

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. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2013.2016

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. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.2016

## 冲击危险性动态预测的震动波 CT 技术研究

窦林名<sup>1,2</sup> 蔡 武<sup>1,2</sup> 巩思园<sup>1</sup> 韩荣军<sup>2,3</sup> 刘 军<sup>3</sup>

(1. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 义马煤业集团股份有限公司 河南 义马 472300)

**摘 要:** 针对煤矿冲击灾害日益频繁的现状,在应力与纵波波速的试验关系模型基础上,分析了采用纵波波速确定冲击危险的理论基础,建立了冲击危险性动态预测评价的震动波 CT 探测的技术,构建了震动波 CT 探测评价冲击危险性技术指标波速异常系数  $A_n$  和波速梯度变化系数  $VG$ ,并给出了各指标的判别准则,最后开展了现场应用。研究表明,对于同一性质的岩体,纵波波速反映了冲击矿压发生的强度条件、能量条件和动载诱冲条件;震动波 CT 探测技术能够对现场冲击危险性做出动态评价和预测,并能对卸压解危措施的实施和效果进行指导和检验。

**关键词:** 冲击危险性; 纵波波速; 震动波 CT; 波速异常系数; 波速梯度变化系数

**中图分类号:** TD324 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2014)02-0238-07

### Dynamic risk assessment of rock burst based on the technology of seismic computed tomography detection

DOU Lin-ming<sup>1,2</sup>, CAI Wu<sup>1,2</sup>, GONG Si-yuan<sup>1</sup>, HAN Rong-jun<sup>2,3</sup>, LIU Jun<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Yima Coal Group Co., Ltd, Yima 472300, China)

**Abstract:** On account of increasingly frequent rock burst hazards at present, the theoretical basis of rock burst determination through P-wave velocity was analyzed based on the experiment relation model of stress and P-wave velocity. Meanwhile, the technology of rock burst risk assessment was established through seismic computed tomography detection, which contains assessment parameters of wave velocity anomaly  $A_n$  and wave velocity gradient anomaly  $VG$ . The criterion of these parameters was documented. Finally, the assessment technology was verified by practical application. The results show that P-wave velocity reflects the strength criterion, energy criterion and dynamic load criterion for rock burst as for the rock mass with the same properties. The seismic computed tomography detection technology is feasible for rock burst risk assessment. It can give guidance on the implement of risk relief measures and check the effect of the measures.

**Key words:** rock burst risk; P-wave velocity; seismic computed tomography; wave velocity anomaly; wave velocity gradient anomaly

随着煤炭开采深度和强度的增大,冲击矿压已成为煤矿普遍的安全问题<sup>[1]</sup>。这种工程灾害是煤岩变

形破裂动态演化导致的突发性灾害,对其诱发动态过程的监测、有效预警,是防止灾害发生的关键,也是世

收稿日期:2013-10-25 责任编辑:王婉洁

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2010CB226805);国家自然科学基金和神华集团有限公司联合资助项目(51174285);江苏高校优势学科建设工程资助项目(SZBF2011-6-B35)

作者简介:窦林名(1963—),男,青海平安人,教授,博士生导师。E-mail: lmdou@126.com。通讯作者:蔡 武(1988—),男,湖南桃江人,博士研究生。E-mail: aaacaiwu@126.com

界性难题,其监测预警研究是迫切需要解决的科技问题。

目前,冲击矿压的监测方法主要包括:微震监测<sup>[2-5]</sup>、电磁辐射监测<sup>[6-7]</sup>、声发射监测<sup>[8-9]</sup>、钻屑量监测<sup>[10]</sup>、应力监测<sup>[11-12]</sup>等。近年来,震动波 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,目前已成为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<sup>[13]</sup>。特别是将震动波 CT 技术和微震实时监测相结合,是冲击危险评价和预测的最新发展方向。根据其震源的来源不同,震动波 CT 技术可分为主动和被动两种。彭苏萍<sup>[14]</sup>、Du 等<sup>[15]</sup>将主动 CT 技术应用于地质构造勘探,采探对比分析表明,该技术探测精度高,构造线性成像明显。Friedel 等<sup>[16]</sup>利用主动 CT 技术研究了 Lucky Friday 银矿开采和残留矿柱区域上的应力分布特征,结果显示波速变化与开采引起的应力转移分布一致。窦林名等<sup>[17-18]</sup>采取主动 CT 方法在兖州济宁 3 号井煤矿 16302C 工作面研究了波速分布与强矿震分布的关系,发现强矿震落入冲击危险预警区域内的准确率较高,证明了主动 CT 方法在监测和预警冲击矿压或强矿震危险分布的可行性。王书文等<sup>[19-20]</sup>根据波速异常率和波速分区特征,将主动 CT 技术应用于采煤工作面内断层展布的探测和工作面超前支承压力分布的划定,并依此提出了冲击危险性评价模型。由于受到巷道分布和炸药激发震动波能量客观条件限制,主动 CT 技术监测强矿震或冲击危险的范围较小,并且实施该技术的劳动和经济成本也较高,导致该方法在应用推广方面受到了一定的限制。鉴于此缺点,Luo 等<sup>[21]</sup>将工作面采煤机连续割煤诱发的震动信号作为激发源,并在两巷布置若干检波器,对传统的主动 CT 进行了一次创新性的改进。Luxbacher<sup>[22]</sup>、Hosseini 等<sup>[23]</sup>采用被动 CT 技术,以自然发生的矿震作为激发源对工作面开采过程中的 P 波速度分布进行了反演,发现高应力支承压力区与高波速区吻合较好。Lurka<sup>[24]</sup>利用被动 CT 技术对波兰 Zabrze Bielszowice 等煤矿冲击危险进行评价,发现冲击或强矿震往往出现在高波速区和高波速变化梯度区。因此,震动波被动 CT 技术用于探测大范围冲击或强矿震危险分布是可行的,在冲击矿压危险研究上必将成为一个强有力的监测手段,是未来国内外发展的一个大趋势和方向。

本文在应力与纵波波速的试验关系模型基础上,分析了震动波 CT 技术探测评价冲击危险性的理论基础,构建了震动波 CT 探测技术指标及其判别临界值。最后,将该技术应用于现场冲击危险性的探测评

价和卸压解危措施实施的指导与效果检验,实践表明该技术应用效果良好。

## 1 震动波 CT 探测技术

### 1.1 理论基础

强度理论<sup>[25]</sup>认为,当煤岩体所受的应力超过煤岩体本身的强度极限,即满足强度条件,才有可能发生冲击矿压。关系式如下:

$$\frac{\sigma}{\sigma_c} \geq 1 \quad (1)$$

式中  $\sigma$  为煤岩体所受应力; $\sigma_c$  为煤岩体强度。

对于均质、各向同性连续介质体,震动波的传播与煤岩体物理力学参数及其在煤岩体中产生的动载荷<sup>[26]</sup>可表示为

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (2)$$

$$E = \frac{\rho v_s^2 (3v_p^2 - 4v_s^2)}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \sigma_{dp} = \rho v_p (v_{pp})_p \\ \tau_{ds} = \rho v_s (v_{pp})_s \end{cases} \quad (4)$$

式中  $v_p$ 、 $v_s$  分别为 P 波、S 波传播的速度; $\nu$  为泊松比  $0 \leq \nu \leq 0.5$ ;  $E$  为弹性模量; $\rho$  为煤岩介质密度; $\sigma_{dp}$ 、 $\tau_{ds}$  分别为 P 波、S 波产生的动载; $(v_{pp})_p$ 、 $(v_{pp})_s$  分别为质点由 P 波、S 波传播引起的峰值震动速度。

综上所述,对于同一性质的煤岩体,根据地震波的传播速度可确定煤岩体的物理力学特性。深入分析发现,地震波波速间接反映了冲击矿压发生的强度条件、能量条件和动载诱冲条件:

(1) 强度条件。研究结果<sup>[27]</sup>表明,应力与波速之间存在幂函数关系。即震动波速越高,所受应力越大,超过其煤岩体强度的可能性就越大,冲击危险性就越高,反映了强度条件。

(2) 能量条件。式(2)、(3)表明,弹性模量与波速在弹性阶段呈正相关关系。即波速越大,对应的弹性模量就越大,则煤岩体变形储存能量的能力越高,刚度也就越强,抵抗变形破坏的能力就越大,反映了能量条件。

(3) 动载诱冲条件。式(4)表明,震源能量越大,传播到煤岩介质质点速度的峰值速度就越大,动载荷就越高,越容易形成冲击。另外,对于同一性质的煤岩体,介质密度相等,此时,波速越高的区域受到强矿震扰动比其他低波速区域更容易形成冲击矿压。

### 1.2 技术原理

利用人工诱发或自然发生的一系列震源和井下

安置的一系列检波器 根据检波器与震源之间的距离  $L$  和检波器接收到的初至旅行时间  $T$  来反演波速分布  $V(x, y, z)$  或慢度  $S(x, y, z) = 1/V(x, y, z)$ 。假设第  $i$  个震动波的传播路径为  $L_i$ , 其旅行时为  $T_i$ , 具体关系<sup>[22]</sup> 可表示为

$$V = \frac{L}{T} \rightarrow VT = L \quad (5)$$

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

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

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。

震动波 CT 技术根据震源的来源不同可分为主动 CT 和被动 CT, 其中, 主动 CT 的震源位置已知, 而被动 CT 的震源位置未知(图 1)。对于新安装微震监测系统的煤矿, 需事先根据常值速度模型估计震源位置, 并作为模型输入的初始值。反演求解计算过程中, 每改变一次速度模型, 需重新进行震源位置的计算, 并修改传播射线的起点位置。按上述方式反复迭代计算, 直到残差小于给定阈值或达到最大迭代次数。为求解大规模问题, 本文采用 SIRT 迭代反演算法<sup>[28]</sup>。

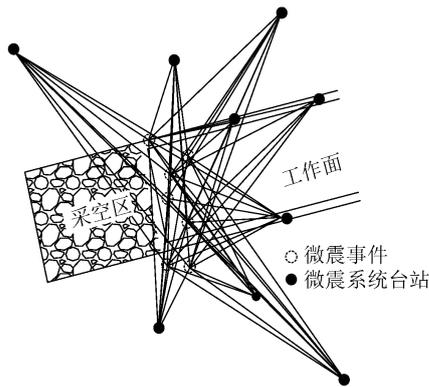


图 1 震动波 CT 探测技术示意

Fig. 1 Sketch map of seismic CT technology

### 1.3 评价指标的建立

岩层破裂需要应力及变形的空间条件, 如图 2 所示, 工作面开采后所形成的采空区导致上覆岩层重量加载到其临近的支撑区域 C, 形成一侧应力降低区与一侧高应力集中区, 在没有额外力的作用下, 两者的存在总是相辅相成的。由纵波波速与应力之间的试验关系模型知, 断裂带区域 A 对应一个低波速区, 而在应力集中区域则对应高波速区, 在这 2 个区域之间是从高波速向低波速过渡的一个区域, 即波速变化梯度较大的区域 B, 该区域的煤岩体在某一方向上的受约束能力相对较弱, 在载荷一致的情况下将比均匀受

载的煤岩体更易发生失稳破坏。研究<sup>[24]</sup> 亦表明, 强矿震不仅发生在高波速区域, 也发生在波速梯度变化明显的区域。所以梯度变化较大的区域也是冲击危险的区域。

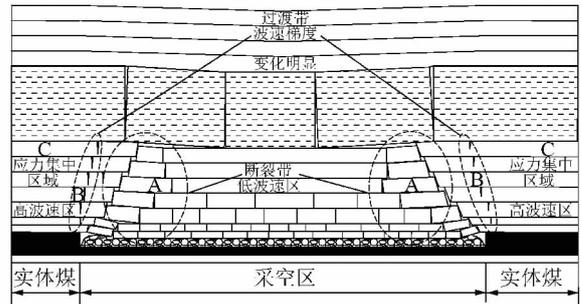


图 2 工作面开采后的上覆岩层结构及波速分布示意

Fig. 2 Vertical cross-section view of strata structure and distribution of velocity after excavation

如图 2 所示, C 区域应力高且集中程度大, 相对其他区域将出现纵波波速的正异常, 而 A 区域为应力降低区, 纵波波速将出现负异常。因此可构建震动波速异常系数  $A_n$  如下:

$$A_n = \frac{v_p - v_p^a}{v_p^a} \quad (8)$$

其中  $v_p^a$  为模型波速的平均值。表 1 为根据实验结果确定的波速正异常变化与应力集中程度之间的关系, 表 2 为波速负异常变化与煤岩体弱化程度之间的关系。

表 1 波速正异常变化与应力集中程度关系

Table 1 The relation between positive anomalies of wave speed and stress concentration

冲击危险指标	应力集中特征	波速正异常 $A_n$ /%	应力集中概率
0	无	< 5	< 0.2
1	弱	5 ~ 15	0.2 ~ 0.6
2	中等	15 ~ 25	0.6 ~ 1.4
3	强	> 25	> 1.4

表 2 波速负异常变化与弱化程度之间的关系

Table 2 The relation between negative anomalies of wave speed and weakening level

弱化程度	弱化特征	波速负异常 $A_n$ /%	应力降低概率
0	无	0 ~ -7.5	< 0.25
-1	弱	-7.5 ~ -15	0.25 ~ 0.55
-2	中等	-15 ~ -25	0.55 ~ 0.8
-3	强	< -25	> 0.8

针对 B 区域, 为利用波速变化的梯度值探测评

价冲击危险 构建如下波速梯度变化系数  $VG$  (单位为  $m/s^2$ ) [29]:

$$VG = v_p Grad \quad (9)$$

式中  $Grad$  为反演区域一点的波速变化梯度, 单位为  $1/s$ 。表 3 为  $VG$  值对应冲击危险性之间的关系。

表 3  $VG$  值与冲击危险之间的关系

Table 3 The relation between  $VG$  value and rock burst hazard level

冲击危险指标	异常对应的危险性特征	$VG$ 异常/( $km \cdot s^{-2}$ )
0	无	<0.05
1	弱	0.05 ~ 0.15
2	中等	0.15 ~ 0.25
3	强	>0.25

## 2 现场应用

### 2.1 某矿 25110 工作面概况

某矿 25110 工作面采深 1 000 m 左右(地面标高 + 551 ~ + 596 m, 工作面煤层标高 -390.0 ~ -451.6 m), 为 25 采区东翼第 1 个综放工作面, 平均采高 11 m, 主采 2-1 煤层。2-1 煤层平均厚度 11.5 m, 平均倾角 13°, 煤层上方依次为 18 m 泥岩直接顶、1.5 m 厚 1-2 煤、4 m 泥岩和 190 m 巨厚砂岩基本顶, 下方依次为 4 m 泥岩直接底和 26 m 砂岩基本底。井下四邻关系(图 3): 东为 23 采区下山保护煤柱, 南为 25 区下部未采煤层, 西为 25 采区下山保护煤柱, 北为 25090 工作面(一分层已采), 且 25110 上巷布置于 25090 采空区下方煤层中。

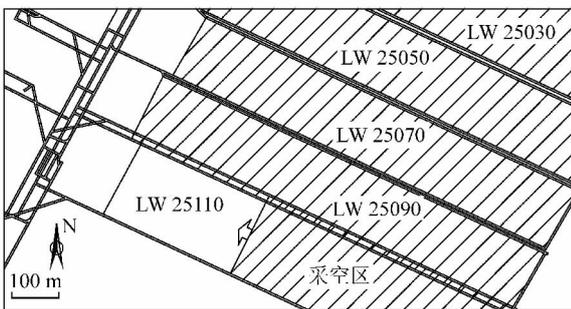


图 3 某矿 25110 工作面概况

Fig. 3 Layout of LW25110 in coal mine

### 2.2 震动波 CT 探测评价冲击危险

#### 2.2.1 探测设备与方案

震动波 CT 探测技术采用的设备为现场安装的微震监测系统, 探测方案如图 4 所示, 选取 2012-05-08-06-07 的震动波形作为反演数据。期间监测到微震事件总数 201 个, 其中满足条件的有效微震事件 101 个, 形成射线 599 条。大能量震动激发探头个

数较多, 对于接受探头总数超过 10 的震动事件, 进行震源定位时采用最多 10 个探头, 当中所有的 P 波首次到时的标记均由人工进行, 由此确定的震源分布如图 4 所示的空心圆。

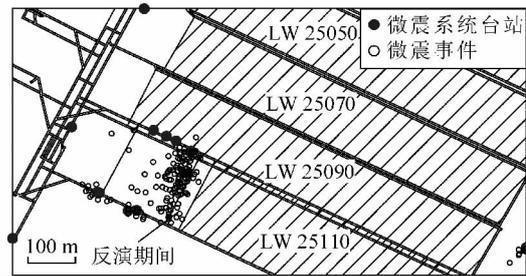


图 4 探测方案

Fig. 4 Detection scheme

对形成的射线进行波速统计, 得出最小波速 2.60 km/s, 最大波速 6.92 km/s, 平均波速 4.21 km/s。通过统计每个波速区间内的射线条数可知(图 5) P 波波速主要集中在 3.87 km/s 和 4.38 km/s 附近, 射线总数分别占总数的 52.6% 和 17.7%。统计分析说明该反演区域 P 波波速变化较大, 所以, 需建立层状模型进行计算, 网格划分为  $50 \times 28 \times 4$ ,  $X, Y, Z$  方向间距为  $30 m \times 30 m \times 133 m$  模型从上到下波速在 2.60 ~ 6.00 km/s 范围等梯度分布。

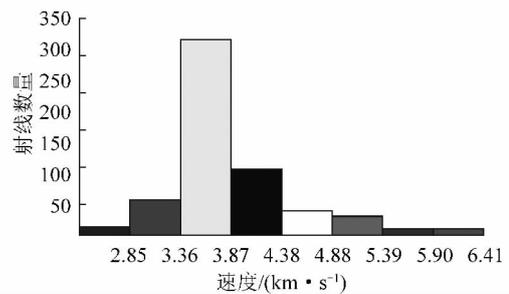


图 5 射线波速统计

Fig. 5 Statistics of ray velocity

#### 2.2.2 探测结果分析

选取 25110 工作面煤层平均标高 -400 m 水平切片的波速异常系数  $A_n$  和波速梯度变化系数  $VG$  等值线云图作为 25110 工作面的探测评价结果, 如图 6, 7 所示。根据波速正负异常变化与应力集中程度及弱化程度之间的关系(表 1, 2), 划分出 2 个强应力集中区域 B1 和 B2(图 6 中蓝色曲线圈出), 以及 3 个强弱化区域 R1, R2 和 R3(图 6 中红色曲线圈出)。另外, 根据波速梯度变化与冲击危险之间的关系(表 3), 划分出 5 个强冲击危险区域 G1, G2, G3, G4 和 G5(图 7 中黑色曲线圈出)。

(1) B1 区域。该区域的形成与工作面超前支承压力有关, 为冲击矿压频发区域。该区域走向上分布

范围为 100 m 左右,与现场实际的工作面超前支承压力影响范围基本一致。

(2) B2 区域。该区域为 25090 工作面终采线遗留煤柱影响区。25090 工作面回采结束后,遗留煤柱侧形成悬顶现象,进而在煤柱内侧形成侧向支承压力。随着 25110 工作面向终采线的靠近,25110 工作面超前支承压力将与该区域侧向支承压力叠加,此时该区域的冲击危险性将更为显著。

(3) R1, R2 区域。该区域为现场卸压措施实施区域,见 2.3 节介绍。

(4) G1, G2, G5 区域。该区域为实体煤向采空区过渡的区域,如图 2 所示的区域 B。

(5) G3 区域。该区域的形成与现场卸压措施实施有关。由于卸压措施的实施将松散煤岩体形成破碎带,使得该破碎带与实体煤之间形成一个过渡带,即波速梯度变化异常带。因此,当实体煤中应力集中程度较高时,实施卸压措施容易诱发冲击矿压灾害,此时施工人员应充分做好个体防护或远离施工区域。因此,该区域属于施工过程中的危险区域,至于施工后,该区域仍然属于卸压区域,不能作为下一时段的冲击危险区域。

(6) R3, G4 区域。该区域为因素未知区域。

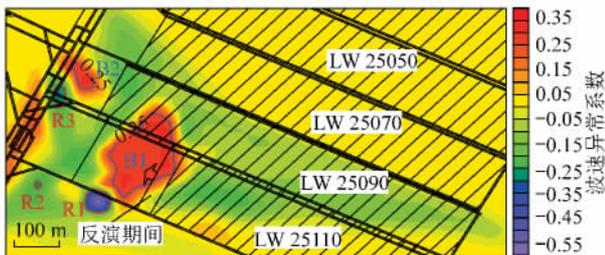


图 6 波速异常系数计算结果(-400 m 水平)

Fig. 6 Distribution of wave velocity anomaly(-400 m level)

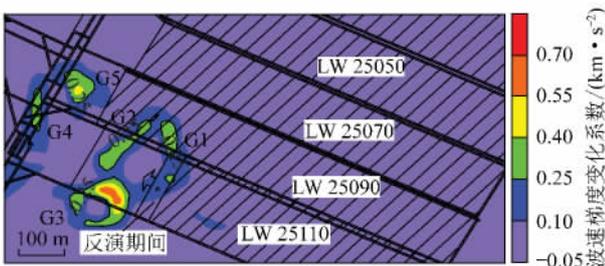


图 7 波速梯度变化系数计算结果(-400 m 水平)

Fig. 7 Distribution of wave velocity gradient anomaly(-400 m level)

2.2.3 探测结果验证

为验证探测评价结果,绘制了 2012-06-08-06-30 的微震事件震源分布,如图 8 所示。由图可知,大部分微震事件发生在 B1, G2 区域,同时在 B2,

G5 区域发生了一次能量为 10<sup>5</sup> J 的微震事件,而在 G3 区域仅发生了少量小能量微震事件,这与探测评价结果分析一致,从而验证了该技术的可靠性。

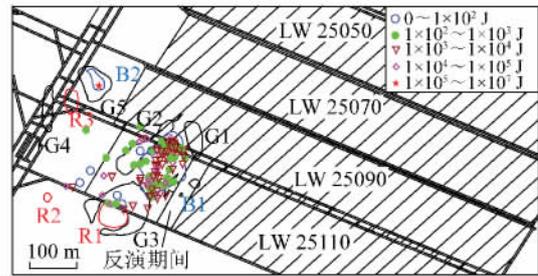


图 8 冲击危险区域及未来微震事件分布

Fig. 8 Rock burst risk area and the distribution of microseismic events afterward

2.3 震动波 CT 探测指导卸压解危

2.3.1 卸压解危措施实施

图 9 为 2012-04-16-05-08 期间的震动波 CT 探测结果,反演结果显示 5 个需要采取卸压措施的中等应力集中区域 A1, A2, A3, A4 和 A5。其中区域 A1 和 A2 位于采空区,远离工作面开采空间,卸压措施无法实施,同时该区域对工作面的安全也不构成威胁;区域 A3 和 A5 横穿工作面上下巷,由于 25110 工作面上巷位于采空区下方,卸压措施实施效果不佳,同时考虑到现场施工的难度,暂不在该区域的上巷采取卸压措施。最终确定在 A4 区域和 A3, A5 的下巷区域实施卸压措施,如图 10 所示。图中黑色直线表示大直径卸压钻孔、蓝色表示煤体卸压爆破钻孔、红色表示深孔断顶爆破钻孔,直线长度表示钻孔实际实施的深度。

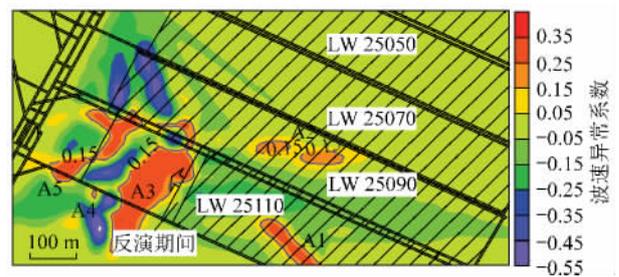


图 9 震动波 CT 探测评价结果

Fig. 9 Assessment result through seismic computed tomography

2.3.2 卸压解危措施效果检验

此次卸压解危措施效果检验采用 2012-05-08-06-07 期间的波速异常系数结果,如图 10 所示。

从图中可以看出, A4 区域和 A5 下巷区域实施卸压措施后,波速异常指数由正异常转为负异常,表明该区域应力下降幅度很高,说明卸压效果很明显; A3 下巷区域实施卸压措施后,该区域不仅呈现出波

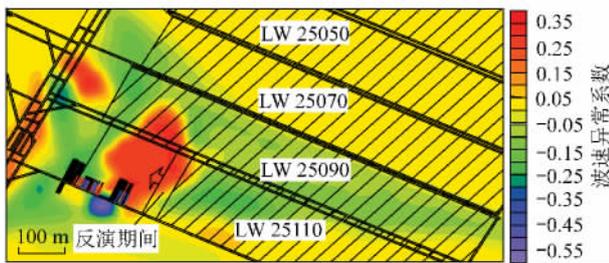


图 10 卸压措施实施方案及实施后波速异常系数分布

Fig. 10 Implement plan of risk relief measures and the distribution of wave velocity anomaly after the measures

速负异常,同时还表现出高波速梯度异常,表明该区域实施的卸压措施通过松散煤岩体形成了破碎带,该破碎带与实体煤之间的过渡正好表征出了高波速梯度异常,由此可以得出,高波速梯度异常在没有实施卸压措施的前提下才能表征高冲击危险性,而实施卸压措施后的高波速梯度异常应表征卸压措施效果的有效性,即弱化程度的显著性。综上所述,震动波 CT 探测技术能很好地对各项卸压解危措施进行效果检验。

### 3 结 论

(1) 对于同一性质的岩体,纵波波速反映了冲击矿压发生的强度条件、能量条件和动载诱冲条件:波速越高,所受应力越大,超过其煤岩体强度的可能性就越大;波速越高,对应的弹性模量越大,煤岩体变形储存能量的能力越高,刚度也就越强,抵抗变形破坏的能力就越大;对于波速越高的区域受到强矿震扰动比其他低波速区域更容易形成冲击矿压。

(2) 由波速异常系数  $A_n$  和波速梯度异常系数  $VG$  组成的震动波 CT 探测技术能够对现场冲击危险性做出动态评价,并能对卸压解危措施的实施和效果进行指导和检验。

(3) 高波速梯度系数在没有实施卸压措施的前提下才能表征高冲击危险性,而实施卸压措施后的高波速梯度异常应表征卸压措施效果的有效性,即弱化程度的显著性。

#### 参考文献:

[1] 何满潮,钱七虎. 深部岩体力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
He Manchao, Qian Qihu. The basis of deep rock mechanics [M]. Beijing: Science Press 2010.

[2] 姜福兴,杨淑华,成云海,等. 煤矿冲击地压的微地震监测研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1511-1516.  
Jiang Fuxing, Yang Shuhua, Cheng Yunhai, et al. A study on micro-seismic monitoring of rock burst in coal mine [J]. Chinese Journal Geophysics 2006, 49(5): 1511-1516.

[3] 陆菜平, 窦林名, 王耀峰, 等. 坚硬顶板诱发煤体冲击破坏的微震效应[J]. 地球物理学报, 2010, 53(2): 450-456.  
Lu Caiping, Dou Linming, Wang Yaofeng, et al. Microseismic effect of coal materials rockburst failure induced by hard roof [J]. Chinese Journal Geophysics 2010, 53(2): 450-456.

[4] 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): 2011-2015.  
Xia Yongxue, Kang Lijun, Qi Qingxin, et al. Five index of microseismic and their application in rock burst forecastion [J]. Journal of China Coal Society 2010, 35(12): 2011-2015.

[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.  
Lü Jinguo, Pan Li. Microseismic predicting coal bump by time series method [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 2002-2005.

[6] He X Q, Chen W X, Nie B S, et al. Electromagnetic emission theory and its application to dynamic phenomena in coal-rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(8): 1352-1358.

[7] Wang E Y, He X Q, Wei J P, 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.

[8] 齐庆新, 季首滨, 王淑坤. 地音监测技术及其在矿压监测中的应用研究[J]. 煤炭学报, 1994, 19(3): 221-232.  
Qi Qingxin, Li Shoubin, Wang Shukun. Application of AE technique in monitoring ground pressure [J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(3): 221-232.

[9] 贺虎, 窦林名, 巩思园, 等. 冲击矿压的声发射监测技术研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1262-1268.  
He Hu, Dou Linming, Gong Siyuan, et al. Study of acoustic emission monitoring technology for rockburst [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1262-1268.

[10] Gu S T, Wang C Q, Jiang B Y, et al. Field test of rock burst danger based on drilling pulverized coal parameters [J]. Disaster Advance, 2012, 5(4): 237-240.

[11] 王平, 姜福兴, 王存文, 等. 冲击地压的应力增量预报方法[J]. 煤炭学报, 2010, 35(S): 5-9.  
Wang Ping, Jiang Fuxing, Wang Cunwen, et al. The stress incremental forecasting method of rock burst [J]. Journal of China Coal Society 2010, 35(S): 5-9.

[12] 曲效成, 姜福兴, 于正兴, 等. 基于当量钻屑法的冲击地压监测预警技术研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2346-2351.  
Qu Xiaocheng, Jiang Fuxing, Yu Zhengxing, et al. Rockburst monitoring and precaution technology based on equivalent drilling research and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2011, 30(11): 2346-2351.

[13] Zhao Yongguo, Li Qin, Guo Hong, et al. Seismic attenuation tomography in frequency domain and its application to engineering [J]. Science in China (Series D), 2000, 43(4): 431-438.

[14] 彭苏萍, 凌标灿, 刘盛东. 综采放顶煤工作面地震 CT 探测技术

- 应用[J]. 岩石力学与工程学报 2002 21(12):1786-1790.
- Peng Suping ,Ling Biaocan ,Liu Shengdong. Application of seismic tomography in longwall top-coal caving face [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2002 21(12):1786-1790.
- [15] Du Lizhi ,Zhang Xiaopei ,Niu Jianjun ,et al. The Seismic CT method in measuring rock bodies [J]. Applied Geophysics ,2006 ,3(3):192-195.
- [16] 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.
- [17] Dou Linming ,Chen Tongjun ,Gong Siyuan ,et al. Rockburst hazard determination by using computed tomography technology in deep workplace [J]. Safety Science 2011 50(4):736-740.
- [18] He Hu ,Dou Linming ,Li Xuwei ,et al. Active velocity tomography for assessing rock burst hazards in a kilometer deep mine [J]. Mining Science and Technology 2011 21(5):673-676.
- [19] 王书文 ,徐圣集 ,蓝 航 ,等. 地震 CT 技术在采煤工作面的应用研究 [J]. 煤炭科学技术 2012 40(7):24-27.
- Wang Shuwen ,Xu Shengji ,Lan Hang ,et al. Study on seismic CT technology applied to coal mining face [J]. Coal Science and Technology 2012 40(7):24-27.
- [20] 王书文 ,毛德兵 ,杜涛涛 ,等. 基于地震 CT 技术的冲击地压危险性评价模型 [J]. 煤炭学报 2012 37(S1):1-6.
- Wang Shuwen ,Mao Debing ,Du Taotao ,et al. Rockburst hazard evaluation model based on seismic CT technology [J]. Journal of China Coal Society 2012 37(S1):1-6.
- [21] Luo X ,King A ,Van deWerken M. Tomographic imaging of rock conditions ahead of mining using the shearer as a seismic source-a feasibility study [A]. Remote Sensing [C]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2009 47(11):3671-3678.
- [22] Luxbacher K ,Westman E ,Swanson P ,et al. Three-dimensional time-lapse velocity tomography of an underground longwall panel [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 2008 45(4):478-485.
- [23] Hosseini N ,Oraee K ,Shahriar K ,et al. Passive seismic velocity tomography and geostatistical simulation on longwall mining panel [J]. Archives of Mining Sciences 2012 57(1):139-155.
- [24] Lurka A. Location of high seismic activity zones and seismic hazard assessment in Zabrze Bielszowice coal mine using passive tomography [J]. Journal of China University of Mining & Technology , 2008 18(2):177-181.
- [25] 窦林名 ,何学秋. 冲击矿压防治理论与技术 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社 2001.
- Dou Linming ,He Xueqiu. Theory and technology of rockburst prevention [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press 2001.
- [26] 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.
- Dou Linming ,He Xueqiu. Mining geophysics [M]. Beijing: China Science and Culture Press 2002.
- [27] 巩思园 ,窦林名 ,徐晓菊 ,等. 冲击倾向煤岩纵波波速与应力关系试验研究 [J]. 采矿安全与工程学报 2012 29(1):67-71.
- Gong Siyuan ,Dou Linming ,Xu Xiaojun ,et al. Experimental study on the correlation between stress and P-wave velocity for burst tendency coal-rock samples [J]. Journal of Mining & Safety Engineering , 2012 29(1):67-71.
- [28] Hosseini N ,Oraee K ,Shahriar K ,et al. Passive seismic velocity tomography on longwall mining panel based on simultaneous iterative reconstructive technique(SIRT) [J]. Journal of Central South University 2013 19(8):2297-2306.
- [29] 巩思园. 矿震震动波波速层析成像原理及其预测煤矿冲击危险应用实践 [D]. 徐州: 中国矿业大学 2010.
- Gong Siyuan. Research and application of using mine tremor velocity tomography to forecast rockburst danger in coal mine [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology 2010.