

桂兵,李成海,刘体军,等. 基于震动波CT反演的巷道掘进超前探测技术研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(2): 023015.

GUI Bing, LI Chenghai, LIU Tijun, et al. Research on advanced detection technology of roadway excavation based on vibration wave CT inversion[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(2): 023015.

基于震动波CT反演的巷道掘进超前探测技术研究

桂兵¹,李成海^{2,3},刘体军¹,王九红¹,郑有雷¹,巩思园²

(1. 兖州煤业股份有限公司, 山东 邹城 273500; 2. 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; 3. 徐州弘毅科技发展有限公司, 江苏 徐州 221008)

摘要:针对巷道掘进诱发冲击地压的难题,基于震动波CT反演原理和波速SIRT算法,研发出1种可实现井下主、被动震动波信号实时采集与CT反演的巷道掘进超前探测技术。该技术能实时监测掘进巷道超前位置以及工作面区域的震源分布,形成穿透煤岩层的高密度射线覆盖,生成大范围、高分辨率的波速反演云图,进而分析掘进巷道超前应力分布。以济三煤矿183_下05掘进工作面为例进行研究,结果表明:震动波CT反演云图能得出掘进巷道超前应力集中分布区域,经过钻屑法的检验证明该区域属于高应力危险集中区,从而验证该技术能实时探测巷道掘进工作面周边的应力分布,应用效果良好。

关键词:震动波;CT反演;实时探测;掘进巷道;超前应力

中图分类号:TD324

文献标志码:A

文章编号:2096-7187(2021)02-3015-08

Research on advanced detection technology of roadway excavation based on vibration wave CT inversion

GUI Bing¹, LI Chenghai^{2,3}, LIU Tijun¹, WANG Jiuhong¹, ZHENG Youlei¹, GONG Siyuan²

(1. Yanzhou Coal Mining Company Limited, Zoucheng 273500, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Xuzhou Hongyi Science and Technology Development Company Limited, Xuzhou 221008, China)

Abstract: In order to solve the problem of rock burst induced by roadway excavation, the advance detection technology for roadway excavation is developed based on the principle of vibration wave CT inversion and SIRT algorithm, which can realize the real-time acquisition and CT inversion of underground active and passive seismic wave signals. This technology can monitor the advance position of the driving roadway and the source distribution of the working face area in real time, form the high-density ray coverage penetrating the coal seam, generate the large-scale and high-resolution wave velocity inversion nephogram, and then analyze the advance stress distribution of the driving roadway. Taking the 183 lower 05 driving face of Jisan coal mine as an example, the research shows that the inversion nephogram of seismic wave CT can obtain the distribution areas of stress concentration in advance of driving, which is proved to be a high stress dangerous concentration area using drilling cuttings method. This suggests that that the technology can detect the stress distribution around the driving head in real time.

收稿日期:2020-06-08

修回日期:2020-07-30

责任编辑:李青

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874292, 51934007)

作者简介:桂兵(1976—),男,安徽安庆人,高级工程师,主要从事煤矿冲击地压防治、顶板控制与管理技术工作。E-mail:guibing0306@126.com

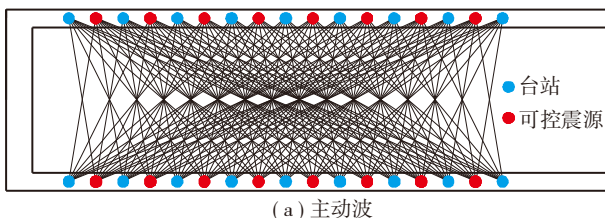
通信作者:李成海(1993—),男,山东济宁人,硕士,主要从事巷道围岩控制、冲击地压监测预警及防治技术的研究工作。E-mail:lchai2016@163.com

Key words: vibration wave; CT inversion; real-time detection; excavation roadway; advanced stress

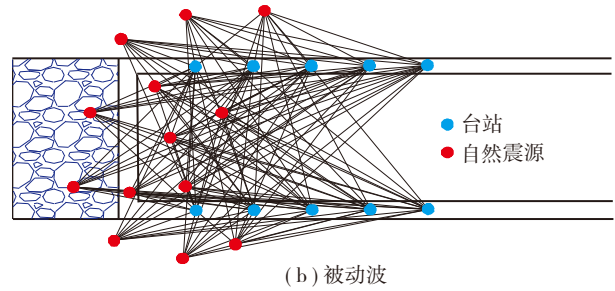
煤矿开采造成的矿山压力问题与井下煤岩体应力条件之间存在紧密关系^[1-2],通过研究煤岩体的应力分布规律进而建立井下矿山压力与矿山压力显现之间的联系,是目前常用的研究手段之一。国内外学者通过大量试验研究得出^[3-6],震动波波速随着井下应力的增大而增加,而煤岩体处于高应力状态时易诱发冲击地压。国内外学者通过研究主、被动源激发的震动波层析成像(CT)反演,先后在确定震源位置、分析高应力梯度区域和冲击地压危险区域以及探究波速异常变化与应力变化的关系进行了研究^[7-11],探究不同震源激发下震动波CT反演评价指标、冲击地压危险预警指标和判别标准的构建,研究成果均表明震动波CT反演用于探测井下冲击危险或高应力区域是可行的^[12-18]。但利用震动波CT反演技术研究巷道掘进超前应力分布规律的技术尚不成熟,且目前大部分CT反演技术的反演周期长,本文基于震动波CT反演原理,提出1种实时监测井下震动波信号的巷道掘进超前探测技术,通过CT反演技术对掘进工作面周边的波速分布实时监测,进而反演分析其应力分布规律。通过该技术的研究及应用,对井下巷道安全掘进、生产以及预防掘进巷道冲击地压的发生具有重要意义。

1 震动波CT反演原理与计算

震动波CT反演主要分为主动波(可控震源)CT反演和被动波(自然震源)CT反演。对于主动波CT反演,根据已知的震源位置(即人工击打或放炮激发的震源),布置接收震动波信号的台站,形成对采掘工作面封闭的波形穿透射线覆盖,进而进行波速CT反演,如图1(a)所示;而对于被动波CT反演,震源位置是未知的,一般为采掘活动引起的矿震,通过台站接收采掘工作面区域内的矿震信号,形成对该区域的穿透射线覆盖,再进行波速CT反演,如图1(b)所示。



(a) 主动波



(b) 被动波

图1 震动波CT反射线覆盖示意

Fig. 1 Schematic diagram of ray coverage of vibration wave CT inversion

主、被动波2种反演形式均通过建立速度模型对震动波速度进行计算,而建立速度模型是为了使台站接收震动波标记的到时时间理论计算值与井下实际值相同。其中,理论计算震动波到时时间的公式^[19]为

$$t_i = \int_{\Gamma_i} \frac{1}{v(x, y, z)} dx + t_0 = \int_{\Gamma_i} S(x, y, z) dx + t_0 \quad (1)$$

式中, t_i 为震动波理论到时时间; t_0 为震源发生震动的时间; Γ_i 为震动波传播的第*i*条射线,*i*取1,2,⋯,*n*,*n*为台站数; $S(x, y, z)$ 表示某位置点(*x*,*y*,*z*)的慢度矢量值,其值等于 $1/v(x, y, z)$, $v(x, y, z)$ 为速度矢量值。

SIRT算法(联合迭代重建技术算法)是迭代算法中计算震动波波速较简单、最有效的方法。通过建立三维网格速度模型,设置每个节点的速度,在三维网格中任意一个像元的速度值均由其周边8个节点的速度值得得,从而创建含8个节点速度的三维模型,如图2所示。

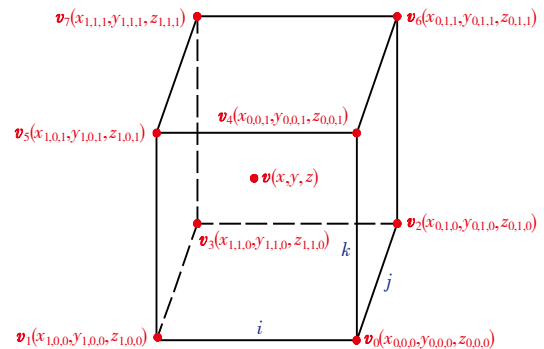


图2 像元 $v(x, y, z)$ 周边8个节点速度示意

Fig. 2 Velocity diagram of 8 nodes around image element $v(x, y, z)$

按照以上三维速度模型,根据震动波CT反演的

SIRT算法^[19-20], 得出三维速度模型中像元 $v(x, y, z)$ 的速度求解公式为

$$v(x, y, z) = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 v(x_{i,j,k}, y_{i,j,k}, z_{i,j,k}) \left[\left(1 - \left| \frac{x - x_{i,j,k}}{x_{1,0,0} - x_{0,0,0}} \right| \right) \left(1 - \left| \frac{y - y_{i,j,k}}{y_{1,0,0} - y_{0,0,0}} \right| \right) \left(1 - \left| \frac{z - z_{i,j,k}}{z_{1,0,0} - z_{0,0,0}} \right| \right) \right] \quad (2)$$

式中, i, j, k 表示三维坐标系上的单位长度。

按照式(2)计算震动波CT反演中的波速值, 从而得出CT反演区域的震动波波速值, 进一步分析反演区域的应力异常值。

2 巷道掘进超前探测技术及原理

2.1 掘进巷道超前应力探测技术

基于震动波CT反演原理与计算方法, 研发出用于掘进巷道超前应力探测、冲击地压危险区域划分以及危险程度评价的监测技术。其中, 震动波CT反演技术主要适用于冲击地压矿井采掘工作面的局部应力监测, 当工作面地质构造复杂、煤层含水率高以及钻屑法和应力在线监测法不能正常使用时, 多采用震动波CT反演技术对采掘区域的异常应力进行实时监测。

掘进巷道超前应力探测技术采用双触发机制实现双源震动波信号(即可控震源和自然震源)的采集和分析, 利用SIRT算法对震动波波速进行计算、反演, 从而对掘进巷道区域实现大范围、高分辨率和高效率的监测和应力反演分析, 确定掘进巷道超前区域内的应力分布规律, 划分冲击危险区域, 以便及时有针对性地进行指导现场采取有效的防冲或防突措施。

另外, 该技术主要包括地面和井下2部分, 具体组成如图3所示, 其中井下设备主要包括监测分站、传感器、光纤、不同型号的电缆和接线盒等。软件系统由监测软件和波速反演软件2部分组成, 其中波速反演软件是震动波CT反演的重要部分。

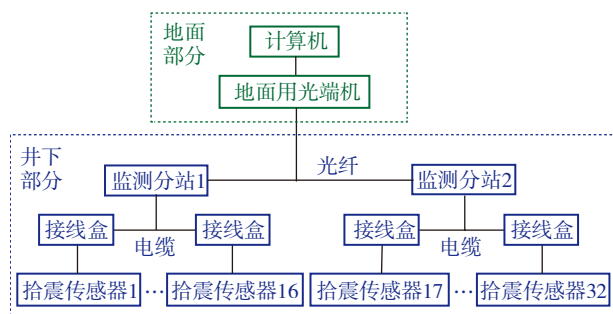


图3 巷道掘进超前探测技术的设备组成

Fig. 3 Equipment composition of advanced detection technology of roadway excavation

2.2 工作原理

(1) 监测原理

井下震动信号通过传感器将震动的机械信号转换成电信号, 经过处理, 转换成数字信号。同时, 传感器将震动数据进行编码, 发送到监测分站。监测分站接收多路传感器的数据, 加入时间同步形成文件, 监测分站一方面存储数据文件, 另一方面将文件按照网络协议进行编码, 通过井下光纤传输到地面用光端机, 光纤中的光信号经地面用光端机转换成以太网信号, 最后传输到监测计算机, 并存储到指定文件以便后期使用。

(2) CT反演原理

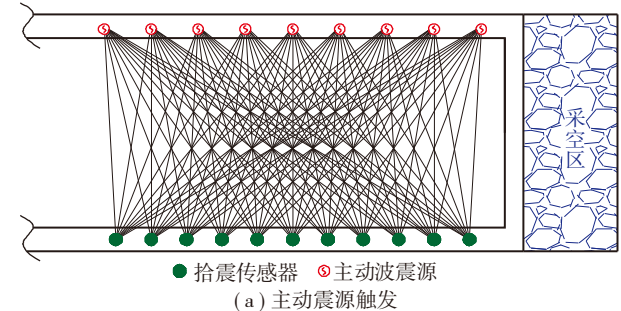
巷道掘进超前探测技术可分为主动源触发和被动源触发2种状态, 不同触发状态下的CT反演原理相同, 区别在于针对不同震源监测前应更换不同的触发状态, 然后再对震动波信号进行采集、存储、处理直至进行CT反演。

针对不同震源触发状态下的波形进行分类储存, 同一震源下的波形信号会对采掘工作面形成高密度射线覆盖, 如图4所示。其中, 每个震源生成的波形均由软件自动或人工进行到时标记与分析, 波形到时标记如图5所示, 图中红色、蓝色标记分别为震动波波形的起始时间和结束时间。相同震源下已标记好的大量波形数据, 基于震动波CT反演原理和计算方法, 划分网格模型, 执行SIRT波速算法, 从而完成采掘工作面区域内震动波波速的CT反演, 生成波速分布云图。

3 掘进巷道超前探测技术应用及分析

3.1 试验工作面概况

济三煤矿十八采₃下回风巷的北侧是183_下05工



● 拾震传感器 ● 主动波震源
(a) 主动震源触发

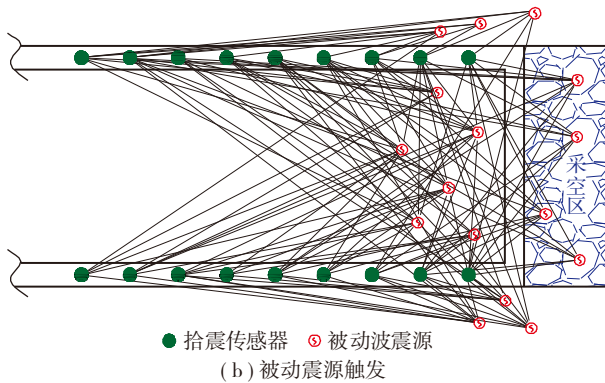


图4 不同震源激发下射线覆盖示意

Fig. 4 Schematic diagram of ray coverage under excitation of different seismic sources

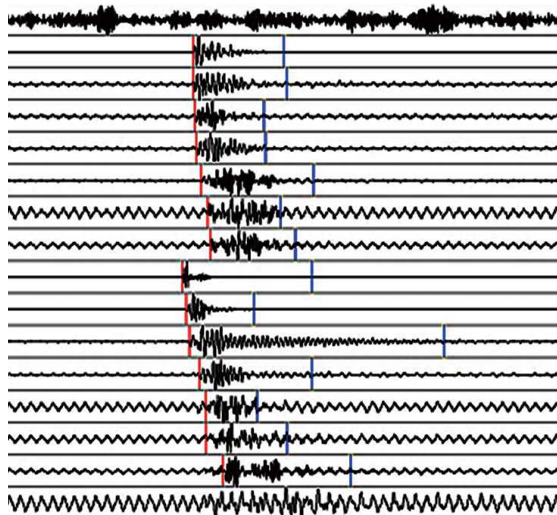


图5 震动波波形到时标记

Fig. 5 Mark of arrival time of vibration wave

作面, 平均埋深-805.95 m, “刀把”段宽度为214 m, “扩面”段宽度278 m, 走向推进长度2 013.6 m。3_下煤层为该工作面主采煤层, 该煤层主要煤质是亮煤, 有少量暗煤, 并夹含有镜煤, 煤层含有发育内生裂隙, 断口呈阶梯型。3_下煤厚度为1.90 ~ 5.54 m, 平均煤厚4.24 m, 倾角最大10°, 平均3°。3_下煤层与3_上煤层间距为7.01 ~ 43.0 m, 平均34.4 m, 其中, 183_下05工作面局部钻孔柱状图如图6所示, 煤层顶底板岩性特征见表1。

183_下05工作面胶带运输巷、辅助运输巷均通过联络巷与十八采3_下回风巷贯通, 如图7所示。其中, 采用沿空掘进的辅助运输巷, 其净煤柱宽为3.5 m。183_下05工作面主要地质构造有背斜、向斜、断层以及局部受冲刷煤层变薄等, 其中断层均为发育的正断层, 最大落差为5.0 m, 工作面不受岩浆岩侵入影响且无陷落柱。

柱状	层序号	累深/m	厚度/m	岩石名称
	95	809.17	3.95	3 _上 煤
.....	96	812.67	3.50	粉砂岩
.. .. .	97	816.18	3.51	中粒砂岩
	98	820.42	4.24	3 _下 煤
.....	99	822.42	2.00	粉砂岩
.....	100	825.07	2.65	细粒砂岩

图6 183_下05工作面钻孔柱状图

Fig. 6 Drilling histogram of 183 lower 05 working face

表1 183_下05工作面顶底板岩性特征

Table 1 Lithologic characteristics of roof and floor of 183 lower 05 working face

顶底板名称	岩石名称	厚度/m	岩性特征
基本顶	粉砂岩	3.50	深灰色, 裂隙发育, 方解石充填, 具有较多错动滑面, 完整性差
直接顶	中砂岩	3.51	灰白色, 成分主要为石英, 其次为长石, 含少量暗色矿物, 裂隙发育, 充填有方解石脉, f 取8 ~ 10
直接底	粉砂岩及细砂岩	4.65	粉砂岩: 深灰色, 断口较平, 局部含少量细砂质, 充填有方解石脉及晶簇, 含黄铁矿豆状结核, f 取4 ~ 6 细砂岩: 浅灰色, 成分主要为石英, 其次为长石, 含少量暗色矿物。黏土质胶结, 较坚实, f 取6 ~ 8
基本底	中砂岩	13.30	与直接顶的中砂岩岩性相同, 裂隙发育, f 取8 ~ 10

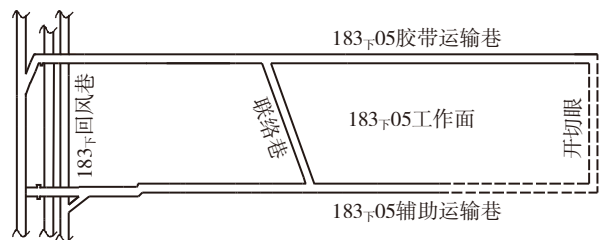
图7 183_下05工作面平面

Fig. 7 183 lower 05 working face plan

3.2 方案设计及布置

(1) 方案设计思路

为研究183_下05工作面掘进巷道冲击地压危险超前探测技术, 根据工作面地质资料以及相关采掘规程等, 基于巷道掘进超前探测技术的工作原理, 在183_下05工作面胶带运输巷、辅助运输巷、联络巷以及后期贯通后的开切眼位置布置传感器, 作为该

技术监测183_F05工作面及其掘进巷道发生震源的台站。

目前, 183_F05工作面胶带运输巷即将掘进至开切眼位置, 工作面开切眼未贯通, 而183_F05工作面辅助运输巷掘进至距联络巷250 m左右。所以, 若183_F05工作面胶带运输巷已掘进至开切眼, 并且开切眼也已贯通, 而183_F05工作面辅助运输巷正在掘进, 则以183_F05工作面辅助运输巷掘进工作面为中心点, 在其周边布置传感器, 形成包围封闭的空间, 对其包围区域的震源、高应力分布以及冲击地压危险区域进行监测, 方案设计原理如图8所示, 其中射线覆盖密度越大区域, 震动波CT反演结果越准确。

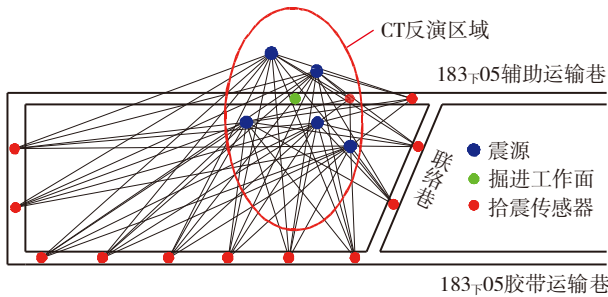


图8 183_F05工作面辅助运输巷超前探测方案设计

Fig. 8 Design of advance detection scheme for auxiliary transportation in 183 lower 05 working face

另外, 若183_F05工作面开切眼未贯通, 而183_F05工作面胶带运输巷已掘进至开切眼位置, 则在胶带运输巷中增加传感器布置数量, 尤其在超过辅助运输巷掘进工作面的胶带运输巷范围内加大传感器布置密度。因传感器布置密度加大, 对辅助运输巷掘进工作面周边的震源形成大范围的监测, 从而使掘进工作面周边形成一定程度的射线覆盖, 对巷道掘进工作面超前应力分布进行有效地监测与分析。

(2) 台网布置方案

为了配合183_F05工作面巷道实际掘进工作进度, 目前, 在183_F05工作面共布置8个传感器, 间距平均取100 m。其中183_F05胶带运输巷布置4个传感器, 最后1个传感器距离掘进工作面300 m左右, 因中间有封闭墙暂时无法安装; 已掘进的联络巷布置2个传感器, 183_F05辅助运输巷实际布置2个传感器, 最后1个传感器距离掘进工作面约50 m。具体实际布置情况如图9所示。

3.3 183_F05辅助运输巷掘进CT反演及分析

选取183_F05工作面连续3 d采集的有效震动波

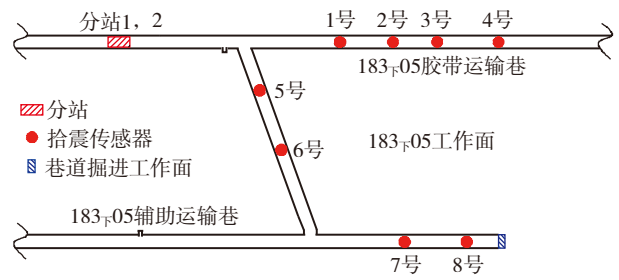


图9 183_F05工作面辅助运输巷技术方案布置

Fig. 9 Technical scheme layout of auxiliary transportation in 183 lower 05 working face

数据进行处理, 有效的波形数据达到72个, 符合震动波CT反演的技术要求。其中, 有效震源位置主要集中在183_F05辅助运输巷掘进位置周边, 工作面区域内震源射线覆盖如图10所示, 图中红点代表传感器台站位置, 蓝点代表震源位置, 红框区域表示掘进工作面附近震源。其中该掘进工作面震源主要由于巷道掘进引起上覆岩层扰动, 造成覆岩断裂、破坏、下沉形成的。

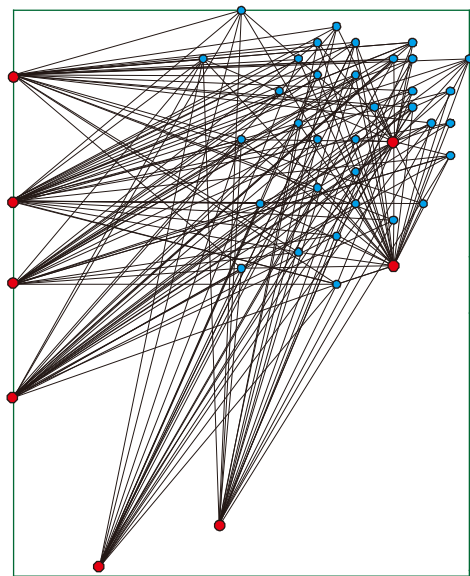


图10 183_F05工作面震源射线覆盖

Fig. 10 Seismic source ray coverage map of 183 lower 05 working face

(1) CT反演及分析

基于震动波CT反演原理, 根据已标记好的震动波到时时间(图5为标记好的波形)以及CT反演所需的震源射线覆盖区域图(图10), 采用SIRT算法, 对传感器接收震源的每条射线分别进行波速计算, 从而得出射线覆盖区域的震动波波速分布情况, 并生成由不同颜色深浅表示波速大小的云图, 如图11所示。通过对反演区域垂直方向(Z轴)按照一定深度

划分不同切片,得出不同切片的波速反演云图,其中图11(a)是183_F05工作面-826~-757 m水平的波

速CT反演云图,图11(b)是-757~-658 m水平的波速CT反演云图。

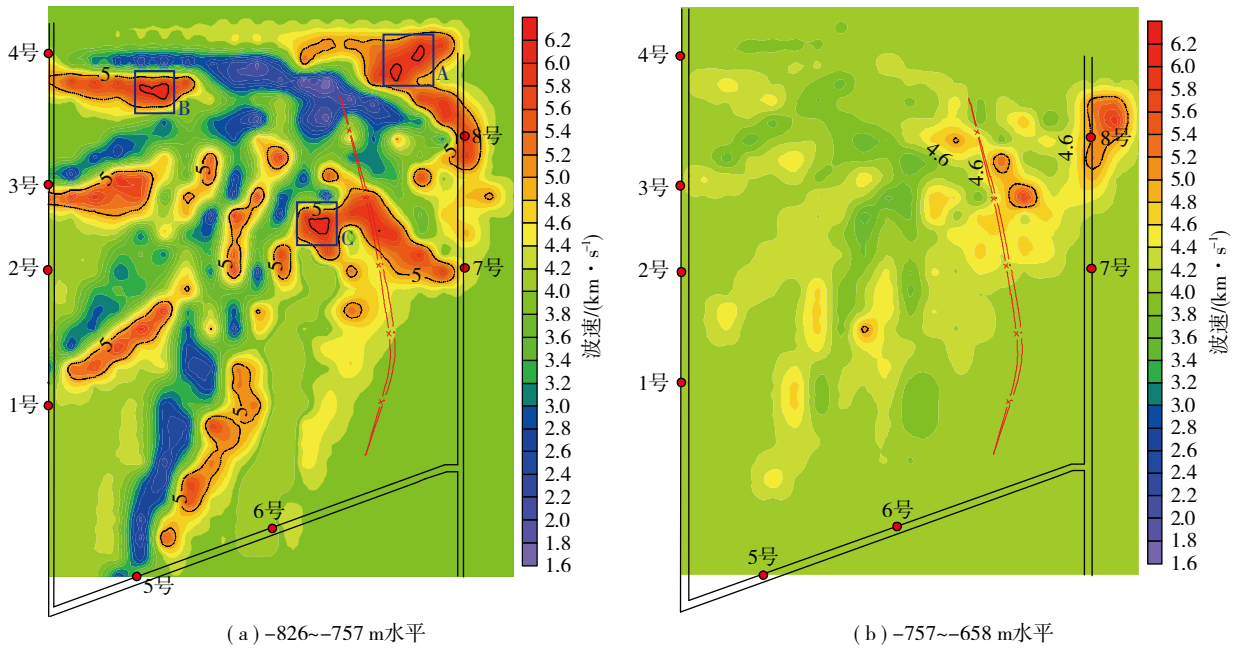


图11 不同水平的震动波波速CT反演云图

Fig. 11 Cloud image of CT inversion by vibration wave velocity at different levels

由图11可知,183_F05工作面在不同水平的震动波波速分布情况不同,其中-826~-757 m水平震动波波速大于5 km/s的区域较多,主要分布于183_F05辅助运输巷掘进工作面附近及其帮部周边、183_F05胶带运输巷实体煤帮附近以及断层等地质构造带附近,大于6 km/s的区域主要有3个(图中A,B,C区域);而-757~-658 m水平波速大于5 km/s的区域较少,主要靠近183_F05辅助运输巷掘进工作面后方20 m左右位置,无波速大于6 km/s的区域。

通过以上分析可知,由于183_F05工作面平均标高为-773.3 m,平均埋深为805.95 m,所以以-826~-757 m水平震动波波速分布情况作为该工作面CT反演的结果。根据震动波波速大小与应力大小之间存在正相关关系可知^[1-2],图11(a)应力分布与波速分布情况相同,高应力区主要集中分布在183_F05辅助运输巷掘进工作面20 m范围内靠近工作面内部(图中A区域)、与辅助运输巷掘进工作面位置相齐平的靠近183_F05胶带运输巷实体煤帮(图中B区域)以及断层附近(图中C区域)。而较大应力主要分布于183_F05辅助运输巷掘进工作面前后方约100 m范围以及183_F05胶带运输巷帮部位置。

(2) 效果验证

对于图11(a)中183_F05辅助运输巷掘进工作面A区域,该矿为验证该区域的高应力对此区域采取钻屑法来观察煤粉量以及动力现象,其中此区域的钻屑技术布置方案及参数如图12所示,监测钻孔布置:钻孔直径42 mm,孔深10 m,间距10 m,孔距底板1.2 m,单排布置,钻孔方向平行于煤层,垂直巷帮。

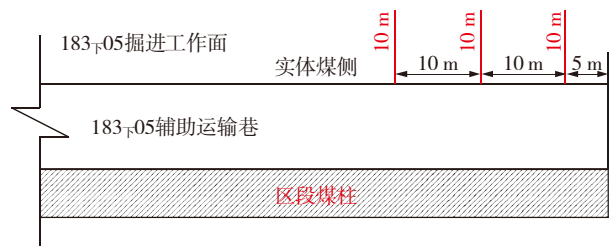


图12 183_F05辅助运输巷工作面钻屑监测布置

Fig. 12 Arrangement of monitoring the drilling cuttings in 183 lower 05 auxiliary transportation working face

通过观察监测区域的煤粉量以及动力现象得出:监测A区域的煤粉量接近该矿掘进巷道的临界指标值(该矿临界指标值取3.4 kg),且钻孔过程中出现卡钻、吸钻等动力现象,初步认为该区域属于较高应力集中分布区,与该区域波速分布CT反演的结果相同(即A区域波速大于6 km/s),从而验证了巷道掘进超前探测技术能成功探测掘进位置周边的应

力分布以及冲击地压危险区域,应用效果良好。因此,通过利用该技术对掘进巷道进行超前应力探测,该矿能及时做好卸压工作,对掘进工作面制定防冲措施以及井下安全生产具有重要意义。

4 结 论

(1)基于震动波CT反演原理与计算方法,研发出1种冲击地压矿井掘进巷道超前应力探测技术,该技术采用双触发机制实现双源震动波信号的实时监测,并利用巷道掘进工作面周边震源形成对其高密度波速射线覆盖,超前探测巷道掘进工作面异常应力,分析应力分布规律,确定高应力集中区以及冲击危险区域。

(2)以济三煤矿183_下05掘进工作面为例,针对工作面开切眼是否贯通的2种情况,对辅助运输巷掘进工作面超前应力探测分别提出针对性处理办法,有效地对掘进工作面周边震源实时监测,形成高密度射线覆盖。根据震动波CT反演云图,探测掘进工作面超前异常应力,分析应力分布规律。

(3)通过比较分析183_下05工作面-826 ~ -757 m水平震动波CT反演云图,得出辅助运输巷超前异常应力主要集中分布于掘进工作面超前20 m范围以及断层周边,对该区域采用钻屑法监测,根据煤粉量以及动力现象成功验证该区域属于高应力集中区,从而证明该技术能实时探测巷道掘进工作面周边以及超前异常应力,确定冲击地压危险区域,应用效果良好。

参考文献(References):

[1] 潘俊锋, 宁宇, 毛德兵, 等. 煤矿开采冲击地压启动理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 586-596.
PAN Junfeng, NING Yu, MAO Debing, et al. Theory of rockburst startup during coal mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 586-596.

[2] 谭云亮, 郭伟耀, 辛恒奇, 等. 煤矿深部开采冲击地压监测解危关键技术研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 160-172.
TAN Yunliang, GUO Weiyaoyao, XIN Hengqi, et al. Key technology of rock burst monitoring and control in deep coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 160-172.

[3] 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]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(1): 67-71.
GONG Siyuan, DOU Linming, XU Xiaojie, et al. Experimental Study on the correlation between stress and P-wave velocity for burst tendency coal-rock samples [J]. Journal of Mining and Safety Engineering,

2012, 29(1): 67-71.

[4] 巩思园, 窦林名, 何江, 等. 深部冲击倾向煤岩循环加卸载的纵波波速与应力关系试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 41-47.
GONG Siyuan, DOU Linming, HE Jiang, et al. Study of correlation between stress and longitudinal wave velocity for deep burst tendency coal and rock samples in uniaxial cyclic loading and unloading experiment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 41-47.

[5] 窦林名, 李振雷, 张敏. 煤矿冲击地压灾害监测预警技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(7): 41-46.
DOU Linming, LI Zhenlei, ZHANG Min. Study on monitoring and early warning technology of mine pressure bump disaster [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7): 41-46.

[6] 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 rock burst danger in coal mine [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2010.

[7] 谢克珂, 沈泽, 黄练红, 等. 地应力分布对冲击地压影响分析与模拟研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(S2): 920-925.
XIE Keke, SHEN Ze, HUANG Lianhong, et al. Analysis and simulation of the impact of stress distribution law on rock burst [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(S2): 920-925.

[8] 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.

[9] 窦林名, 姜耀东, 曹安业, 等. 煤矿冲击矿压动静载的“应力场-震动波场”监测预警技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 803-811.
DOU Linming, JIANG Yaodong, CAO Anye, et al. Monitoring and pre-warning of rock burst hazard with technology of stress field and wave field in underground coal mines [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4): 803-811.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 金双林, 马志强, 李静, 等. 基于震动波CT技术的冲击危险预测研究[J]. 煤炭工程, 2016, 48(10): 67-69.
JIN Shuanglin, MA Zhiqiang, LI Jing, et al. Prediction of rock burst risk based on seismic computed tomography detection [J]. Coal Engineering, 2016, 48(10): 67-69.

- [13] 曹安业,王常彬,窦林名,等. 临近断层孤岛面开采动力显现机理与震动波CT动态预警[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(3): 411–417.
CAO Anye, WANG Changbin, DOU Linming, et al. Dynamic manifestation mechanism of mining on the island coalface along fault and dynamic pre-warning of seismic waves with seismic tomography [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2017, 34(3): 411–417.
- [14] 解嘉豪, 窦林名, 张敏, 等. 工作面强矿震事件的震动波CT时空预测技术[J]. 煤矿安全, 2017, 48(6): 79–82.
XIE Jiahao, DOU Linming, ZHANG Min, et al. Temporal and spatial forecasting of strong mine earthquake events based on shock wave CT technology [J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(6): 79–82.
- [15] 寇建新, 巩思园. 基于矿山CT技术的工作面冲击矿压危险性评价研究[J]. 中国煤炭, 2013, 39(11): 55–60.
KOU Jianxin, GONG Siyuan. Research on risk assessment of rock burst in working face through mine CT technology [J]. China Coal, 2013, 39(11): 55–60.
- [16] 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.
- [17] 张平松, 刘盛东, 吴荣新. 地震波CT技术探测煤层上覆岩层破坏规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2510–2513.
ZHANG Pingsong, LIU Shengdong, WU Rongxin. Observation of overburden failure of coal seam by CT of seismic wave [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2510–2513.
- [18] 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.
- [19] 牟宗龙, 窦林名, 曹安业, 等. 采矿地球物理学基础[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2018: 167–168.
MOU Zonglong, DOU Linming, CAO Anye, et al. Foundation of mining geophysics [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2018: 167–168.
- [20] 巩思园, 窦林名. 煤矿冲击矿压震动波CT预测原理与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2013: 53–54.
GONG Siyuan, DOU Linming. The CT prediction principle and technology of rockburst seismic in coal mine [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2013: 53–54.