

文章编号: 0253-9993(2006)01-0035-05

断层构造在矿井工作面震波 CT 反演中的特征显现

张平松^{1,2}, 刘盛东¹

(1. 安徽理工大学 资源与环境工程系, 安徽 淮南 232001; 2. 同济大学 海洋与地球科学学院 上海 200092)

摘要: 为获得不同断层构造的 CT 反演特征, 通过实际地质模型探测实验, 对断层构造与工作面巷道不同夹角的波速重建图像进行了对比研究. 结果表明: 当两者之间夹角大于 30° 时断层构造重建效果显著, 构造迹线及其特征明显. 同时断层构造反演时受到不同因素的影响, 断层本身的性质、观测系统、正反演方法及射线覆盖次数等都是震波 CT 图像重建的影响因素.

关键词: 断层构造; 震波 CT 技术; 反演; 图像重建

中图分类号: P542.3 文献标识码: A

Character appearance of fault structure in seismic wave CT inversion for mine work faces detecting

ZHANG Ping-song^{1,2}, LIU Sheng-dong¹

(1. Department of Resource and Environment Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Through practical detecting experiment in geological model, the velocity rebuilding images with different degree between fault structure and laneway were contrasted for getting the different CT inversion characters of the fault structure. The results show that the structure rebuilding effect is notable when fault structure has angle more than 30° with laneway. And then the structure character is distinct. Fault structure inversion is affected by a lot of factors, such as fault character, observation system, forward and inversion algorithm method and radial overlay times, and so on.

Key words: fault structure; seismic wave CT technology; inversion; velocity image rebuilding

断层构造及其异常是影响煤层安全高效生产的最主要的地质因素, 其主要特征是使得煤层稳定性、连续性及倾角等发生较大变化, 给采矿特别是综合机械化采煤带来严重影响. 目前在矿井工作面中真正对生产影响最大的是落差为 3~5 m 的中小断层构造, 这也是矿井地质工作研究的主要内容. 为确保开采工作的顺利进行, 通常需在工作面回采前利用各种探测手段, 对工作面内地质条件进行探测与评价, 查明工作面内已揭露和隐伏的断层构造是评价目标之一. 目前对矿井工作面中地质构造及异常的探测方法相对较少, 无线电波坑透方法往往受到电磁波衰减的影响较大, 其工作面内穿透距离受到限制, 且所解释的构造迹线不够明显. 地质雷达法同样遭受干扰因素较多, 而且探测距离有限. 与此相比, 井巷间地震波 CT 技术能够对地质构造形迹进行全面细致的判定, 并能对煤层顶板稳定性、煤体破碎等特征进行解释, 具有较好的应用价值. 但从方法原理上讲, 巷间地震波 CT 技术也具有自身的适用性, 对断层构造来说, 其与巷

道夹角大小会影响到波速反演时构造的收敛特性, 即它的表现形式会有不同的特征. 只有全面认识断层构造在工作面内 CT 反演图中的表现特征, 才能更好地进行地质构造解释与推断, 为煤矿生产提供更为准确的地质资料^[1-3]. 本文结合探测实例对不同夹角断层在工作面内的特征进行研究, 并指出和分析了探测中的影响因素.

1 巷道工作面探测模拟及其特征

1.1 探测模型

为了更好地测取各种构造特征有效的地震波 CT 数据, 研究中针对性地建立构造模型. 模型建在草地上, 以长 8 m、宽 1.3 m、厚度 1 m 的混凝土体模拟断层构造, 混凝土直接浇筑在土体中, 两者耦合完好. 其中土层地震波纵波波速为 0.2 ~ 0.5 m/ms, 而混凝土体地震波波速为 3.5 ~ 4.5 m/ms, 与矿井工作面断层构造特征相似. 图 1 为探测模型.

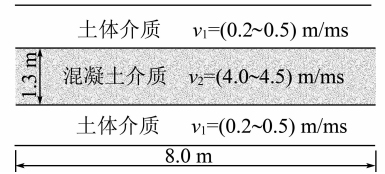


图 1 震波 CT 探测模型

Fig. 1 Sketch map of seismic wave CT detecting

1.2 数据采集

图 1 为断层与巷道呈水平状态即夹角为 0°时的布置, 由于测线可以在土层上任意变动, 因此可以形成模拟断层与探测测线 (即巷道煤帮) 之间所需任一角度的断层构造. 研究中以实际生产中可能遇到的断层构造为重点, 分别模拟断层与巷道间 0, 30, 45, 60 和 90°夹角, 进行震波 CT 数据采集.

现场以非完全观测系统布置为主, 检波器间距为 0.5 m, 采用 TZBS 型主频 30 Hz 速度检波器. 振源采用 8.16 kg 铁锤进行激振, 移动步距即炮间距为 0.5 m, 分别进行震波 CT 数据采集. 通过现场实验, 确定采集参数为: 采样间隔 50 μs, 采样点数 512 个, 采样频带 1 000 Hz 低通. 图 2 (a), (b) 分别为断层与巷道 45°和 90°夹角时现场布置.

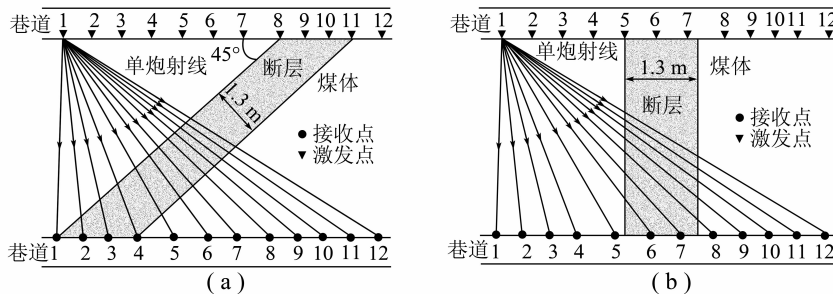


图 2 断层与巷道夹角为 45°和 90°时的探测模型

Fig. 2 Sketch map of fault detecting model with 45° and 90°

1.3 数据处理

震波 CT 数据处理采用自行开发的 CT 软件进行, 其正反演方法较为全面. 对单炮记录进行整理后形成总炮检记录, 并进行文头编辑、道数据编辑、二次采样、噪声剔除、频谱分析、初至拾取等处理过程. 鉴于篇幅所限, 本次研究仅利用震波波速参数进行透射 CT 反演成像.

反演计算时, 首先必须选择合适的网格单元, 对探测区域进行网格划分, 形成一个个尺度大致相同的像元, 并把像元内的平均波速值作为其中心点的值. 网格形成后, 结合不同波组的拾取到时, 选择正、反演方法, 设定迭代次数与校正误差即可获得震波 CT 反演的各种结果图像. 为保证对比研究的有效性, 本次 CT 数据反演均采用收敛性较好的弯曲射线法进行时间追踪和联合迭代法 (SIRT 法) 进行反演的结果作为二维重建波速图像^[4-6].

1.4 不同方位构造在震波 CT 反演图中的显现特征

受断层的产状和工作面布置的控制, 断层与工作面巷道之间存在一定的夹角, 两者之间夹角度数的大

小对震波 CT 反演结果影响较大，其重建结果图中的表现各不相同。通过对 $5.5\text{ m} \times 4.0\text{ m}$ 测试区域所采集的数据进行 CT 反演，分别获得了 0° 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° 情况下的探测剖面速度重建图（图 3，4），图 3 为探测区域射线分布及网格划分，图 4 为弯曲射线追踪 SIRT 法反演 60 次的迭代结果；图 5 为迭代 60 次时各种夹角重建结果的迭代误差比较。

在波速反演图中，土层中部分面积被混凝土层所替代，即低速区中出现条带状的高波速区，这与井下工作面中煤层部分位置被断层即岩层替代条件一致，因此能进行对比与分析工作面中地质构造的特征。可以看出，反演图中高低波速区分界较为明显，其中土层位置地震波波速基本在 0.4 m/ms 左右，

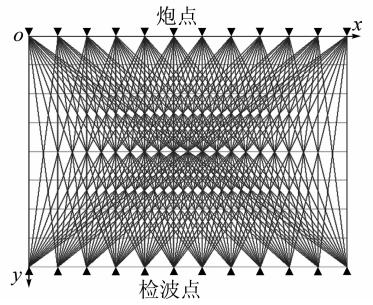


图 3 探测区域射线分布及网格
Fig. 3 Radial distribution and gridding chart of detecting area

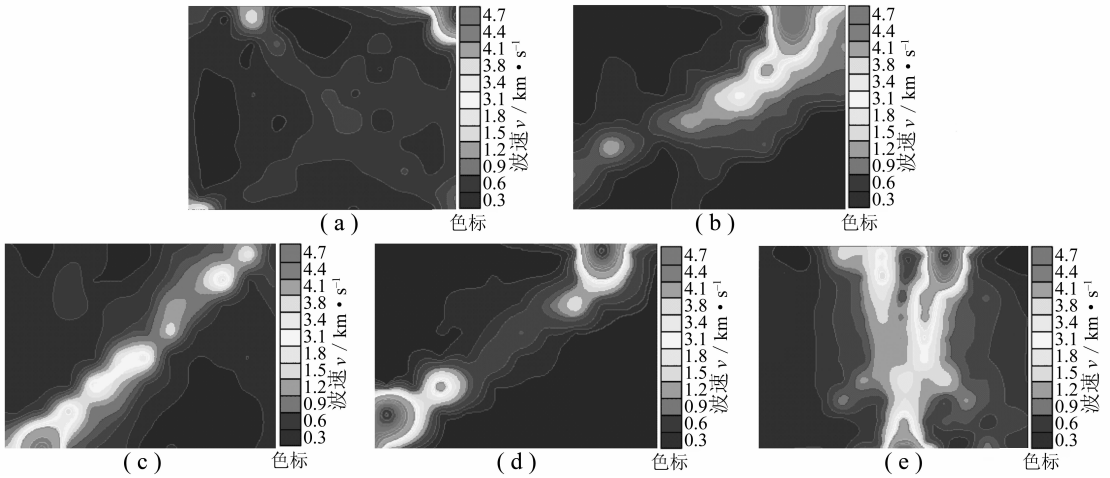


图 4 探测速度反演重建结果

Fig. 4 Velocity rebuilding result of 0° , 30° , 45° , 60° , 90° between fault and laneway
(a) 0° ; (b) 30° ; (c) 45° ; (d) 60° ; (e) 90°

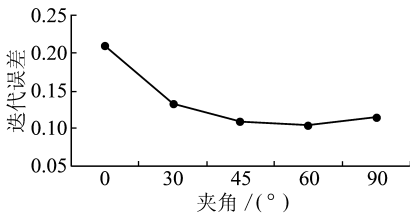


图 5 反演重建迭代误差的比较

Fig. 5 Comparison of calculating error in velocity rebuilding

两者夹角呈 90° 时，断层构造迹线最为清晰，连通性较好，但个别区域出现发散现象，致使断层迹线局部有变宽的假象。由图 5 反演结果迭代误差对比可知，当同样迭代 60 次时，夹角 45° 和 60° 断层构造迭代误差较小，而夹角 0° 时收敛性最差。

依据实际探测结果，可得出结论：当断层与巷道夹角在 30° 以下时，尤其是与巷道平行的断层构造对地震波的发散能力增强，致使震波 CT 对断层的分辨能力降低，断层特征在波速重建图像中的收敛性不强，呈发散型，因此在 CT 反演结果解释与构造判定时应引起注意。而夹角大于 30° 的断层构造其特征显现较为突出，震波 CT 图像重建的分辨能力较强。井下实际探测时，还需考虑断层一盘与煤层对接时其影响范围，这应该是 CT 重建图像中的高波速分布区。同时表明，现场进行震波 CT 数据采集时，应尽可能

而混凝土层位置地震波波速有一定的变化，在 $1.8 \sim 4.5\text{ m/ms}$ 之间，但它不能完全代表介质本身的波速大小。当断层与巷道夹角为 0° 时，断层构造呈高度发散状态，不能看出明显的构造迹线。当两者夹角为 30° 时，断层构造迹线变得明显，且具有一定的收敛性。两者夹角呈 45° 和 60° 时，断层构造收敛性最好，但其宽度值与实际尺寸存在一定差别，且断层中部高速值区域的连通性差。两者

利用井下工作面周边的巷道、切眼及联络巷等条件,采用全观测系统,多方位进行数据采集,这样有利于探测区域内不同方位构造体的波速图像重建.

2 断层特征显现的影响因素

2.1 断层自身的特征影响

井下工作面中断层构造的探测远比地面模拟探测的难度大,且判定的准确率降低,其原因是存在多种影响构造特征显现的因素.断层构造本身的性质是一个重要影响因素:一是断层与巷道之间夹角的影响,比如在新集一矿 150801 工作面 CT 探测中,工作面内发育一条与巷道近于平行的断层,其落差较大,但 CT 图像中无明显构造形迹,未能对其进行预测,结果给生产带来严重影响;二是断层带宽度及性质,若断层带宽度不大,其间岩性多为泥岩及其相近成份,与两边的煤岩体性质及波阻抗差异较小,也会对 CT 图像重建带来一定的难度.在祁东煤矿 7124 工作面探测中,落差 3.0 m 的断层 F7124-3 与巷道夹角 70° 左右,但其特征显现不明显即是一个例证.同时,还存在褶曲的影响,若出现紧密褶曲构造,其对生产产生的影响与断层构造性质相似,但煤层为连续变化,从 CT 图像中难以进行识别,试想通过槽波时间特征来进行判别,从而提高对各种构造的识别能力.

2.2 观测系统的影响

非完全观测系统与完全观测系统具有明显的差别,完全观测系统的数据量是非完全观测系统的 2 倍,但受井下实际条件所限,矿井巷道间的工作面实测只能利用工作面运输巷和回风巷进行地震波的激发与接收,有时可利用切眼或联络巷形成激发接收空间,这样可对与工作面运输巷和回风巷近于平行的断层构造进行有效识别.通常来说,仅依靠工作面运输巷和回风巷激发接收地震波进行 CT 探测,其解释结果能满足煤矿安全生产的技术要求.与此同时,受工作面地质条件所限,巷道中激发点与接收点都不可能分别处于同一水平面上,因此其探测数据实属于三维测量值,但反演过程中采用二维平面反演,这对重建结果会产生较大的影响.目前通过三分量检波系统,对采集的三方向数据进行地震波的定向合成,或是激发点、检波点不在同一平面内时,借用三维地震中“层拉平”技术,将激发点、检波点“拉平”到相应的位置,使其处于同一平面内,应该对 CT 图像重建起到一定的帮助.

2.3 检波接收系统的影响

目前矿井工作面探测的目的很明确,即搞清巷道中已经揭露的断层在工作面内的展布和连通情况,同时了解工作面内隐伏的断层构造以及影响安全生产的相关地质因素.对揭露的断层,若落差较大,巷道在穿过时会有一段全岩影响区,这应该是断层一盘与煤层对接所带来的影响,其在工作面内的延伸情况是生产中所关心的重点.进行地震波透射 CT 数据采集时,这些全岩段往往不易施工炮眼,即被作为跳离段,但这种空白区范围过大会给反演带来较大的影响.实际探测发现,全岩段按一定间距施工激发或接收点,对该断层构造重建结果的收敛起到决定性作用.因此现场施工过程中应按巷道实际长度均匀布置激发与接收点.同时,激发接收点之间的距离也会影响到重建结果对构造的分辨能力,因此现场一般将激发点、接收点之间的距离控制在 5~10 m.

2.4 正反演方法的影响

地震波 CT 数据处理的实质是利用实测透射震波走时,结合射线的几何路径矩阵,求解测试区域划分的网格内的地震波速度值.由于实际观测系统布置的不完全性,所以进行数据方程求解时多采用迭代方法.有两个环节比较重要,即对射线路径的追踪和迭代方法的确定,分别属于正反演问题.目前在射线路径追踪时可采用直射线和弯曲射线两种.弯曲射线中有图论方法、线性插值法等;而速度场图像重建方法有反投演法(BPT法)、算术迭代法(ART法)、SIRT法、最小二乘法(LSQR法)和小波变换技术等多种方法^[4].正反演方法的不同组合对重建结果中构造的收敛性产生重要影响.研究表明,弯曲射线追踪震波到时要比直射线路径追踪更趋于实际值,又由于 SIRT 方法收敛速度较快,而且对投影数据误差的敏感度小,结果多选取弯曲射线线性插值法(LTI)进行时间追踪和 SIRT 法进行反演的结果作为图像重建结果.

同时还应加强对新的反演方法的深入研究,比如采用小波变换技术可提高 CT 反演效果,提高对各种地质构造解释的准确性.

2.5 射线影响

受观测系统限制,探测区域内不同位置点存在数据不均匀覆盖现象,可以简称为“射线现象”,由于射线影响的存在,不同网格单元点射线穿过的次数各不相同,且亦疏亦密,数据反演时若到时拾取不准确,其结果在每条射线迭代误差分配时累积现象严重,结果造成射线密的网格单元比疏的网格单元波速值过大或过小,即产生严重的波速分布假象,而地质解释时误将此作为断层构造的特征显现.因此操作过程中必须提高射线地震波的到时读取精度,避免迭代误差分配产生的影响.另外对于网格单元射线覆盖次数低于3次的面积重建图像的可信度差,特别对射线边界区域影响较大,反演时应多加注意.同时要求波形数据采集质量要有保证,其实测资料是后续处理的根据,减少干扰因素,利用高精度地震仪器,提高地震记录质量,是震波 CT 图像重建的基础.

3 结 语

断层构造在震波 CT 速度重建图像中具有明显的特征反应,但受断层走向与巷道夹角的影响,两者之间夹角大于 30° 时重建效果显著.目前在煤矿区利用震波 CT 技术已完成近8000 m 巷道工作面的探测内容,对断层构造及其异常的判别以及不同地质构造具体特征显现获得了许多新的认识,但受测试条件限制在数据采集和反演处理方法等方面还存在诸多不足^[7,8].为提高对不同断层构造的判识能力,必须采取多波多方法多信息相结合,开展联合反演技术研究,比如对纵波、横波及槽波的多波联合反演,对到时、频谱和衰减特征综合分析,采用新的反演方法如小波分析技术应用^[9],从而获得更加准确的 CT 结果剖面,充分分析探测区的构造规律,更好地对未知的地质构造进行解释,为工作面回采提供更加准确详实的数据,对煤矿安全生产产生更大的指导意义.

参考文献:

- [1] 赫尔曼. 由投影建图像: CT 的理论基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [2] 杨文采, 李幼铭. 应用地震层析成像 [M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [3] 张平松, 刘盛东, 吴荣新. 震波 CT 技术观测煤层上覆岩层破坏规律 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (15): 2 510 ~ 2 513.
- [4] 刘盛东, 李承华. 地震走时层析成像算法与比较 [J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29 (2): 211 ~ 214.
- [5] 程久龙. 岩体破坏弹性波 CT 动态探测试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2000, 22 (5): 555 ~ 568.
- [6] 杨建辉. 弯曲射线 CT 技术探测岩石破裂区数值模拟 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 1999 (10): 520 ~ 524.
- [7] 裴正林. 井间地震层析成像的现状与进展 [J]. 地球物理学进展, 2001, 16 (3): 91 ~ 97.
- [8] 成 谷, 马在田, 张宝金, 等. 地震层析成像中存在的主要问题及应对策略 [J]. 地球物理学进展, 2003, 18 (3): 512 ~ 518.
- [9] 裴正林, 牟永光, 狄帮让, 等. 复杂介质小波多尺度井间地震层析成像方法研究 [J]. 地球物理学报, 2003, 46 (1): 113 ~ 117.