

中文引用格式: 宋大钊, 何学秋, 窦林名, 等. 煤层突出危险微震区域探测技术研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(1): 89-94.

英文引用格式: SONG Dazhao, HE Xueqiu, DOU Linming, et al. Research on MS regional detection technology for coal and gas outburst hazard[J]. China Safety Science Journal 2021, 31(1): 89-94.

## 煤层突出危险微震区域探测技术研究\*

宋大钊<sup>1,2</sup>教授, 何学秋<sup>\*\*1,2,3</sup>教授, 窦林名<sup>4</sup>教授,  
祖自银<sup>5</sup>, 王安虎<sup>1,2</sup>, 李振雷<sup>1,2</sup>

(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 中安安全工程研究院 北京 100013; 4 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; 5 贵州盘江精煤股份有限公司, 贵州 盘州 553537)

中图分类号: X936 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn.1003-3033.2021.01.013

基金项目: 国家自然科学基金资助(51634001, 51774023); 北京市科技新星计划项目(XX2018073)。

**【摘要】** 为解决煤与瓦斯突出矿井缺乏区域性在线探测预警技术问题, 首先, 将能反映矿井动、静载荷的微震(MS)技术应用于煤与瓦斯突出矿井, 研究掘进诱发微震信号的时空演化特征; 然后, 基于震动波计算机断层扫描技术(CT)反演研究掘进工作面区域应力场分布特征, 对比分析应力异常区与事故发生位置的空间关系; 最后, 探讨MS技术在突出矿井的应用前景。结果表明: 突出矿井松软煤层MS事件主要分布在应力集中区、掘进扰动区及构造影响区; 当掘进工作面逐渐临近地质构造时, MS能量、频次会逐渐增多; 基于震动波速反演得到的区域应力场结果与实际的大巷上山、停采线及掘进面等引起的应力集中相符合; 金佳矿突出危险事件位置与震动波CT探测的应力异常区具有很好的对应关系, 在波速梯度变化大的位置更可能发生突出。

**【关键词】** 煤与瓦斯突出; 探测预警; 微震(MS)监测; 震动波计算机断层扫描(CT)技术; 区域应力场

### Research on MS regional detection technology for coal and gas outburst hazard

SONG Dazhao<sup>1,2</sup>, HE Xueqiu<sup>\*\*1,2,3</sup>, DOU Linming<sup>4</sup>, ZU Ziyin<sup>5</sup>, WANG Anhu<sup>1,2</sup>, LI Zhenlei<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** In order to address lack of regional on-line detection and early warning technology in coal and gas outburst coal mines, MS technology, which could correctly reflect dynamic and static loads, was

\* 文章编号: 1003-3033(2021)01-0089-06; 收稿日期: 2020-10-20; 修稿日期: 2020-12-08

\*\* 通信作者: 何学秋(1961-), 男, 辽宁辽阳人, 博士, 教授, 主要从事安全科学规律、地下工程动力灾害监测预警物理方法、地下工程安全AI理论与技术、安全规划与战略等方面的研究。E-mail: hexq@ustb.edu.cn

applied in outburst-prone mines , and spatial and temporal evolution characteristics of driving-induced MS signals were studied. Then , distribution characteristics of regional stress field in heading face were calculated based on seismic wave CT before relationship between abnormal stress area and accident locations was compared and analyzed. At last , prospect of MS technology’s application in outburst-prone mines was explored. The results show that MS events in soft coal seam are mainly distributed in stress concentration area , excavation disturbance area and tectonic influence area. When heading face gradually approaches geological structures , MS energy and events will tend to increase. The results of regional stress field based on seismic wave velocity inversion are consistent with stress concentration caused by main roadway uphill , stopping line and heading face. The location of outburst event in Jinjia coal mine corresponds well to abnormal stress area detected by CT technology , and outburst are more likely to occur where velocity gradient changes greatly.

**Keywords:** coal and gas outburst; detection and early warning; microseismic ( MS) monitoring; seismic wave computed tomography( CT) technique; regional stress field

## 0 引言

煤与瓦斯突出是煤矿开采中最具破坏性和危害性的动力灾害之一<sup>[1-2]</sup>。近年来,随着开采深度和强度的增加,矿井受到煤与瓦斯突出灾害的威胁愈发严重,而突出危险区域探测预警是提高煤与瓦斯突出防治水平的关键。目前主要的探测预警方法包括打钻测试瓦斯基础参数(如  $K_1$  值、 $S$  值等)以及监测瓦斯抽采期间的参数(如瓦斯浓度等)。但这些方法多采用抽检、定点式指标,钻孔工程量大,人为因素干扰大,并且通常会在一定程度上影响生产,且在时域上无法做到连续监测,空域上体现为点评价形式,难以反映采掘扰动过程区域性煤岩应力环境及煤与瓦斯突出危险动态演化过程。

微震( Microseismic ,MS) ,即煤岩体破裂产生的震动。MS 监测技术在冲击地压监测预警理论及技术应用方面取得了系列成果。GE Maochen<sup>[3]</sup> 通过研究揭示了岩爆、冲击地压等发生过程中的 MS 活动空间分布特征与演化过程,并据此划分了危险区域; LU Caiping 等<sup>[4]</sup> 分析了冲击地压发生过程中的幅频、持续时间、频带能量等 MS 波形特征,为冲击地压灾害提前预警提供了依据; 吕进国<sup>[5]</sup>、夏永学<sup>[6]</sup> 等提出了多个 MS 时间序列监测预警指标和方法,如 MS 事件能量和频次、 $b$  值、 $A(b)$  值等。上述研究主要利用各种 MS 指标定位冲击地压矿井煤岩体内的破裂情况,结合现场地质条件及采掘工艺,分析预测灾害发生的区域。近年来,基于震动波的计算断层扫描( Computed Tomography ,CT) 技术作为一种新的地球物理方法,被广泛应用于工程与地质诊断,是地下工程探测技术的最新发展。LI

Zhenglei 等<sup>[7]</sup> 将震动波 CT 技术和 MS 实时监测相结合,是目前煤矿冲击危险评价和预测的最新成果,已在数十个矿井取得了成功应用。目前,煤与瓦斯突出矿井尚未建立时空连续、可视化的区域探测预警系统。

鉴于此,笔者拟在前人研究成果的基础上,将 MS 及震动波 CT 技术系统应用于煤与瓦斯突出矿井,分析 MS 信号的时空演化特征,并研究震动波 CT 与应力异常、突出预兆等的关系,以期通过准确定位区域应力场来实现突出危险探测。

## 1 试验区与 MS 系统概况

### 1.1 试验区

以贵州盘江精煤股份有限公司金佳矿 11224 回采工作面为研究对象。工作面埋深 340~400 m,煤层平均厚度 1.2 m; 设计倾向长 180 m,走向长 438 m,煤层倾角 22°; 平均原煤瓦斯含量 10.8 m<sup>3</sup>/t,煤层坚固性系数  $f$  值为 0.5~0.6。11224 工作面布置及煤层相互间层位关系如图 1 所示。

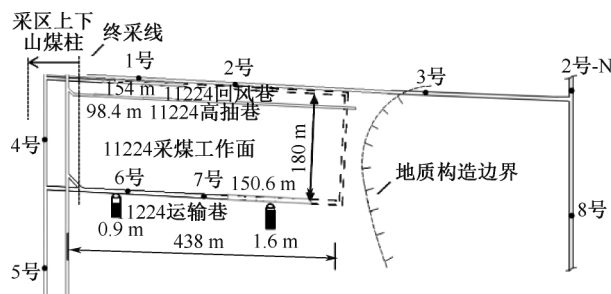


图 1 11224 采煤工作面位置及 MS 传感器布置

Fig.1 1122 4 coal mining face location and MS sensor layout

### 1.2 MS 系统

金佳矿安装了 MS 监测系统。该系统可实现对矿震的长距离监测(最大距离达 13 km),系统参数见文献 [8]。考虑到煤与瓦斯突出主要发生在掘进工作面,为达到较好的监测效果,在 11224 工作面运输巷周边布置 7、8 个传感器。MS 监测期约 1 年,共 2 个时间段:2017 年 6 月 18 日—10 月 15 日(选用 1—7 号传感器)和 2017 年 10 月 16 日—2018 年 5 月 31 日(选用 1 号、2 号、N、3—8 号传感器)(图 1)。

## 2 MS 事件时空变化特征

### 2.1 MS 事件空间分布特征

监测期间,11224 工作面周围 100 m 范围内 MS 事件平面分布如图 2 所示。共有 MS 事件 868 个。可以看出,MS 事件主要集中在 4 个区域:煤柱影响区(R1)、工作面回风巷扰动区(R2)、工作面运输巷扰动区(R3)以及构造影响区(R4)。

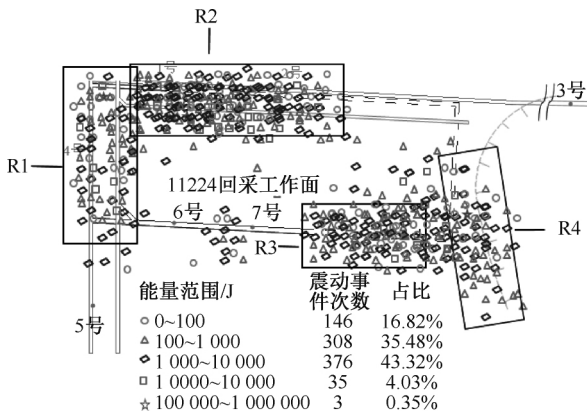


图 2 MS 事件空间分布

Fig.2 Spatial distribution of MS events

显然,R1 和 R4 区域受到多条上山巷道产生的多个煤柱的影响而诱发了应力集中,以及构造应力在附近煤岩体内部产生应力集中,产生了较多的 MS 事件;而 R2 和 R3 区域则由于巷道掘进期间,掘进头附近产生局部应力集中,同时动载扰动诱发了较多的 MS 事件。金佳矿 MS 事件能量几乎全部在  $10^4$  J 以下,这与冲击地压矿井相比(有大量能量在  $10^5$  J 以上的 MS 事件存在) [6],事件能级偏小 1~2 级。最大的 3 次能量超过  $10^5$  J 的 MS 事件有 2 次在运输巷扰动区与构造影响区叠加区域,说明此处煤体承受着较大的构造应力及扰动载荷。

### 2.2 MS 指标时序变化特征

分析 2017 年 7 月 3 日—2018 年 1 月 24 日工作

面贯通期间 11224 运输巷掘进头区域 100 m 范围内的 MS 事件,发现该区域 MS 信号时序变化如图 3 所示。其中,阴影部分为掘进期间数据,无阴影部分为抽采期间数据。

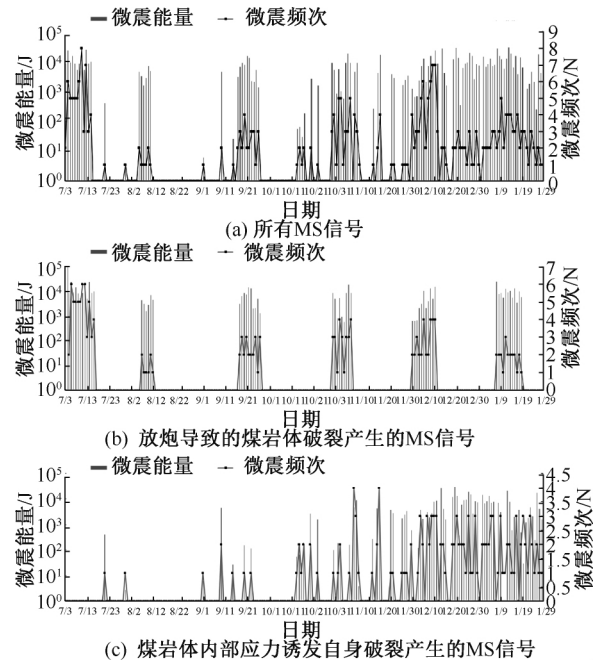


图 3 11224 运输巷迎头区域 MS 信号时序变化

Fig.3 Time series change of MS signals in head-on area of No. 11224 haulage roadway

从图 3 可以看出 ①由于金佳矿煤层松软,顶底板抗压强度不大,难以集聚大量的弹性能,因此,与冲击地压矿井的硬岩相比,MS 能量、频次均较少。②11224 运输巷迎头区域 MS 信号与巷道的作业工序密切相关。巷道掘进期间,放炮诱发产生了大部分 MS 事件,剩下的一小部分由开采扰动导致的煤岩体破裂引起。实际上,即使这一小部分也比抽采期间的 MS 事件多。抽采期间,采掘活动基本停止,MS 频次低,释放能量小。单日频次大部分为 0 次,个别天出现了 1~2 次的 MS 事件,且释放能量小,为  $10^2$  J 级别。这说明工作面周围 MS 事件与开采扰动程度具有正相关性。③从 10 月 16 日开始,煤岩体内部应力导致自身破裂产生的 MS 事件比前期明显增加且较为密集(图 3c),这是由于掘进头位置与工作面右侧构造区的位置越来越近,受工作面前方构造区的影响明显增加引起的。工作面逐渐靠近构造区时 MS 累计频次、能量的变化曲线如图 4 所示。

由图 4 可以看出,突出煤层掘进工作面,掘进放炮是最主要的动载形式,此时动载强度小。如果掘进工作面接近地质构造引起的应力异常区,在煤层原有的较大的原岩应力场(静载)的基础上,增加较

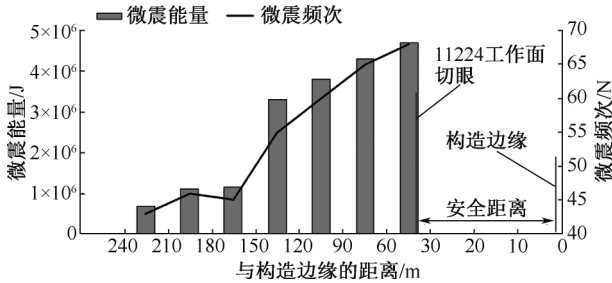


图4 MS 累计能量、频次与地质构造距离的关系

Fig.4 Relationship between MS cumulative energy , frequency and geological structure distance

小的动载扰动,就会诱发大量的MS信号。换句话说,在巷道掘进时,若MS事件比之前显著增多,可能是动静载叠加作用下引起了煤岩体内部更多数量的破坏,此时掘进工作面发生动力显现的可能性会增大。需密切关注巷道周边地质条件,必要时采取卸压防突工程。

以上研究了MS技术指标在巷道掘进过程中遇到地质构造的特征。考虑到现场构造区是突出灾害的高发区域,因此,利用MS技术通过探测地质构造进而探测突出危险区域是可行的。

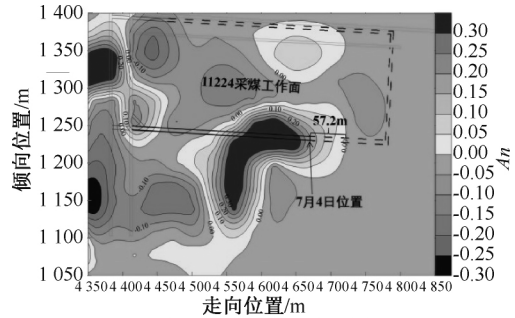
### 3 区域应力场震动波CT反演分析

由于震动波CT技术在煤与瓦斯突出矿井尚无应用先例,笔者借鉴了冲击地压矿井的通用指标:波速异常系数 $A_n$ 及波速梯度异常系数 $V_c(i, j)$ 表征应力场异常。其中,前者利用纵波速度的异常变化表征区域内应力场的异常,后者是利用波速变化的梯度值预测预测突出危险区域。指标的具体计算及解释参见文献[9]。

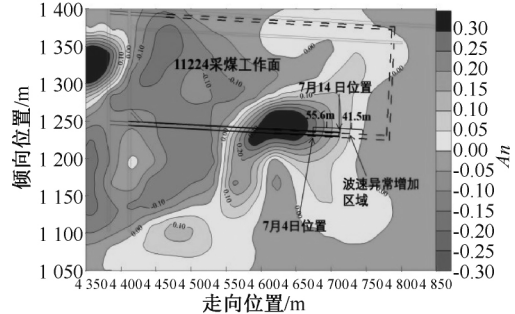
#### 3.1 震动波CT反演区域应力场

11224工作面水平标高+1670~+1730m,选择该高度区间内的水平震动波CT切面分析区域应力场的分布及演化情况,如图5所示。

由图5a可以看出,在大巷上山、1194工作面停采线、11224运输巷掘进头出现明显的应力异常区,其中,后两者产生的应力异常区域连成一片。这是由于大巷上山、停采线附近通常为应力集中区域,导致了波速异常。掘进开挖会诱发附近煤岩体应力重新分布,产生应力集中。11224运输巷掘进头与1194工作面停采线距离约100m,二者作用相叠加产生了范围更大、程度更高的应力异常区域。对比图5a和图5b,掘进期间应力异常区域范围显然比抽采期间更大,这是由于巷道掘进动载扰动会引起



(a) 6月18日—7月3日(抽采期间)



(b) 7月4日—14日(掘进期间)

图5 11224运输巷掘进期间抽采-掘进循环震动波CT反演典型结果

Fig.5 Typical results of extraction and excavation cycle seismic wave CT inversion during excavation of No. 11224 haulage roadway

更大范围煤岩体内部应力的变化。掘进结束后,巷道停止掘进施工,应力逐渐达到平衡状态,应力异常区域也会相应变化。在6月18日—7月14日抽采-掘进循环中,可以发现,在7月4日,经过前期数天的停掘抽采,可认为掘进头附近应力达到平衡状态,抽采的超前影响距离为57.2m;经过10天的掘进,到7月14日停止,掘进头超前应力影响区为41.5m。在此之后,一方面应力重新平衡,一方面进行打钻抽采瓦斯,这一数值会一定程度增加。经过11个循环的考察,该掘进头的超前应力异常区平均约为47.8m。

综上所述,震动波CT反演的应力场结果与实际的大巷上山、停采线及掘进面等引起的应力异常相符合,震动波CT技术同样可以适用于煤与瓦斯突出矿井的区域应力场探测。

#### 3.2 应力异常区与事故发生位置空间对比

11224工作面沿煤层倾向的剖面如图6所示,现场监测过程中在8月15日(A点)、12月10日(B点)出现2次 $K_1$ 值超限,1月22日(C点)发生1次顶板事故。

可以看出,在应力场异常区的边缘是2次 $K_1$ 值超限的位置,此处应力梯度大,突出危险性高。

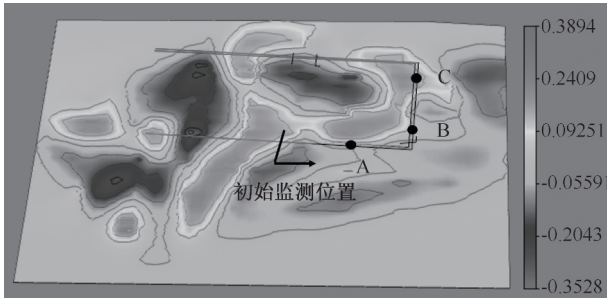


图 6 11224 工作面顺煤层应力异常区与事故发生区空间位置

Fig.6 Stress anomaly area and accident area spatial locations along seam of No. 11224 haulage roadway

12 月 8 日巷道瓦斯浓度超限,12 月 10 日切眼迎头发生小型压出,瓦斯异常涌出,巷道停止掘进。在随后 12 月 14、16、18、23 及 24 日的打钻过程中均出现打钻喷孔突出前兆。12 月 10 日巷道迎头位置的前方正是应力异常区。

2018 年 1 月 22 日发生的 11224 运输巷切眼顶板事故。该事故发生区域为震动波 CT 探测的应力集中区域,存在应力异常,11224 切眼掘进时顶板冒落矸石,导致了设备损失与人员伤亡。

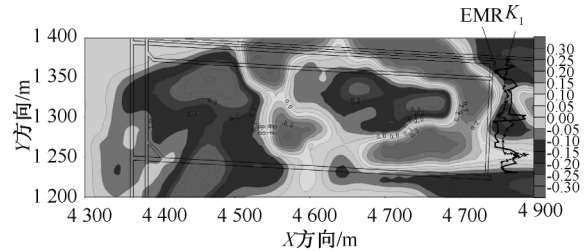
因此,突出危险事件发生位置与探测的区域应力场具有很好的对应关系。在震动波 CT 探测结果波速梯度变化大的位置更可能发生突出危险。在该区域进行掘进等作业时,应采取必要的防突措施。震动波 CT 反演区域应力场对突出危险区域预测及现场施工具有重要的指导意义。

### 3.3 其他监测指标的对比较证

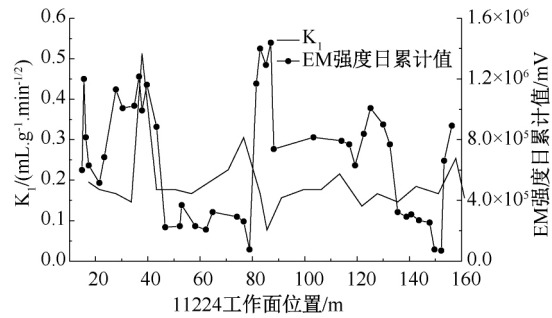
利用煤与瓦斯突出灾害监测的 2 种常用指标:钻屑瓦斯解吸指标  $K_1$  值及电磁辐射 (Electro Magnetic Radiation, EMR) 法<sup>[10]</sup>验证 11224 工作面切眼掘进期间的震动波 CT 结果。2 种指标的测试方法参见文献 [10-12]。

11224 工作面从 2017 年 12 月 1 日开始开切眼,利用应力场反演 2017 年 11 月 18 日—11 月 28 日的 MS 事件,以确定切眼附近的应力场分布情况,结果如图 7a 所示。之后跟踪测试了切眼整个施工期间的  $K_1$  值及电磁辐射变化如图 7b 所示。可以看出,2 种指标与应力反演结果具有较好的一致性。

由图 7a 可知:切眼附近存在 2 个比较明显的应力异常区。①在距切眼下部开口 20~30 m 范围,  $A_n$  在 -0.1~0.15 之间,  $V_c$  在 0.15~0.25 之间,判定该区域具有中等突出危险性。在此区域  $K_1$  最大值为 0.52 mL/(g·min<sup>1/2</sup>) 较常规水平(一般在 0.2  $K_1$  左



(a) 震动波 CT 反演结果



(b) 开切眼期间  $K_1$  值与电磁辐射监测结果

图 7 11224 工作面开切眼期间震动波 CT 反演结果及传统指标对比较证

Fig.7 Inversion results of seismic wave CT and comparison and verification of traditional indicators during open-off cut of No.11224 working face

右) 均值增加了 205.8%; 日累计电磁辐射累强度最大值为  $1.2 \times 10^6$  mV 较之前均值提高了 42.5%。②距切眼下部开口 80~120 m 范围,  $A_n$  及  $V_c$  都大于 0.25 属于强突出危险区。在这附近  $K_1$  和日累计电磁辐射累强度最大值分别达到 0.31 mL/(g·min<sup>1/2</sup>) 和  $1.42 \times 10^6$  mV, 较常规水平分别增加了 46.6% 和 355.8%。另外,对比分析  $K_1$  和 EMR 强度指标,二者具有较好的相关性(图 7b)。

作为煤与瓦斯突出预测的常用方法,  $K_1$  值和电磁辐射的变化证明了震动波 CT 对应力集中程度进而对突出危险预测的有效性和可行性。

## 4 结 论

1) 经现场实测得出突出危险煤层掘进过程 MS 事件的时空变化特征。MS 事件主要分布在煤层应力集中区、掘进扰动区及构造影响区; 突出矿井松软煤层不利于弹性能的积聚, 单个 MS 事件能级较小, 只有当不同因素叠加导致产生应力集中区时, 才可能出现大于  $10^5$  J 大能量 MS 事件。

2) 当掘进工作面逐渐临近地质构造引起的应力集中区时, MS 能量、频次指标会出现逐渐增多的过程, 可为判定现场突出危险提供依据。

3) 基于震动波速反演得到的区域应力场结果

与实际的大巷上山、停采线及掘进面等引起的应力异常相符合,震动波 CT 技术适用于煤与瓦斯突出矿井的区域应力场探测。

4) 金佳矿突出危险事件位置与探测的区域应力场具有很好的对应关系,在震动波 CT 探测结果波速梯度变化大的位置更可能产生突出危险。

#### 参 考 文 献

- [1] 杨正凯,程志恒,刘彦青,等.突出煤层群多次采动对底板穿层钻孔瓦斯抽采的影响[J].中国安全科学学报,2020,30(5):66-73.  
YANG Zhengkai, CHENG Zhiheng, LIU Yanqing, et al. Influence of multiple mining of outburst coal seam group on gas extraction of cross layer borehole[J]. China Safety Science Journal 2020, 30(5): 66-73.
- [2] 陈刘瑜,李希建,沈仲辉,等.贵州北部突出煤的孔隙结构及分形特征研究[J].中国安全科学学报,2020,30(2):66-72.  
CHEN Liuyu, LI Xijian, SHEN Zhonghui, et al. Pore structure and fractal characteristics of outburst coal in northern Guizhou[J]. China Safety Science Journal 2020, 30(2): 66-72.
- [3] GE Maochen. Efficient mine microseismic monitoring[J]. International Journal of Coal Geology 2005, 64(1/2): 44-56.
- [4] LU Caiping, LIU Guangjian, LIU Yang, et al. Microseismic multi-parameter characteristics of rockburst hazard induced by hard roof fall and high stress concentration[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 2015, 76: 18-32.
- [5] 吕进国,潘立.微震预警冲击地压的时间序列方法[J].煤炭学报,2010,35(12):2002-2005.  
LYU Jinguo, PAN Li. Microseismic predicting coal bump by time series method[J]. Journal of China Coal Society 2010, 35(12): 2002-2005.
- [6] 夏永学,康立军,齐庆新,等.基于微震监测的5个指标及其在冲击地压预测中的应用[J].煤炭学报,2010,35(12):2011-2016.  
XIA Yongxue, KANG Lijun, QI Qingxin, et al. Five indexes of microseismic and their application in rock burst forecast[J]. Journal of China Coal Society 2010, 35(12): 2011-2016.
- [7] LI Zhenglei, HE Xueqiu, DOU Linming, et al. Rockburst occurrences and microseismicity in a longwall panel experiencing frequent rockbursts[J]. Geosciences Journal 2018, 110: 1-17.
- [8] 欧阳振华,孔令海,齐庆新,等.自震式微震监测技术及其在浅埋煤层动载矿压预测中的应用[J].煤炭学报,2018,43(增1):44-51.  
OUYANG Zhenhua, KONG Linghai, QI Qingxin, et al. Self shocking microseismic monitoring technology and its application in prediction of dynamic pressure in shallow coal seam[J]. Journal of China Coal Society 2018, 43(S1): 44-51.
- [9] 窦林名,蔡武,夙思园,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.
- [10] 康建宁,张睿,胡杰.反循环取样技术在钻屑瓦斯解吸指标 K1 值测定中的应用[J].煤炭工程,2017,49(6):60-63.  
KANG Jianing, ZHANG Rui, HU Jie. Application of reverse circulation sampling indetermination of drilling cuttings gas desorption index K1[J]. Coal Engineering 2017, 49(6): 60-63.
- [11] SONG Dazhao, WANG Enyuan, LI Zhenlei, et al. EMR: an effective method for monitoring and warning of rock burst hazard[J]. Geomechanics and Engineering 2017, 12(1): 53-69.
- [12] LIU Xiaofei, WANG Enyuan. Study on characteristics of EMR signals induced from fracture of rock samples and their application in rockburst prediction in copper mine[J]. Journal of Geophysics and Engineering 2018, 15(3): 909-220.



作者简介: 宋大钊 (1985—) 男,山东邹平人,博士,教授,主要从事地下工程动力灾害监测预警物理方法、安全流变突变理论与技术等方面的研究。E-mail: song.dz@163.com。