层瓦斯压力与采动应力具有典型耦合效应,且呈正相关性,瓦斯压力峰值位置超前于采动应力。

静载应力集中对煤与瓦斯突出的发生同样具有重要作用。文献[19]也指出,应力在煤与瓦斯突出灾害中起主导控制作用,是煤体破坏的主要动力。

基于以上分析,微震实时监测煤层采掘扰动结合震动波 CT 探测区域应力场分布特征,对煤与瓦斯突出区域危险性探测与评价具有重要意义。图 1 为突出危险煤层微震区域动态监测原理示意(图中 W 为瓦斯含量)。

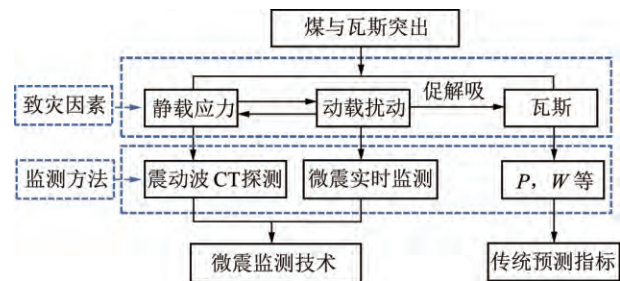


图 1 突出危险煤层微震区域动态监测原理示意

Fig. 1 Schematic diagram of microseismic monitoring in dangerous coal seam

1.2 技术原理

微震实时监测^[20]为在待监测区域的周围布置若干微震拾震传感器,形成分布式微震监测系统,利用

监测到的震动波波形识别每一次破裂的时间、空间及强度信息,即破裂发生时刻、破裂源位置及破裂释放能量大小等。其中破裂源的位置定位主要通过拾震传感器拾取微震活动经煤岩体传播的震动波波形。根据拾震传感器接收到震动波到时 t_i ,在特定模型下,列出震动波走时残差 Δt_i 为

$$\Delta t_i = \frac{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}}{v} - (t_i - t_0) \quad (2)$$

式中 (x_i, y_i, z_i) 为微震台网第 i 个拾震传感器三维坐标; (x_0, y_0, z_0, t_0) 为震动发生的三维坐标和时间; v 为震动波在岩体中的传播速度。

根据 Δt_i 写出目标函数

$$F(x_0, y_0, z_0, t_0) = \sum_{i=1}^n w_i |\Delta t_i|^p \quad (3)$$

式中 w_i 为拾震传感器的距离权重; p 为标准参数,取 1 或 2。

采用寻优算法求解目标函数取得最小值时的 (x_0, y_0, z_0, t_0) ,即可获得震源的位置,通过震动图积分计算,根据震动波在岩体中的能量衰减规律反算震源震动释放能量 E_0 。其中,震动波在岩体中能量衰减变化趋势随传播距离增大呈幂指数关系衰减,其衰减公式为

$$E = E_0 L^{-\eta} \quad (4)$$

式中 L 为拾震传感器与震源的距离; η 为介质衰减指数,大小与传播介质有关。

震动波 CT 探测区域应力场^[21]主要基于煤岩体震动波纵波波速与应力大小具有明显的幂函数关系,煤岩体所受应力越大,纵波传播速度越大。因此,震动波 CT 探测区域应力场分布特征可以通过反演煤岩体内纵波传播速度分布特征实现。具体为:根据拾震传感器与震源的距离 L 和拾震传感器收到的初始到时 T 来反演波速分布 $V(x, y, z)$ (m/s) 或慢度 $S(x, y, z) = 1/V(x, y, z)$ (s/m),假设第 i 个拾震传感器到震源位置的距离为 L_i ,震动波走时为 T_i ,则存在如下关系^[18]:

$$V = L/T, L = VT \quad (5)$$

$$T_i = \int_{L_i} \frac{dL}{v(x, y, z)} = \int_{L_i} S(x, y, z) dL \quad (6)$$

$$T_i = \sum_{j=1}^M d_{ij} S_j \quad (i = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (7)$$

式中 d_{ij} 为第 i 条震动波射线穿过第 j 个网格的长度; N 为射线总数; M 为网格数量。

用矩阵方式表示为

$$T = D \cdot S, S = D^{-1}T \quad (8)$$

式中 T 为震动波走势列向量 ($N \times 1$); S 为慢度列向量 ($M \times 1$); D 为射线长度矩阵 ($N \times M$)。

通常情况式 (8) 是一超定或欠定方程组,需要用迭代算法进行求解。由于迭代算法中 SIRT 算法不会奇异解并能平稳收敛,笔者全部运用 SIRT 算法进行运算。

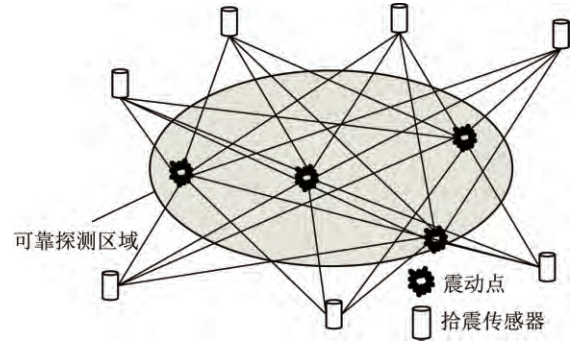


图 2 震动波 CT 探测原理示意

Fig. 2 Detection principle of vibration wave CT

1.3 指标体系

微震监测定位技术主要利用能量指标 E 、频次指标。这两种指标对研究区域微震活动具有普遍实用性,其中能量指标代表了矿震释放的能量大小,是判定采掘扰动事件强度大小的关键指标;频次指标是单位时间内矿震事件多少的统计,可反映矿震事件发生频率的大小。同时频次指标结合矿震事件在空间位置的分布特征可反映震源分布的集中程度。

为探测突出危险煤层区域应力分布特征,以波速平均值为基础,构建纵波波速异常系数 A_n ,表达式为

$$A_n = \frac{v_p - v_p^a}{v_p^a} \quad (9)$$

式中 v_p^a 为模型波速的平均值。

根据式 (9) 容易得出:当 A_n 为正值时,波速正异常变化,应力相对增高;当 A_n 为负值时,波速负异常变化,应力相对降低。表 1 为波速正异常变化与应力集中程度的关系,表 2 为波速负异常变化与应力弱化程度的关系^[20-22]。

表 1 波速正异常变化与应力集中程度的关系

Table 1 Relation between positive anomalies of wavespeed and stress concentration

应力集中特征	波速正异常 A_n /%	应力集中系数
无	< 5	< 0.2
弱	5~15	0.2~0.6
中等	15~25	0.6~1.4
强	>25	>1.4

表 2 波速负异常变化与应力弱化程度的关系

Table 2 Relation between negative anomalies of wave speed and weakening level

弱化特征	波速负异常 $A_n / \%$	应力降低系数
无	0~ -7.5	<0.25
弱	-7.5~-15.0	0.25~0.55
中等	-15~-25	0.55~0.80
强	<-25	>0.80

2 应用实例

2.1 试验地点 11224 工作面概况

试验现场选择在金佳矿 11224 回采工作面, 工作面埋深 100~400 m, 开采 22 号煤层, 其上方有 18₁ 号, 18 号, 17 号, 9 号, 7 号, 3 号等煤层, 下方有 24 号不稳定煤层。煤层相互间层位关系如图 3(b) 所示。该工作面周围无采掘作业工作面。

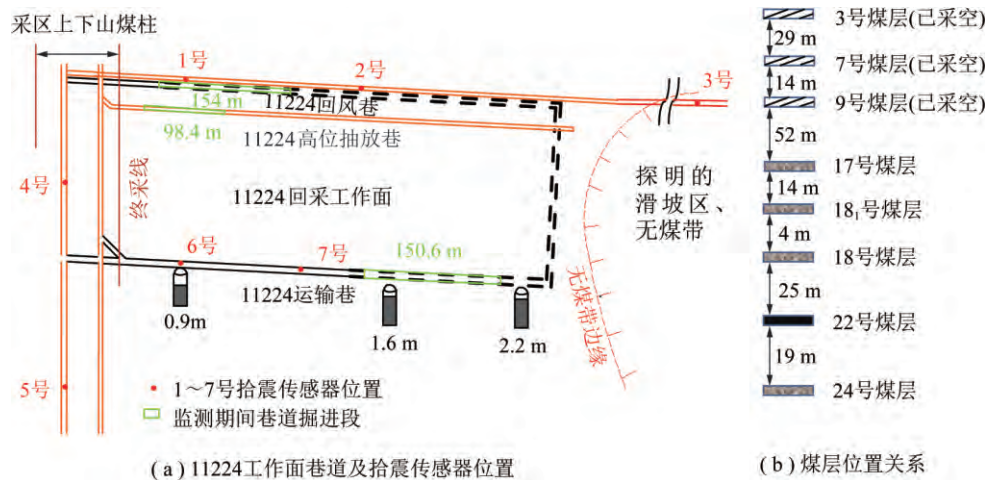


图 3 11224 工作面及周围环境示意

Fig. 3 Sketch of 11224 working face and surrounding environment

11224 工作面所采 22 号煤层平均厚度 1.2 m, 平均原煤瓦斯含量 $10.8 \text{ m}^3/\text{t}$, 煤层坚固性系数 f 值 0.5~0.6。在工作面开切眼外侧是探明的无煤地带, 无煤带边缘距开切眼最近距离约 30 m。根据中国矿业大学煤与瓦斯突出鉴定的结果, 该煤层具有煤与瓦斯突出危险。

为了实现矿井采掘扰动的实时监测及区域应力场探测, 该矿 2017 年 6 月引进安装了波兰矿山研究总院研发的新一代 SOS 微震监测系统。在 6 月 18 日至 10 月 10 日监测期间, 11224 运输巷掘进进尺 150.6 m, 11224 回风巷掘进进尺 154 m, 11224 高位抽放巷掘进进尺 98.4 m。巷道掘进位置及拾震传感器在 11224 工作面周围的布置方案如图 3(a) 所示。SOS 微震监测系统设备组成如图 4 所示。

2.2 微震信号时空分布特征

2.2.1 微震信号空间分布特征

根据以上布置方案, 6 月 18 日至 10 月 31 日在 11224 工作面区域共监测到 868 个微震信号, 其中监测到 10^3 J 以下的微震小能量事件数占比 52.30%, 能量在 $10^3 \sim 10^5 \text{ J}$ 范围内微震事件占比 47.35%, 达到 10^5 J 能量的微震事件仅为 3 次。微震信号空间分布特点如图 5 所示。

由图 5 可见, 微震信号的分布主要集中在 R1~

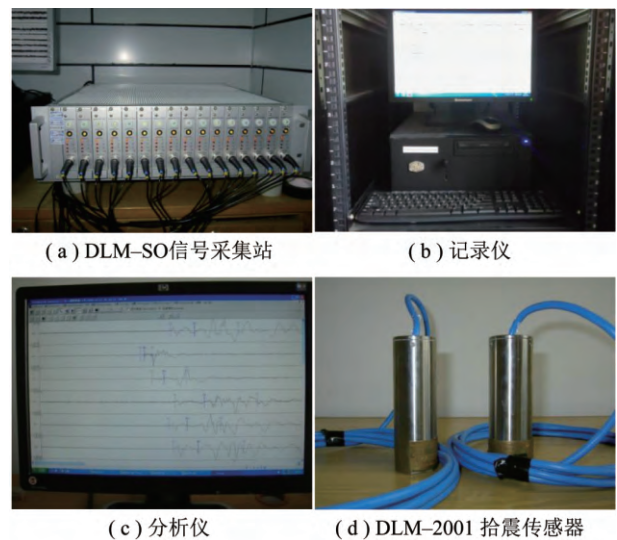


图 4 微震监测系统装备组成

Fig. 4 Consisting equipment of microseismic monitoring system R4 区域。

(1) R1 区域。该区域为采区煤柱集中应力分布区, 该区域的形成主要与采区上下山留设煤柱形成的支撑应力有关。

(2) R2 区域。该区域为 11224 回风巷、高位抽放巷掘进扰动区, 监测到的震动信号多。由于两巷道掘进期间, 震动事件相互影响, 相互叠加。故本次试验仅重点分析了 11224 运输巷掘进期间的微震监测信

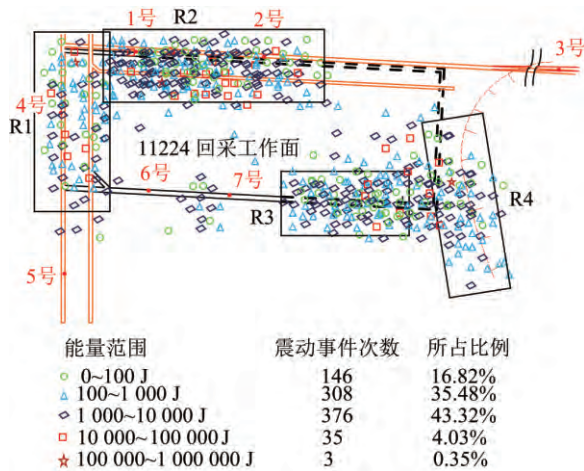


图5 微震事件平面分布

Fig. 5 Plane distribution of microseismic events

号特征。

(3) R3 区域。该区域为6月18日至10月31日期间11224运输巷掘进扰动区,该区域的微震信号具

有明显的时序特征,具体见2.2.2节的详细分析。

(4) R4 区域。该区域大约位于11224工作面开切眼及外侧位置。距11224工作面开切眼30 m以外区域范围为已探明的滑坡区、无煤带。其中11224运输巷掘进至开切眼前,煤层参数有较大变化。实测原煤瓦斯含量高达 $20 \text{ m}^3/\text{t}$,是原始煤层瓦斯含量的2倍,煤层厚度增加至2.2 m左右,比煤层平均厚度增加1 m,煤层坚固性系数 f 值由0.5~0.6降至0.1,煤体强度低,手捻之即碎,是典型构造带破坏煤体。这些典型特征可证实前方存在地质异常。通过勘探钻孔亦证实了前方滑坡区、无煤带的存在。

以上验证了利用微震监测可提前判识与定位地质异常。

2.2.2 微震信号时序变化特征

统计11224运输巷掘进工作面迎头附近(R3区域)6月18日至10月10日每日的微震信号累计频次与累计能量数值,同时与11224运输巷掘进工作面或者瓦斯抽采工序进行统计对比分析,得到金佳矿11224工作面迎头区域微震信号时序变化图(图6)。

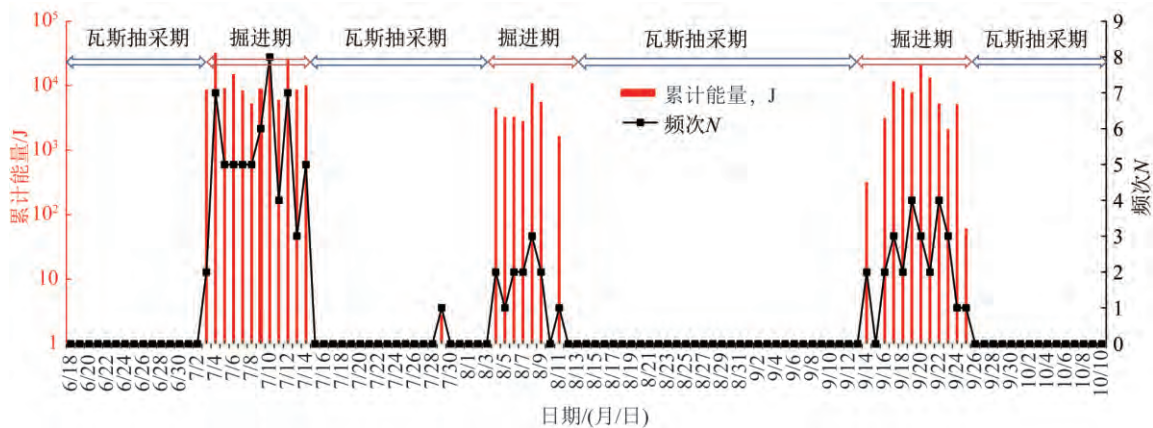


图6 11224运输巷掘进工作面迎头区域微震信号时序变化

Fig. 6 Timing change of microseismic signal in headwall area of 11224 face

由图6可以看出,11224运输巷煤巷掘进工作面附近的微震信号发生频次、释放能量与巷道的作业工序具有密切关系。在11224运输巷道掘进期间,掘进扰动较大,煤层突出危险性高,微震事件发生的频次、释放的能量会呈现大幅度升高;在11224运输巷工作面迎头抽采瓦斯期间,采掘活动基本停止,煤层突出危险性降低,工作面周围微震频次较低,释放能量较小。这证实了工作面周围微震频次高低、释放能量大小与煤层突出危险程度呈现高度正相关。因此,微震频次指标、能量指标可较好监测煤层巷道掘进期间煤层突出危险程度。

2.3 震动波CT探测结果

为研究巷道采掘、煤层瓦斯抽采等工艺对区域应

力场的影响,精准探测工作面区域应力场动态演化特征。笔者选取了2017-06-18—07-04(瓦斯抽采期)、2017-07-05—07-14(巷道掘进期)、2017-07-15—08-04(瓦斯抽采期)3个阶段、一个完整循环11224工作面区域的原始监测数据进行了区域应力场震动波CT探测,对比分析了3阶段区域应力场动态演化特征。选取11224运输巷所在标高+1 670 m的水平切片波速异常系数 A_n 等值线云图作为11224区域应力场探测评价结果,探测结果如图7所示。

对比分析图7可明显看出,随着掘进工作面的向前推进,11224工作面区域应力场处于动态变化中,区域应力异常区与实际采掘关系具有较强吻合度。同时,巷道掘进、瓦斯抽采等影响工作面附近应力场

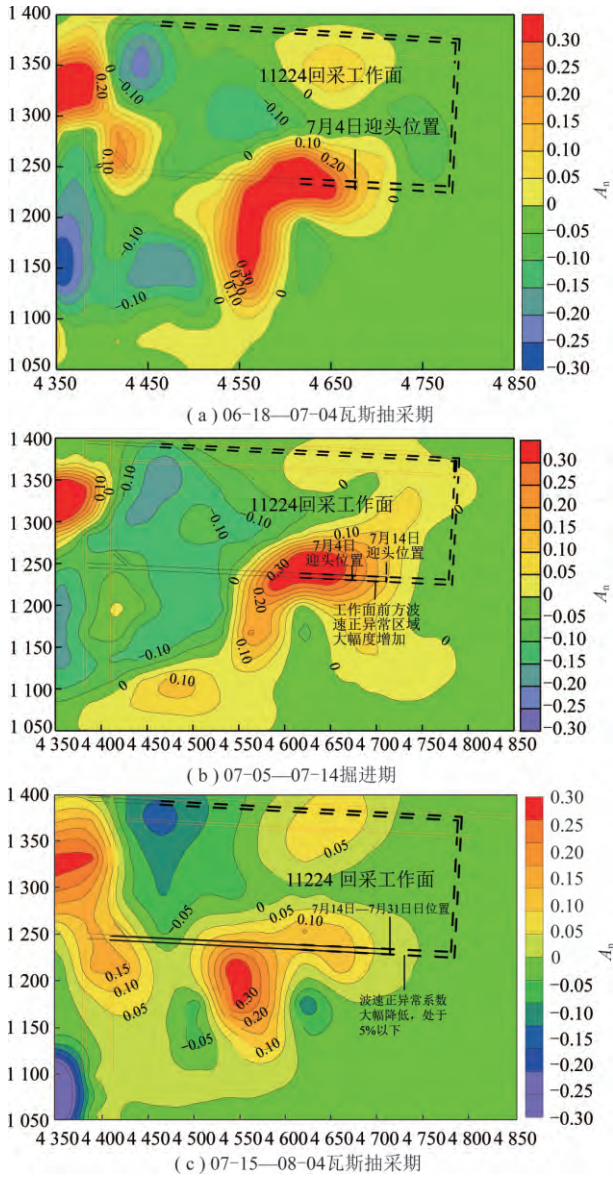


图 7 波速异常系数 A_n 等值线

Fig. 7 Contour map about wave velocity anomaly coefficient A_n

变化。具体分析如下:

(1) 11224 工作面左侧采区煤柱区的波速异常系数较高,与理论应力集中相一致;

(2) 对比分析图 7(a), (b), 随煤巷掘进工作面向前推进,图 7(b) 中 7 月 4 日停掘位置前方相比图 7(a) 相同位置的波速异常系数大幅增加,已达到中等应力集中程度,同时波速正异常区面积也大幅增加。分析原因,主要是由于掘进期间采掘扰动较大,造成采掘扰动应力大幅增加,这与工作面前方煤与瓦斯突出危险性逐步增大相一致;

(3) 对比分析图 7(b), (c), 随着工作面迎头瓦斯抽采时间增加,一方面掘进工作面前方波速异常系数大幅降低至 5% 以下;另一方面异常区面积比图 7(b) 巷道停掘时大幅度降低。分析其原因,主要是

工作面前方施工了大量瓦斯抽采钻孔,起到了卸压作用;其次,随着煤层瓦斯被大量抽出,煤层瓦斯压力降低。因此,波速异常区的减小与煤与瓦斯突出危险性的逐渐降低相一致。

通过以上结果分析,震动波 CT 探测得到的突出危险煤层区域应力场分布演化规律与理论相一致,能够动态探测煤巷掘进、钻孔施工、瓦斯抽采等采掘活动引起的应力场演化特征,且具有较高的准确度。

2.4 电磁辐射监测对比

研究表明^[8],电磁辐射强度可以反映煤岩体的应力状态,应力高时煤体变形破坏量大,电磁辐射强度高。

为了验证震动波 CT 探测煤层区域应力场分布特征的准确性,选取了 2017-07-25—08-03 的便携式电磁辐射数据进行分析,图 8 为 11224 运输巷电磁辐射监测原理及监测方案示意,图 9 为监测时段内各监测点处电磁辐射强度平均值总和及最大值总和曲线。

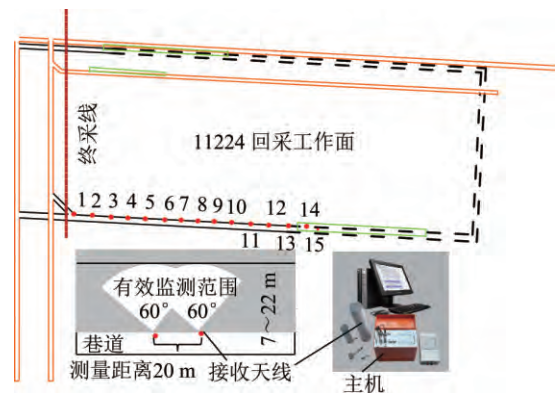


图 8 KBD5 电磁辐射监测原理及方案

Fig. 8 Monitoring principle and scheme of KBD5 monitor

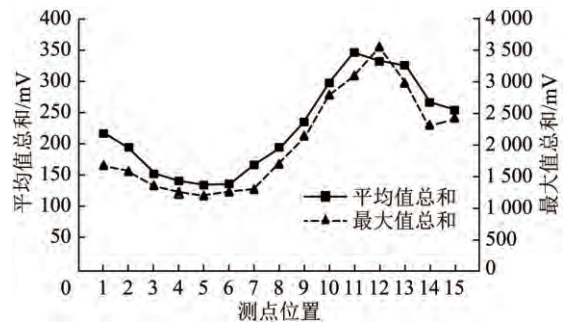


图 9 电磁辐射监测结果

Fig. 9 Monitoring results of KBD5 monitor

由图 9 可以看出,电磁辐射监测结果与该时间段内波速反演结果(图 7(c))对应性较好,即高波速区对应的电磁辐射强度值较高,低波速区对应的电磁辐射强度值较低。

3 讨 论

冲击地压与煤与瓦斯突出均是煤矿典型动力灾害,其发生机理具有相似性。两者均是煤岩体承受的压力超过煤岩体自身强度极限,使得聚集在巷道周围煤岩体中的能量突然释放,导致煤岩体抛向巷道,造成煤岩体振动和破坏的动力灾害事件。

目前,在冲击地压区域探测与评价领域,震动波CT探测与微震实时监测技术已被广泛应用。但在煤与瓦斯突出区域探测领域,震动波CT探测与微震区域实时监测技术的应用案例较少。归纳总结本次试验在突出煤层区域监测所取得的效果,与传统突出区域预测方法相比,微震监测技术具有明显优势与不足。

3.1 煤与瓦斯突出微震监测技术优势

与传统煤层参数指标、瓦斯指标等区域预测方法相比,微震监测技术具有以下明显优势:

(1) 连续监测。煤层瓦斯参数指标预测方法(瓦斯压力、瓦斯含量等)、地质预测法、物探法和数学物理方法等传统的预测方法均是利用单一或多种煤层参数指标评价煤层突出危险性,这些指标多是抽检、定点式指标,在时、空维度上缺乏连续性。微震监测则可以实现区域范围内采掘扰动信息的实时监测。

(2) 静载应力集中区的可靠探测。与传统区域预测方法相比,基于微震监测的震动波CT探测技术能够实现煤层区域静载应力场分布特征的可靠探测。文中探测结果证实了探测的煤层静载应力场分布特征与理论分布相一致,电磁辐射监测结果也验证了CT探测结果的准确性。

(3) 动载扰动源位置的精确定位。静载应力集中和动载扰动是煤与瓦斯突出发生的两个主要因素。没有采掘扰动,煤与瓦斯突出灾害就不会发生。因此,精确定位采掘扰动事件位置并确定扰动强度对实现煤与瓦斯突出的监测预警具有重要意义。

3.2 煤与瓦斯突出微震监测技术不足

分析金佳矿的监测效果,微震监测技术实现了突出危险煤层静载应力场的区域探测,精确定位了采掘扰动事件位置,确定了每次扰动事件的时间、空间、强度信息,但距离实现煤与瓦斯突出的区域监测预警仍有一定差距,具体表现为:

(1) 关于煤与瓦斯突出机理的研究^[23-24],目前行业内专家学者、工程技术人员已达成共识,煤与瓦斯突出是地应力、瓦斯、煤体强度等多因素共同作用的结果,但主导因素存在区别。利用微震监测技术动态监测突出危险煤层采掘扰动强度、区域应力场分布特

征及地质异常识别对研究应力主导型、构造控制型煤与瓦斯突出的监测预测应有较好效果,但对于瓦斯主导型煤与瓦斯突出的监测效果有待进一步考察。

(2) 利用微震监测技术频次指标、能量指标、区域应力场分布特征等判别煤与瓦斯突出的预警模型与预警临界值尚需进一步研究确定。不同煤层赋存条件、采掘扰动强度差异较大,监测得到的震动事件频次、能量释放大小具有较大差异。不同矿井、不同作业条件下的微震监测合理预警临界值需进一步考察确定。

(3) 震动波CT探测得到的区域应力场仅是相对应力的分布特征,没有得到绝对应力值。因此,基于震动波CT探测结果直接判定煤与瓦斯突出危险程度具有一定的局限性。但不可否认的是,区域应力场相对大小分布特征能够判定不同位置煤与瓦斯突出危险性的大小。这对确定煤与瓦斯突出防治重点区域,提高煤与瓦斯突出防治措施的精准实施具有重要意义。

4 结 论

(1) 微震监测技术实现了突出危险煤层采掘扰动、地质异常的动态监测及区域应力场探测。通过金佳矿应用试验表明,微震监测技术探测得到的地质异常、区域应力场空间分布特征与理论相一致,验证了微震监测技术实现突出危险煤层区域动态监测的可行性。

(2) 煤与瓦斯突出微震区域动态监测能够突破常规区域预测抽检、定点式指标在时、空维度上的局限性,实现突出危险煤层区域动态、连续监测。

(3) 通过微震监测提前探测突出危险煤层区域应力场分布特征、地质构造异常分布规律,对确定煤与瓦斯突出防治重点区域,提高煤与瓦斯突出防治水平具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] 鲜学福,辜敏,李晓红,等.煤与瓦斯突出的激发和发生条件[J].岩土力学,2009,30(3):577-581.
XIAN Xuefu, GU Min, LI Xiaohong. Excitation and occurrence conditions for coal and gas outburst[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 577-581.
- [2] 王佑安.煤和瓦斯突出危险性预测方法[J].煤矿安全,1984(4):1-7.
WANG Youan. The prediction method of coal and gas outburst[J]. Safety in Coal Mines, 1984(4): 1-7.
- [3] 俞启香.矿井瓦斯防治[M].徐州:中国矿业大学出版社,1992.
- [4] 曹运兴.瓦斯地质单元法预测瓦斯突出的认识基础与实践[J].煤炭学报,1995,20(S1):76-78.

- CAO Yunxing. Knowledge and practice for prediction of gas outburst by gas geological unit methods [J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20(S1): 76-78.
- [5] 张许良, 彭苏萍, 杨瑞昌, 等. 瓦斯突出危险带的三维地震探测技术 [J]. 煤炭科学技术, 2003, 31(12): 12-15.
ZHANG Xuliang, PENG Suping, YANG Ruizhao, et al. Technology of 3D seismic exploration for gas outburst danger zone [J]. Coal Science and Technology, 2003, 31(12): 12-15.
- [6] 张子成, 刘高峰, 吕闰生, 等. 基于模糊模式识别的煤与瓦斯突出区域预测 [J]. 煤炭学报, 2007, 32(6): 592-595.
ZHANG Zixu, LIU Gaofeng, LÜ Runsheng, et al. Regional forecast of coal and gas burst based on fuzzy pattern recognition [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(6): 592-595.
- [7] 李胜, 胡海永. 基于 KPCA 和改进极限学习机的煤与瓦斯突出危险性判识 [J/OL]. 计算机应用研究, 2018(1): 1-8.
LI Sheng, HU Haiyong. Risk identification of coal and gas outburst based on KPCA and improved extreme learning machine model [J/OL]. Journal of Computer Applications, 2018(1): 1-8.
- [8] WANG E, HE X, WEI J, et al. Electromagnetic emission graded warning model and its applications against coal rock dynamic collapses [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(4): 556-564.
- [9] 何学秋, 窦林名, 牟宗龙, 等. 煤岩冲击动力灾害连续监测预警理论与技术 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1485-1491.
HE Xueqiu, DOU Linming, MU Zonglong, et al. Continuous monitoring and warning theory and technology of rock burst dynamic disaster of coal [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1485-1491.
- [10] FRIEDEL M J, SCOTT D F, JACKSON M J, et al. 3-D tomographic imaging of anomalous conditions in a deep silver mine [J]. Journal of Applied Geophysics, 1995, 34(1): 1-21.
- [11] 李世恩, 和雪松, 张少泉, 等. 矿地震监测技术的进展及最新成果 [J]. 地球物理学进展, 2004, 19(4): 853-859.
LI Shiyu, HE Xuesong, ZHANG Shaoquan, et al. Development and recent achievement of mining shock observation [J]. Progress in Geophysics, 2004, 19(4): 853-859.
- [12] 何俊, 潘结南, 王安虎. 三轴循环加卸载作用下煤样的声发射特征 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 84-90.
HE Jun, PAN Jienan, WANG Anhu. Acoustic emission characteristics of coal specimen under triaxial cyclic loading and unloading [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 84-90.
- [13] 曹树刚, 刘延保, 张立强. 突出煤体变形破坏声发射特征的综合分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S1): 2794-2799.
CAO Shugang, LIU Yanbao, ZHANG Liqiang. Study on characteristics of acoustic emission in outburst coal [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 2794-2799.
- [14] LU C P, DOU L M, LIU H, et al. Case study on microseismic effect of coal and gas outburst process [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 53, 101-110.
- [15] 雷文杰, 李绍泉, 商鹏, 等. 微震响应煤与瓦斯突出模拟试验 [J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(1): 161-166.
LEI Wenjie, LI Shaoquan, SHANG Peng, et al. Coal and gas outburst simulation experiment reacted by microseismic monitoring [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(1): 161-166.
- [16] 朱权洁, 李青松, 李绍泉, 等. 煤与瓦斯突出试验的微震动态响应与特征分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 3813-3821.
ZHU Quanjie, LI Qingsong, LI Shaoquan, et al. Microseismic dynamic response and characteristic analysis of coal and gas outburst experiment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 3813-3821.
- [17] 窦林名, 何学秋, REN Ting, 等. 动静载叠加诱发煤岩瓦斯动力灾害原理及防治技术 [J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 48-59.
DOU Linming, HE Xueqiu, REN Ting, et al. Mechanism of coal-gas dynamic disasters caused by the superposition of static and dynamic loads and its control technology [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(1): 48-59.
- [18] 谢广祥, 胡祖祥, 王磊. 工作面煤层瓦斯压力与采动应力的耦合效应 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(6): 1089-1093.
XIE Guangxiang, HU Zuxiang, WANG Lei. The coupling effect of the coal seam gas pressure and mining stress in working face [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6): 1089-1093.
- [19] 程远平, 张晓磊, 王亮. 地应力对瓦斯压力及突出灾害的控制作用研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 408-414.
CHENG Yuanping, ZHANG Xiaolei, WANG liang. Controlling effect of ground stress on gas pressure and outburst disaster [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(3): 408-414.
- [20] 窦林名, 蔡武, 巩思园, 等. 冲击危险性动态预测的震动波 CT 技术研究 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 238-244.
DOU Linming, CAI Wu, GONG Siyuan, et al. Dynamic risk assessment of rock burst based on the technology of seismic computed tomography detection [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 238-244.
- [21] 蔡武, 窦林名, 李振雷, 等. 矿震震动波速度层析成像评估冲击危险的验证 [J]. 地球物理学报, 2016, 59(1): 252-262.
CAI Wu, DOU Linming, LI Zhenlei, et al. Verification of passive seismic velocity tomography in rock burst hazard assessment [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(1): 252-262.
- [22] 窦林名, 何学秋. 采矿地球物理学 [M]. 北京: 中国科学文化出版社, 2002.
- [23] 潘一山. 煤与瓦斯突出、冲击地压复合动力灾害一体化研究 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 105-112.
PAN Yishan. Integrated study on compound dynamic disaster of coal-gas outburst and rockburst [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 105-112.
- [24] 尹光志, 李星, 鲁俊, 等. 深部开采动静载荷作用下复合动力灾害致灾机理研究 [J]. 煤炭学报, 2017, 42(9): 2316-2326.
YIN Guangzhi, LI Xing, LU Jun, et al. Disaster-causing mechanism of compound dynamic disaster in deep mining under static and dynamic load conditions [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(9): 2316-2326.