

基于穿层钻孔声波远探测有限元方法的煤岩界面成像

徐宏阳 翟成 夏济根 孙勇 董兴蒙 来永帅 余旭 徐吉钊 丛钰洲

引用本文:

徐宏阳, 翟成, 夏济根, 等. 基于穿层钻孔声波远探测有限元方法的煤岩界面成像[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(3): 118–129.

XU Hongyang, ZHAI Cheng, XIA Jigen, et al. Coal–rock interface imaging based on acoustic remote reflection logging within crossing boreholes using the finite element method[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(3): 118–129.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.06.0366>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水力裂缝在煤岩界面处穿层扩展规律的数值模拟

Numerical simulation of layer-crossing propagation behavior of hydraulic fractures at coal–rock interface
煤田地质与勘探. 2020, 48(2): 106–113 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.02.017>

底板梳状长钻孔替代穿层钻孔瓦斯抽采技术可行性

Technology feasibility of gas drainage with comb-shaped long borehole in floor instead of translayer borehole
煤田地质与勘探. 2019, 47(6): 32–38 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.06.006>

煤矿隐伏小断层的瓦斯抽采钻孔探测方法

The concealed small faults detection based on gas drainage boreholes along and cross the coal seam
煤田地质与勘探. 2021, 49(3): 69–77 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.03.009>

声波测井在煤岩弹性力学分析中的应用

Application of acoustic logging in elastic mechanics analysis of coal and rock
煤田地质与勘探. 2019, 47(S1): 104–112 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.S1.020>

不同围压下煤岩声发射基本特性及损伤演化

Acoustic emission characteristics and damage evolution of coal–rock under different confining pressures
煤田地质与勘探. 2020, 48(3): 128–136 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.03.019>

全尺寸PDC钻头复合冲击破岩机理的有限元分析

Rock breaking mechanism of composite impact of full-size PDC bit based on finite element analysis
煤田地质与勘探. 2021, 49(2): 240–246,252 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.02.030>



徐宏阳, 翟成, 夏济根, 等. 基于穿层钻孔声波远探测有限元方法的煤岩界面成像[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(3): 118-129. doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.06.0366

XU Hongyang, ZHAI Cheng, XIA Jigen, et al. Coal-rock interface imaging based on acoustic remote reflection logging within crossing boreholes using the finite element method[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(3): 118-129. doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.06.0366

移动阅读

基于穿层钻孔声波远探测有限元方法的煤岩界面成像

徐宏阳¹, 翟成^{1,*}, 夏济根², 孙勇³, 董兴蒙², 来永帅¹, 余旭¹, 徐吉钊¹, 丛钰洲¹

(1. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏徐州 221116; 2. 中国电波传播研究所, 河南新乡 453003;
3. 中国矿业大学 低碳能源与动力工程学院, 江苏徐州 221116)

摘要: 小型地质构造是造成煤与瓦斯突出事故的主要因素, 小构造的精准探测是亟需解决的关键问题。煤岩界面高精度探测是查明小构造, 实现透明工作面的基础。声波远探测技术具有探测范围大、分辨率高、可成像等优点, 能够实现对煤岩界面的精准识别。为此, 提出了基于穿层钻孔声波远探测的煤岩界面探测技术, 通过在井下穿层钻孔内布置声波远探测仪, 采集孔周煤岩分界面产生的阵列波形, 并利用反射波信息反演获得煤岩界面成像图, 进一步结合钻孔群, 实现工作面的整体勘察。首先, 利用 COMSOL Multiphysics 软件构建出煤系单极远探测数值模型; 然后通过模型正演分析全波信号与波场快照的全时空变化规律; 最后对远探测声波数据进行反演实现煤岩界面的偏移成像。正演结果表明: 模型中煤层的纵波波速比顶底板岩层慢 1.2 km/s 左右, 声波在煤层中传播时能量衰减得更快, 同时声波穿过煤岩界面时会出现主频的漂移; 当测点趋近于仪器从底板岩层向煤层过渡的位置时, 直达波的变化特征为幅度的骤降与声时的增大, 而界面反射波的特征为时间-深度域中倾斜同相轴的斜率改变。对采集到的波形数据进行滤波、波场分离、反射波增强、偏移成像四个步骤完成模型反演, 成像结果与原始模型相似度高, 煤岩界面倾角误差 0.6°、煤厚误差 0.212 m, 穿层钻孔远探测声波有限元方法可以有效地反演出煤岩界面的位置和形态特征。该研究可为声波远探测技术应用于穿层钻孔煤岩界面识别提供基础理论支撑。

关键词: 声波远探测; 煤岩界面成像; 煤层小构造; 穿层钻孔

中图分类号: P631 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2024)03-0118-12

Coal-rock interface imaging based on acoustic remote reflection logging within crossing boreholes using the finite element method

XU Hongyang¹, ZHAI Cheng^{1,*}, XIA Jigen², SUN Yong³, DONG Xingmeng², LAI Yongshuai¹,
YU Xu¹, XU Jizhao¹, CONG Yuzhou¹

(1. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. China Research Institute of Radiowave Propagation, Xinxiang 453003, China; 3. School of Low-Carbon Energy and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The presence of small geological structures is the main cause of coal and gas outbursts, making the precise detection of these structures an urgent need. High-precision detection of coal-rock interfaces is essential for identifying small structures and achieving transparent mining faces. The acoustic remote reflection logging technology, with a large detection range, a high resolution, and imaging capability, can accurately identify coal-rock interfaces. In this context, this study proposed a technique for coal-rock interface detection based on acoustic remote reflection logging within crossing boreholes. Specially, by placing acoustic detectors in crossing boreholes, the array waveforms generated by the coal-rock interfaces around the boreholes were collected. Then, the coal-rock interface images were obtained through the

收稿日期: 2023-06-20; 接收日期: 2023-12-04

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(51925404); 国家自然科学基金项目(51774278)

第一作者: 徐宏阳, 2000 年生, 男, 安徽安庆人, 博士研究生, 从事地球物理探测技术研究. E-mail: 16184766@cumt.edu.cn

*通信作者: 翟成, 1978 年生, 男, 山东滕州人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事矿井瓦斯防治与利用方面的研究工作. E-mail: greatzc@126.com

inversion of the reflected wave information. This technology, combined with the borehole group in the mining face, allows for the overall exploration of the mining face. The steps are as follows: (1) A numerical model of monopole acoustic remote reflection logging for coal seams was established using the COMSOL Multiphysics software. (2) Through forward modeling, the entire spatio-temporal evolutionary laws of full waveform signals and wavefield snapshots were analyzed. (3) The inversion of the acoustic data for acoustic remote reflection logging was performed, enabling the migration imaging of coal-rock interfaces. The forward modeling results indicate that the compressional wave velocity in a coal seam was approximately 1.2 km/s slower than that in its roof and floor. Acoustic waves exhibited faster energy decay when propagating in a coal seam and showed dominant frequency shifting when spreading through coal-rock interfaces. When a measurement point approached the position where an acoustic detector shifted from the rock layer on a coal seam's floor to the coal seam, direct waves exhibited a sharp decrease in the amplitude and an increase in sonic time, while reflected waves from the interfaces displayed changes in the slopes of the inclined events in the time-depth domain. Inversion was completed through four steps: filtering, wavefield separation, reflection wave enhancement, and migration imaging. The imaging results closely resembled the original model, with the coal-rock interface dip angles and coal thickness exhibiting errors of 0.6° and 0.212 m, respectively. Therefore, the acoustic remote reflection logging with crossing boreholes based on the finite element method allowed for the effective inversion of the positions and morphological characteristics of coal-rock interfaces. This study will provide fundamental theoretical support for the application of acoustic remote reflection logging technology in the coal-rock interface identification through crossing boreholes.

Keywords: acoustic remote reflection logging; coal-rock interface imaging; small structure of coal seam; crossing boreholes

煤矿地质构造会引起附近岩体中的瓦斯赋存状态与力学性质发生较大的改变^[1], 从而出现应力集中与瓦斯积聚等现象。据统计发现 80% 以上的煤与瓦斯突出事故都发生在地质构造异常区域, 尤其是落差小于 5 m 甚至与煤厚接近的小断层、小褶曲、陷落柱等小构造极易引起煤与瓦斯突出灾害且难以探明^[2-3]。因此, 采用物探方法有效地勘察和预测突出煤层小构造, 对瓦斯治理工程优化设计和煤矿安全生产至关重要^[4-5]。当前的煤矿物探手段主要包括地面探测和井下探测。其中地面物探通过大地电磁、广域电磁或地震等方法对千米深度的大型地质构造进行探测, 但对小型地质构造的探测精度不足^[6]。地面测井利用矿井初期地勘资料获取地质构造信息, 勘探孔距离上百米, 孔间存在盲区。而井下物探则通过地质雷达^[7-8]、瞬变电磁^[9-11]或槽波地震等方法在井下巷道或钻孔内探测煤层构造, 其探测精度得到了提高, 但此类技术仍存在些许的弊端: 如钻孔雷达法通过发射电磁波探测地层构造, 易受巷道铁磁物质(设备、支架等)干扰; 钻孔瞬变电磁法接收地层二次场信号, 对高阻煤层不敏感等。因此, 亟需开发新型的煤矿小构造物探技术, 与当前已有的方法相互结合、以此提高勘探的精准度。

声波远探测作为近年来石油测井领域取得的一项重要成果, 是声波超远井外信息探测技术的代表^[12], 具有无损高效、可靠性高、经济投入低、不受周围电磁信号干扰等优势^[13-18]。该技术以井中声源辐射到井外地层中的声场能量作为入射波, 探测从井旁构造反射回来的声场, 通过分析处理接收到的全波信号, 对井外反射体进行成像^[19], 有效地填补了常规声波测井和地震勘

探在分辨率与探测范围之间留下的空白^[20], 在识别井旁裂缝^[21-22]、倾斜地层界面^[23]、断层^[24]、桩基岩溶^[25]等构造方面有着巨大的潜力。至此, 国内外针对声波远探测已经进行了大量的研究, 一方面是针对声波在介质中的传播特性, 研究方法包括了有限元法^[26-27]、有限差分法^[28]以及相关物理模拟, 另一方面是针对数据资料的处理上^[29-30], 如反射波的提取^[31], 偏移成像^[32]等。其中声波有限元方法在复杂模型适用性方面的优点较为明显, 诸多学者基于有限元仿真计算对反射声波测井进行研究。闫怡飞等^[33]通过声波有限元法数值模拟的方式进行井旁裂缝几何特征的评价, 根据信号处理结果有效地判断出了页岩储层中裂缝的倾角与位置, 井旁存在交叉裂缝时, 计算得到井旁裂缝倾角为 10.13° 和 20.19°, 与解析模型对比的误差率分别为 1.31% 和 0.95%, 井旁存在弧状裂缝时, 裂缝中心位置与反射点坐标相对误差为 1.70%。雪宇超^[34]基于 COMSOL Multiphysics 软件有限元仿真计算分析了常规油气储层中井旁地应力对全波列声波测井的影响, 在不同应力方向变化模型中, 变化应力方向角度对阵列波形中同向分量及交叉分量波形幅度及能量的影响明显, 并基于声波测井响应信息库实现了地层各向异性信息的反演及应用。

声波远探测具有探测范围广、高精度成像等优点, 在煤层小型地质体探测方面具有独特的优势; 而目前声波远探测技术主要应用于油气勘探, 需要与高昂的地面钻井相结合, 仅能探测大型地质构造, 难以精确识别深部煤层中的小型构造^[35]。因此, 推广声波远探测技术到煤矿小构造勘探领域, 亟需找到更经济高效的应用方式。同时煤系非常规储层与常规油气储层的物性具有

较大差别^[36-37], 声波在煤系反射界面中的穿层特性尚不明晰。煤岩分界面的精准反射成像是小构造探测的前提, 基于此, 提出了在煤矿井下具有高适用性的基于穿层钻孔声波远探测的煤岩界面成像方法——借助井下高密度的抽采钻孔, 将小型、防爆的远探测声波仪器放入孔中, 获取孔周一定范围的成像剖面, 进一步结合钻孔群, 从而实现透明工作面的构建。根据实际地质条件, 采用有限元方法进行煤系单极远探测数值模拟, 分析全波信号和波场快照随时间与空间的变化特征, 并利用接收的反射波信号实现煤岩界面成像, 以验证和探究穿层钻孔声波远探测的可行性和应用潜力。

1 基于钻孔声波远探测技术的煤岩界面成像方法

1.1 穿层钻孔声波远探测原理

在矿井下, 一般先施工底板岩巷, 然后向上部煤层打众多的穿层钻孔进行瓦斯抽采, 通过制作满足井下施工条件的小型、防爆的远探测声波仪器, 将其布置于煤矿井下的穿层钻孔中如图 1 所示。声波测井仪器上的发射换能器能将电信号转换为机械振动, 进而在钻孔内激发出特定频率的声波信号, 声波信号传播至钻孔壁时, 部分能量能够透过钻孔壁转化为弹性波进而辐射到地层中去, 在弹性波的传播过程中遇到波阻抗界面时, 会发生发射与透射现象, 被反射回来的弹性波再次透过钻孔壁传至钻孔之中并被声波远探测仪的接收器接收。将这个信号称之为反射波信号, 其到时、幅度以及相位中蕴含反射体的位置、方位和形态信息, 通过对钻孔周围煤岩界面反射回来的阵列反射波信号进行反演处理, 即可以实现对界面的成像。

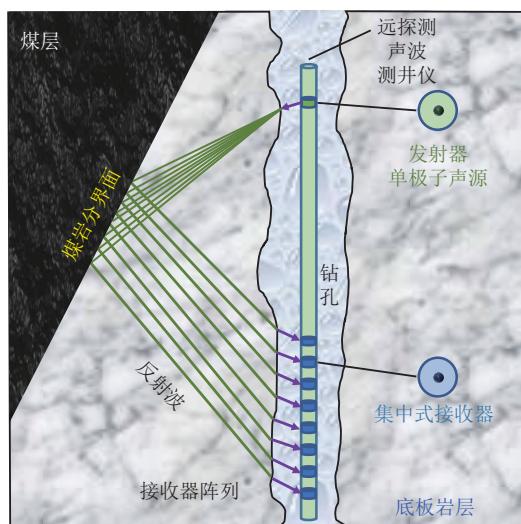


图 1 煤系穿层钻孔声波远探测识别孔周煤岩界面^[38]

Fig.1 Identification of coal-rock interface around a borehole using acoustic remote reflection logging within crossing boreholes for coal measures^[38]

1.2 煤层顶底板界面偏移成像

声波远探测记录的全波信号包含多种类型的波形, 如直达波、反射波、噪声等, 这些波形具有不同的到时、相位和振幅特征, 并相互叠加和干扰, 导致有效信号不易分离。为了更好地提取反射波信号并获得更准确的成像结果, 需要对声波资料进行数据处理。声波远探测数据的反演处理一般分为 4 个步骤: 压制直达波提取反射波、上下行波场分离、反射波增强、偏移成像。

直达波压制是一种声波处理方法, 用于提取反射波。在阵列声波测井中, 直达波是指从声源到接收器的最短路径上传播的声波, 而反射波是指从地层中的界面反射回来的声波。煤系中, 由于声波在孔周地层中传播时的衰减效应较大, 直达波往往比反射波强得多, 因此, 需要对直达波进行压制, 使反射波更明显, 以便更好地提取反射波。常用的声波远探测信号中直达波压制方法包括: 中值滤波、F-K 滤波、 τ - p 变换, 小波滤波等方法。

上下行波场分离是地震学中的一种数据处理方法, 从声波远探测阵列数据进行参数波分离, 分离直射波和反射波, 然后提取上行反射和下行反射并分别使用它们进行成像可以显著提高图像质量。在声波远探测中, 由接收点之下介质传播到达接收点被探测仪接收的波场, 称为上行波场; 由接收点之上介质传播到达接收点处被探测仪接收的波场, 即为下行波场^[14, 24]。其中上下行波场分离可以采用 F-K 滤波法或 τ - p 变换法等。

由于原始全波数据复杂以及波场分离方法固有的缺陷等原因, 分离得到的反射波中仍然掺杂着部分噪声信号, 这些噪声会对之后的偏移成像以及成果解释产生干扰。因此, 需要对反射波信号进行叠加增强, 使得具有相同相位的反射波信号成倍地增强, 减少噪声干扰从而有效提高信噪比。

当反射界面为倾斜界面或弧状等变化界面时, 叠加剖面与界面的实际位置和形态产生偏差, 此时需要进行偏移处理, 即将反射波归位到反射界面上产生该反射波的反射点上, 这样所有道集中偏移后的反射点即可构成反射界面, 反映出反射界面的具体位置和尺寸。按照理论基础, 偏移可分为射线理论偏移和波动方程偏移, 射线理论偏移方法主要为绕射扫描偏移叠加法, 波动方程偏移方法主要包括 F-K 法、积分法和有限差分法。

1.3 结合穿层钻孔群的工作面整体勘探方法

煤矿井下在工作面开采前一般先进行煤巷掘进, 同时构建底板岩巷向上方煤层施工大量的预抽钻孔进行瓦斯抽采^[39-40]。因此, 可以在这些预抽钻孔中应用钻孔声波远探测成像技术, 查明上方工作面的地质情况, 从而提高煤巷掘进的安全性与工作效率。如图 2 所示, 其

中紫色线表示从预抽钻孔中选取的探测钻孔, 通过在该钻孔中布置声波远探测仪, 获取孔周一定范围内的顶底板煤岩界面成像图, 实现上方工作面探测域(图2中红色虚线圆圈)的地质勘察。针对整个煤层工作面的地质探测, 采用多孔联合方法, 将多钻孔探测的线状数据融合成面状数据。具体方法为: 根据钻孔轨迹仪探测的数据计算钻孔轨迹绝对坐标, 将基于钻孔声波远探测技术的顶底板成像结果转换为绝对坐标, 融合多钻孔结果形成透明工作面所需的面状数据。

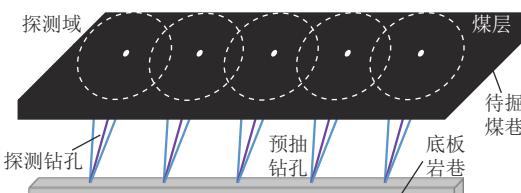


图2 多孔联合的声波远探测技术勘察工作面

Fig.2 Exploration of a mining face using multi-pore-combined acoustic remote reflection logging technique

2 数值模型的构建

2.1 模型物性参数

声波远探测数值模拟一般采用有限元法或有限差分法见表1, 笔者根据河南省平宝煤业首山一矿己₁₅₋₁₇-12020风巷掘进工作面的实际地质情况, 采用有限元法进行仿真计算。与前人已有的研究内容相比, 本文的探测类型为煤岩界面, 储层类型为煤系、具体应用场景为煤矿穿层钻孔。

表1 声波远探测数值模拟类型

Table 1 Numerical simulation types for acoustic remote reflection logging

仿真方法	储层类型	探测类型	应用场景
有限元	常规油气储层	裂缝 ^[41-42]	石油地面井
有限差分	常规油气储层	溶洞 ^[43-44]	石油地面井
有限元	页岩储层	裂缝 ^[45-46]	页岩地面井
有限元	煤系	煤岩界面	煤矿穿层钻孔

河南省平宝煤业首山一矿己₁₅₋₁₇-12020风巷掘进工作面中的穿层钻孔布置(几何参数)如图3所示。采用上发射(红点)一下接收(黑点)的探测模式, 选取以钻孔2号为中心轴的12 m×18 m长方形地层为目标区域进行建模。为了理论模型中网格剖分的便利, 对以2号为中心轴的目标地层区域进行模型简化, 将图3中的目标区域按照逆时针进行旋转, 旋转位置至钻孔2号竖直分布, 最终得到简化后的正演模型如图4所示。该工作面处煤层的顶底板岩层均为深灰色砂岩组成的致密岩层, 主要参数见表2(物性参数)。

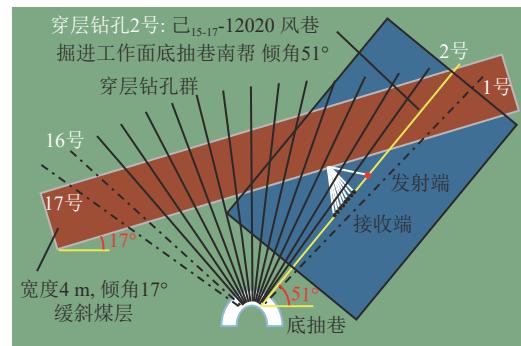


图3 己₁₅₋₁₇-12020风巷掘进工作面穿层钻孔布置

Fig.3 Layout of crossing boreholes in the heading face of air roadway Ji₁₅₋₁₇-12020

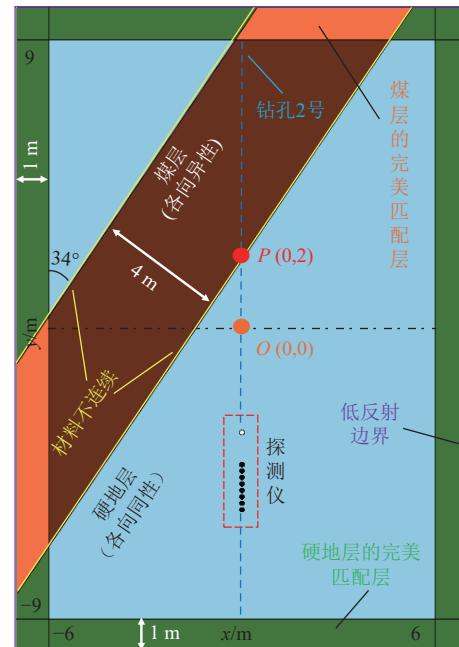


图4 煤系单极远探测模型及其边界条件

Fig.4 Model of monopole acoustic remote reflection logging for coal measures and its boundary conditions

2.2 模型几何参数

Table 2 Physical property parameters of the coal seam and its roof and floor

岩性名称	密度/ (kg·m ⁻³)	泊松比	弹性模量/ GPa	孔隙率/ %
煤层	1 360	0.27	4	4.6
顶底板	2 600	0.21	28	1.2

2.2 模型几何参数

采用COMSOL Multiphysics软件进行模型构建, 构建出的煤系单极纵波远探测模型如图4所示, 其中深灰色部分表示煤层, 其宽度为4 m, 倾角为56°, 设置为各向异性地层^[47]; 蓝色部分表示顶底板致密砂岩地层, 设置为各向同性地层。O点为模型几何中心点, P点为钻孔2号中煤层与底板的交界点。最外围的部分为吸收层, 可以将声波能量吸入且几乎不产生任何反射, 用以模拟地层向四周的无限延伸。模型的边界条件设置

为: 煤岩分界面处材料不连续; 吸收层最外侧为低反射边界。

模型边界施加了 2 个条件, 速度连续性的运动学条件和应力连续性的动力学条件。同时在模型四周边界添加宽度为 1.0 m 的吸收层以模拟弹性波在无限域中的传播, 橙色部分为煤层的吸收层、墨绿色部分为顶底板的吸收层。其中, 吸收层中的控制方程为:

$$\mathbf{M} \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + \mathbf{C}^* \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{K}^* \mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (1)$$

另外, 吸收层与模型外部边界采用低反射边界条件, 以减少物理域中的非物理反射波对试验结果的影响。低反射边界条件取相邻域的材料参数, 因此, 在低反射边界处有:

$$\sigma \cdot \mathbf{n} = -\rho v_p \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \cdot \mathbf{n} \right) \mathbf{n} - \rho v_s \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \cdot \boldsymbol{\tau} \right) \boldsymbol{\tau} \quad (2)$$

低反射边界处的阻抗匹配由纵波和横波创建, 为:

$$\begin{aligned} \sigma \cdot \mathbf{n} &= -\mathbf{d}_i(\rho, v_p, v_s) \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \\ \mathbf{d}_i &= \rho \frac{v_p + v_s}{2} \mathbf{I} \end{aligned} \quad (3)$$

考虑到地层中的层间界面对弹性波传播的作用机制, 基于间断伽辽金有限元法(Discontinuous Galerkin Finite Element Method)在模型内煤层与顶底板的分界面处设置为“材料不连续性”, 以模拟弹性波在层状介质中的吸收衰减和散射衰减^[48]。

2.3 模型正演步骤

声波探测仪设置为一发八收模式, 接收端采用 8 个点探针进行声波接收, 从上至下依次记为接收器 1—接收器 8, 相邻接收器间距 0.2 m, 发射端与第 1 个接收器之间的源距为 1.0 m。设置点探针作为声接收器的优点为: 简化模型网格剖分, 提高计算速度与精度; 点探针非实体, 避免声波在前端接收器处发生反射现象。发射端为各向同性的单极子声源探头, 通过振动向四周激发出固定波形, 激励源、输出参数及吸收边界条件见表 3, 声源激励信号的数学表达式为:

$$v = \exp \left[-(2t/T_0 - 4)^2 \right] \times \sin(2\pi f_0 t) \quad (4)$$

将探测仪放置在中轴线(钻孔 2 号)的目标测点处, 单极子声源激发出纵波信号并在煤系模型中传播, 点探针进而接收波形信号, 即完成了 1 次相应测点的模型正演。在模型的钻孔 2 号中共布置了 39 个位置测点进行

表 3 激励源、输出参数及吸收边界条件

Table 3 Excitation source, output parameters, and acoustic absorption boundary conditions

采样频率/Hz	步长/m	声源类型	吸收边界条件
75 000	0.4	正弦激励波	完美匹配层

全波信号的移动采集, 相邻测点间距(步长)为 0.4 m, 从深度(y 坐标位置)-6.4 m 处探测至 8.8 m 处。

2.4 数据反演步骤

采用叠后偏移的方法实现模型反演过程, 得到偏移成像图, 具体分为 5 个步骤: (1) 反射声波数据分类整理, 抽取共源距组合和共中心点组合; (2) 基于寻峰算法优化的 F-K 法滤波压制直达波, 提取反射波; (3) 上下行波场分离; (4) 动校正实现反射波信号增强; (5) F-K 法偏移成像。

F-K 滤波法^[49-50]将全波数据通过二维傅里叶变换由时间-深度域(T-X)转化为频率-波数域(F-K)内, 利用井孔直达波与反射波之间视速度的差异去除直达波。声波在煤系中传播时, 其能量衰减相较于常规储层更大, 在全波信号中直达波幅值与反射波幅值相差很大, 波峰(波谷)的位置即为直达波波峰(波谷)的位置, 为此笔者在滤波时首先采用寻峰算法定位到直达波的波峰(波谷)处, 然后设定相应的时间窗宽度 W, 将直达波的波峰(波谷)处的左右 W 范围内的信号降低为原先的 1/50, 即完成了一次对直达波的预先滤波, 使反射波信号更加明显; 其中要注意时间窗 W 的宽度不宜过大, 以免滤除反射波信号, 然后再对基于寻峰算法处理后的数据进行 F-K 法滤波操作。

采用 F-K 滤波法将反射波数据由时间-深度域(T-X)转化为频率-波数域(F-K)之后, 上行反射波将位于第 1、第 3 象限, 而下行反射波将位于第 2、第 4 象限, 2 种波形在 F-K 域中实现了分离。这是因为在设置的参考系中, 上行反射波的速度为正数, 而下行反射波的速度为负数, 因此, 便可以设计对应的滤波器对反射波信号进行上下行波场分离。采用叠后偏移方法时, 将滤波后的共源距组合数据, 重新排列整理为共中心点组合。由于各个声源与接收器组合下的反射波信号路径不同, 反射波抵达次序不同, 因此, 通过动校正^[51]将每个共中心点组合中的不同反射波校正到同一声时, 再对其进行叠加实现反射波增强。

F-K 偏移方法^[52]将时间-空间域的波场转换到频率-波数域进行偏移, 该方法受倾角和频散的影响小、计算效率高, 被广泛应用。其原理为: 在钻孔中反射波成像处理的过程中, 钻孔中接收器接收到的波场信号为 $u(0, z, t)$, 反射界面上反射点处的波场信号为 $u(x, z, 0)$, 偏移则是在频率-波数域中将钻孔中接收器接收到的波场移至反射界面上反射点处的波场。

3 结果与讨论

3.1 正演结果

声波全波列是指在发射声脉冲以后, 依次记录得到

的先后抵达接收器的直达波、反射波等波形信号。波场快照表示某一时刻声波在岩层中的传播状态。模型正演完成后, 得到39个位置测点下接收端捕获的全波列信号, 笔者从中选取了3个具有代表性的测点, 导出相应的全波列信号与波场快照。

测点1: 声波发射器位于-2.0 m处, 探测器的发射端与接收端均处于底板岩层中; 测点2: 声波发射器位于4.0 m处, 探测器的发射端与前5个接收器位于煤层中, 后3个接收器位于底板岩层中; 测点3: 声波发射器位于7.2 m处, 探测仪的发射端与接收端均处于煤层中。

图5a与图6a分别为测点1的全波列信号与波场快照, 从波场快照中可以看出, 0.33 ms时直达波抵达接收端、3.00 ms时下界面反射波抵达接收端、9.36 ms时上界面反射波抵达接收端, 在全波列信号的相应时刻附近也能观测到对应波形的出现。其中图5a中的直达波比图5b(测点2)与图5c(测点3)中更早抵达, 且信号幅度更大, 相邻接收器之间直达波声时的差距更小。在波场快照中也可以发现相同的规律, 图6b与图6c中的直达波在0.55 ms左右(测点2处直达波0.53 ms抵达、测

点3处直达波0.57 ms抵达)才抵达到了第1个接收器的位置, 相较于图6a慢了近0.22 ms。这说明声波在煤层中传播时速度更慢, 能量衰减更大, 第1个接收器与发射端的距离为1.0 m, 计算可得煤层中的波速比底板岩层慢1.2 km/s左右, 这跟煤本身的物理性质有关, 同时煤作为一种低密度的多孔介质, 声波在煤层中传播时会有更多的能量损耗。图5a中上界面反射波的信号强度很弱, 这是由于上界面反射波经过9.36 ms左右才最终抵达接收端, 在煤层与底板岩层中传播的时间较长, 并且在抵达接收端前接触了3次煤岩分界面, 当声波穿过介质分界面时, 会发生反射与透射现象, 也造成了声波能量的损失。由图6a中3.00 ms时刻的波场快照可以看出, 当声波抵达煤岩分界面时, 除了发生反射和透射之外, 还会出现波型的转换, 会产生4种不同的波, 即: P-P反射波、P-S反射波、P-P透射波、P-S透射波, 其具体转换规律满足斯奈尔定律与Zoeppritz方程。介质面产生的P-S反射波与P-S透射波信号强度低且在煤系中衰减快, 因此, 在全波信号中仅能观测到较为明显的P-P反射波与P-P透射波信号。

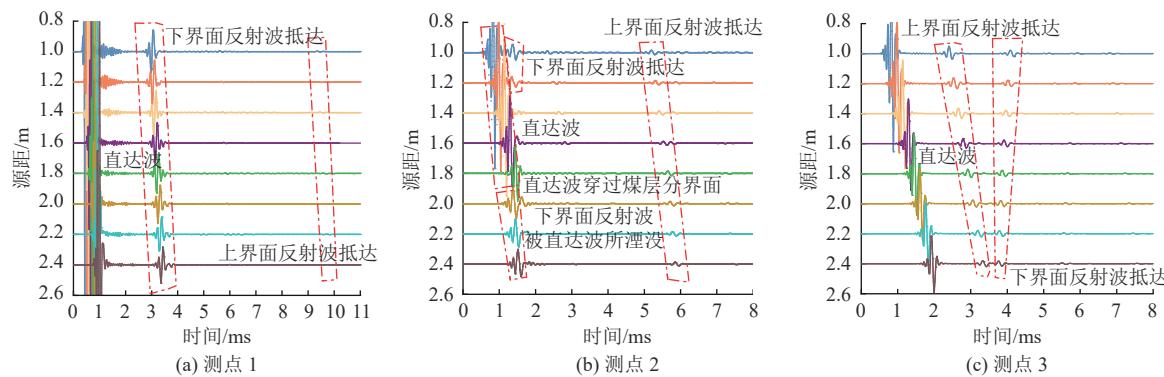


图5 全波信号
Fig.5 Full waveform signals

测点2处接收器阵列中既有位于煤层中的接收端(前5个), 又有位于底板岩层中的接收端(后3个), 对全波信号进行分析可以研究远探测声波在煤系中的穿层特性。图5b为测点2的全波列信号, 可以看出, 后3个接收器的直达波信号相较于前5个接收器, 幅值出现了明显的降低, 这是由于第5个和第6个接收器之间存在煤层分界面, 直达波穿过分界面造成了声波能量的损耗。同时仅仅只有接收器1与接收器2的全波信号中出现了清晰的下界面反射波, 这是由于测点2处后6个接收器与煤层下界面的距离很短, 导致全波信号中的下界面反射波被直达波所淹没。

利用快速傅里叶变换(FFT)将图5b中的全波信号由时域转变为频域, 进而分析波形的频率成分及特征如图7所示。其中位于煤层的前5个接收器的频域信号

存在明显的主频峰, 而当声波穿过煤岩分界面时, 后3个接收器的频域信号中主频峰明显向左侧的低频方向发生漂移, 且强度减小, 主频峰变得不明显, 同时在高频区域分化出了一个次频峰。这是由于, 当声波穿过煤岩界面从煤层进入底板岩层时, 高频信号的损耗更大, 留下了更多的低频成分; 而且界面处存在复杂的多重传播路径, 也拉低了主频峰, 因此总体主频峰向低频移动。同时当声波穿越介质界面时, 反射和折射可能会引发次频峰的出现, 这是因为声波在不同路径上经历不同的相位变化, 导致次频成分的干涉。图6b为测点2的波场快照, 0.57 ms时直达波抵达接收端; 0.84 ms时直达波抵达煤层下界面; 1.28 ms时下界面反射(透射)波抵达至接收端处; 2.40 ms时直达波抵达煤层上界面; 同时可以在波场快照中清晰地看到下界面的反射纵波、反射

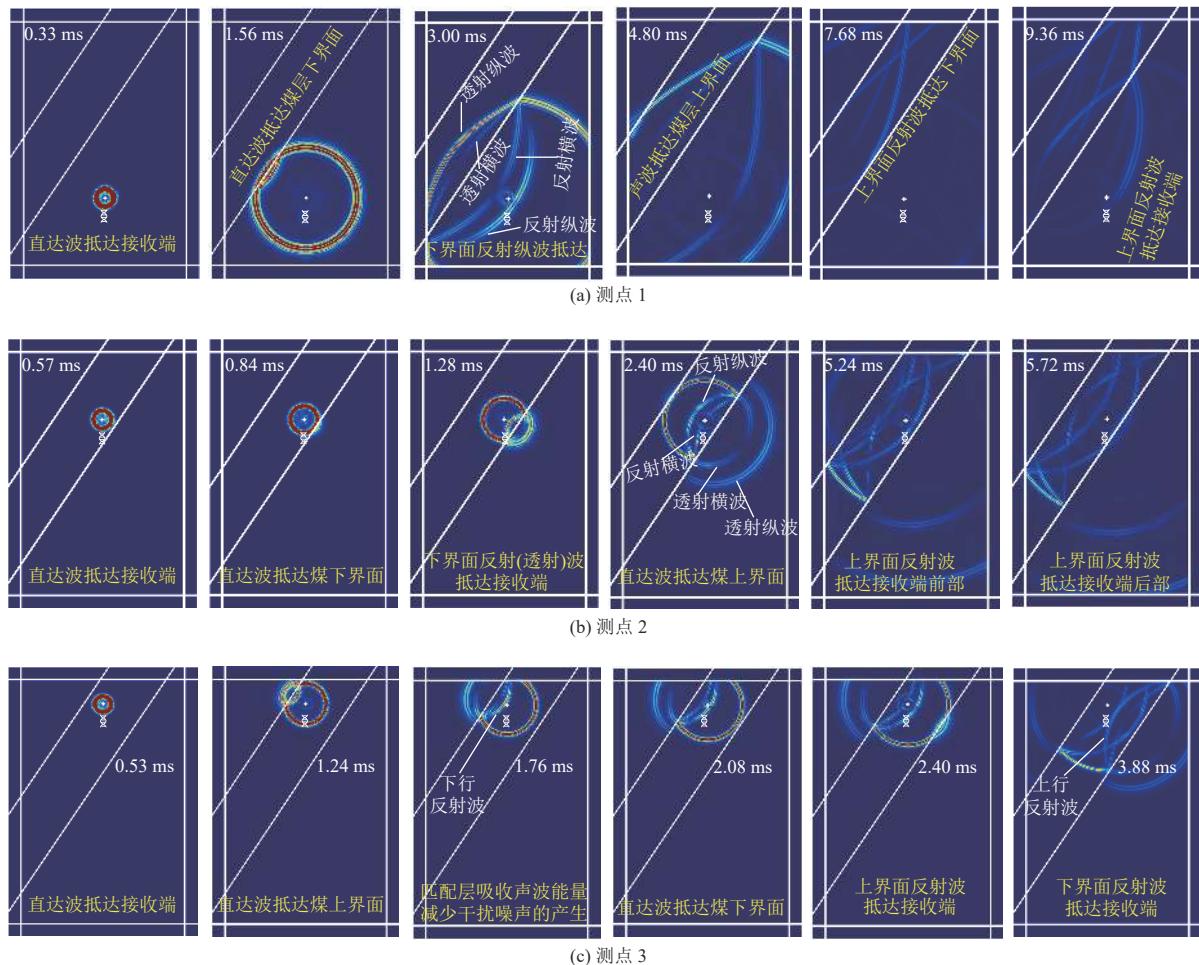


图 6 波场快照

Fig.6 Wavefield snapshots

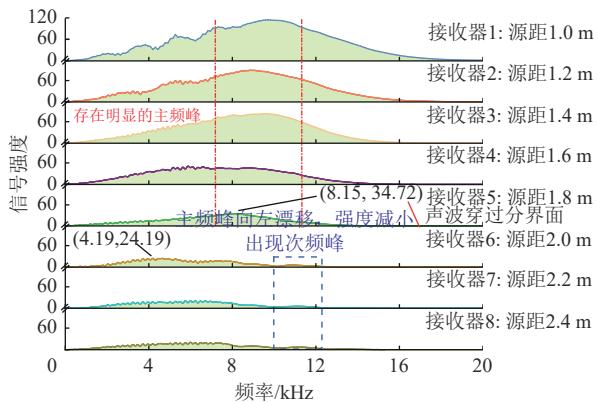


图 7 测点 2 处的全波信号频域谱

Fig.7 Frequency spectra of full waveform signals at measurement point 2

横波、透射纵波以及透射横波; 5.24 ms 时上界面反射波抵达至接收器阵列前部(第 1 个接收器处); 5.72 ms 时上界面反射波抵达至接收器阵列尾部(第 8 个接收器处)。

图 5c 为测点 3 的全波列信号, 上界面反射波首先抵达第 1 个接收器, 这是由于上界面位于测点 3 的左上方, 上界面反射波处于下行波场中; 而下界面反射波首

先抵达第 8 个接收器, 这是由于下界面位于测点 3 的右下方, 下界面反射波处于上行波场中。图 6c 为测点 3 处的波场快照, 0.53 ms 时直达波抵达接收端; 2.40 ms 时上界面反射波抵达接收端处; 3.88 ms 时候下界面反射波抵达接收端处。

3.2 反演结果

图 8a 是接收器 1 在 39 个位置测点处获取的波形数据绘制到一起的全波列时间-深度域信号, 分别在时间(纵坐标)与空间(横坐标)的维度上展示了接收波的变化规律。橙色椭圆处(P 点附近)是仪器从底板岩层向煤层过渡的位置, 红色线表示仪器在地层中的直达波(椭圆左侧红线表示底板岩层中直达波, 椭圆右侧红线表示煤层中直达波, 红色箭头所指的区域, 为左侧红线表示的底板岩层直达波信号的波峰部分)。蓝色线表示仪器接收到的煤层下界面反射波, 绿色线表示仪器接收到的煤层上界面反射波。各个深度点上接收器 1 获取的声波信号里直达波(首波)的声时基本相同, 显示为垂直同相轴(红色线); 而反射波随反射界面形状的不同显示为不同形状同相轴, 倾斜地层界面的反射波近似为

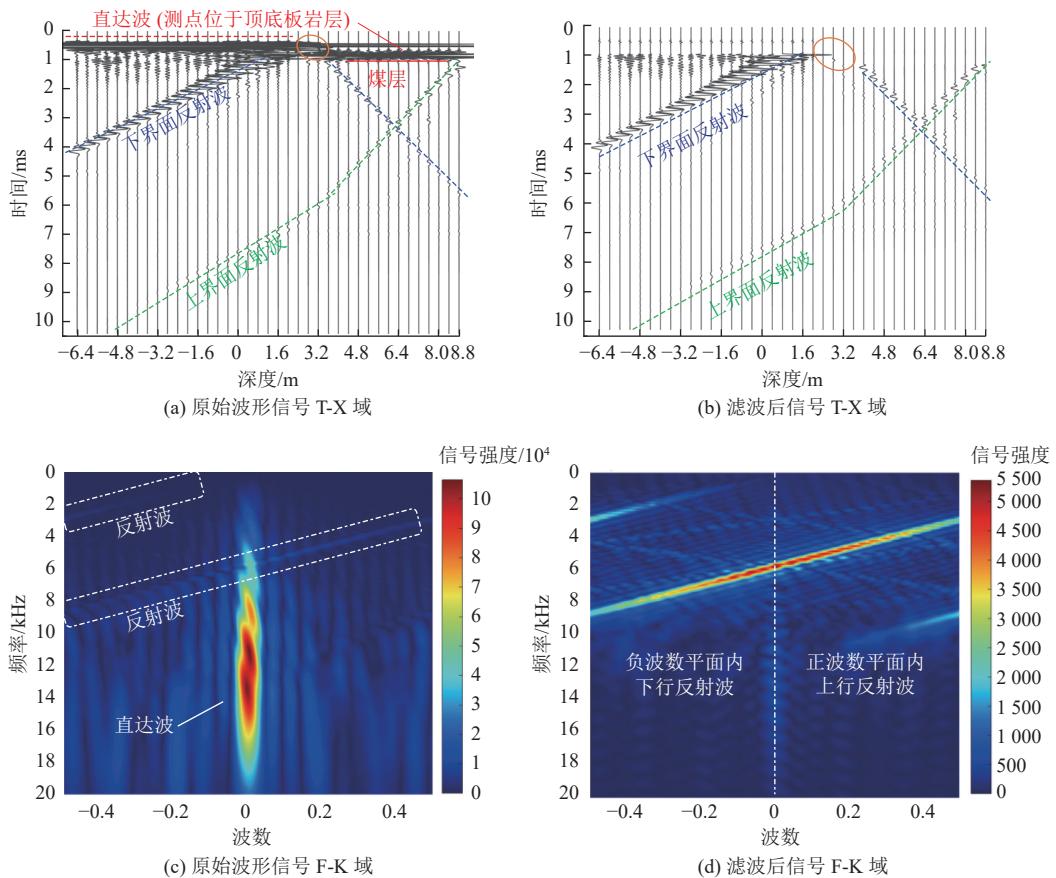


图 8 滤波前后全波列信号特征

Fig.8 Characteristics of full waveform before and after filtering

倾斜同相轴(蓝色线与绿色线)。

结合图 8a 可知, 反射波的波至时间随声源纵坐标变化而呈现的规律与孔周煤岩界面的形态表现出了很好的一致性: (1) 椭圆右侧红线低于左侧红线, 这是由于声波在煤层中传播速度更慢, 直达波抵达得更晚; 同时右侧红线所表示的煤层直达波幅值更小, 这说明声波在煤层中传播时能量损耗更大。当测点趋近于仪器从底板岩层向煤层过渡的位置时, 直达波的变化特征为信号幅度的骤降与声时的增大, 而界面反射波的改变为倾斜同相轴的斜率变化, 根据此特征可以判断出钻孔 2 号中煤层与底板岩层交界点(P 点)的大致位置。(2) 随着测点逐渐逼近煤岩分界面, 下界面反射波和直达波的时域间隔不断缩小; 当测点与煤岩分界面的距离缩短到一定程度时, 下界面反射波会被直达波所淹没; 紧接着测点逐渐远离煤岩分界面, 下界面反射波和直达波的时域间隔不断增大。通过反射波与直达波在时间域上的相对位置, 也可以判断出钻孔 2 号中煤岩交界点(P 点)的大致位置。(3) 椭圆右侧上界面反射波所构成的倾斜同相轴的斜率绝对值要高于左侧, 这是由于声波在煤层中的传播速度更慢, 从而造成的相邻测点之间反射波声时间隔的增大。同理椭圆右侧下界面反射波所构成的倾斜同相轴的斜率绝对值也高于左侧, 同时下界面反射波所

构成的倾斜同相轴的斜率经过椭圆位置后从正值变为了负值, 这是由于当测点处于底板岩层时, 下界面位于测点的左上方, 接收到的下界面反射波为下行波场; 随着测点穿过钻孔 2 号中的煤岩交界点(P 点)后, 下界面位于测点的右下方, 接收到的下界面反射波为上行波场。

图 8c 为原始共源距组合数据波形信号变换到 F-K 域的图像, 可以看到直达波位于频率波数谱中的低波数值区域(横坐标波数 K 为低值), 且斜率高、信号强度大; 而反射波处于高波数值区域且斜率较低, 因此, 可以设置相应的滤波器将直达波剔除。去除直达波信号后的 F-K 域图像如图 8d 所示, 反射波信号被清晰地展现出来, 接着对图 8d 进行二维傅里叶逆变换得到剔除直达波后的时间-深度域信号如图 8b 所示, 滤波后的时间-深度域信号中直达波基本都被剔除。在 F-K 域中, 上行反射波波场位于正波数平面内, 而下行反射波波场位于负波数平面内, 可以通过此特性设置相应的滤波器将上下行波场分离开来。按上述方法对其他 7 组共源距组合也进行 F-K 滤波操作, 将原始波形信号中的直达波剔除, 再对其进行上下行波场分离。最后将所有滤波完成后的数据整合到一起, 进行后续的反射波增强与偏移成像步骤。

将滤波后的共源距组合数据, 重新排列整理为其中

心点组合,整理后共 152 组共中心点组合数据,相邻中心点间距 0.1 m,其位置由-7.2 m 到 7.9 m。由于各个声源与接收器组合下的反射波信号路径不同,2 个反射波抵达次序不同,因此,首先需要通过动校正将每个共中心点组合中的 2 个反射波校正到同一声时,再对其进行叠加实现反射波增强。叠加后的界面反射波时间-

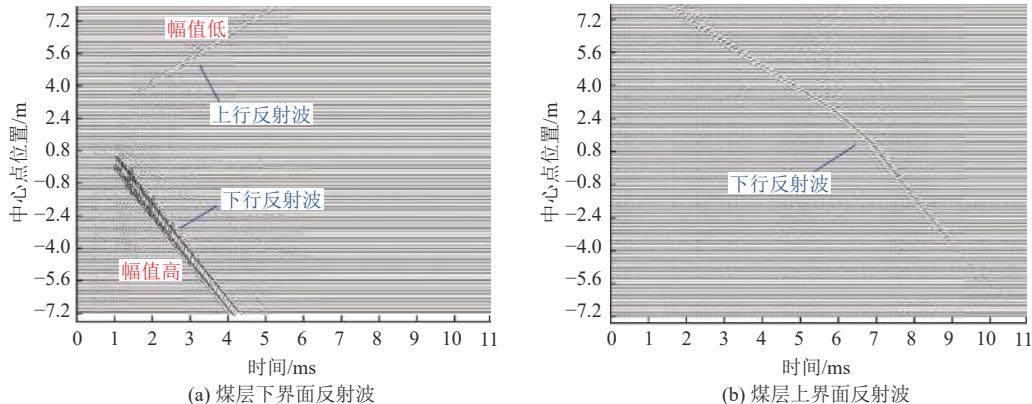


图 9 共中心点组合动校正后的叠加波形

Fig.9 Schematic diagrams showing the superimposed waveforms after dynamic correction of combined data sharing common midpoints

对叠加增强后的反射波信号进行 F-K 法偏移成像,图 10a 是偏移前下界面与上界面反射波成像出的图像,此时反射波所处的位置为波场信号 $u(0, z, t)$ 处,通过 F-K 法偏移将反射波的位置由 $u(0, z, t)$ 处移至 $u(x, z, 0)$ 处,这样便将反射波归位到了反射界面上产生该反射波的反射点上,所有的反射点即可构成反射界面。

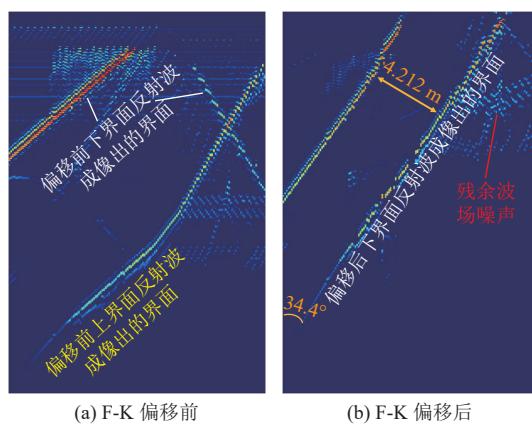


图 10 反射波构成的煤岩界面成像

Fig.10 Images of coal-rock interfaces formed by reflected waves

通过 F-K 法偏移后的影像如图 10b 所示,成像所得的煤层形状与原始模型一致,煤层上界面与下界面相互平行;煤岩分界面倾角为 55.6°,与正演模型误差为 0.4°,相差了 0.714%,精度为 99.29%;煤层相较于原始模型偏宽,煤厚为 4.212 m,与正演模型误差为 0.212 m,相差了 5.30%,精度为 94.70%。总体而言,偏移成像结果与原始模型相似度高,这说明声波远探测技术在满足

深度域信号如图 9 所示。其中图 9a 中下行反射波的信号最为明显,信噪比高,这是由于该处的反射波仅在底板岩层中进行传播,能量衰减较小。而上界面反射波的信号较弱,因此在后续偏移成像的过程中对其进行相应的放大。

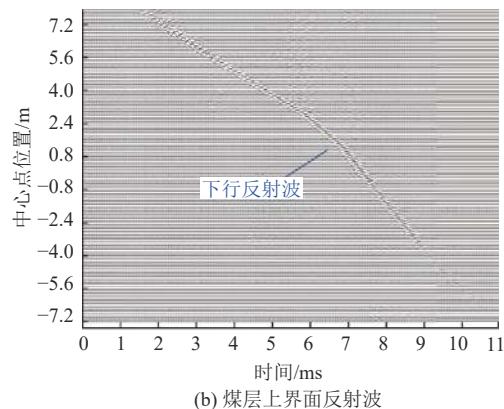


图 9 共中心点组合动校正后的叠加波形

较大探测范围的同时,依然可以实现孔周煤岩界面的清晰成像。

4 结论

a. 提出基于穿层钻孔声波远探测技术的煤岩界面成像方法,为声波远探测技术在煤矿中的应用找到了全新的场景。该方法通过结合井下的穿层钻孔群,可以实现工作面的整体勘探,从而构建煤层的三维地质模型。

b. 结合井下地质条件,利用 COMSOL Multiphysics 构建煤系单极声波远探测数值模型,通过模型正演阐述了远探测声波在煤系中的传播规律:声波在煤层中速度更慢、衰减更快,当声波穿过煤岩界面时,其主频会向低频段发生明显的漂移,同时在高频区域分化出次频峰。

c. 反射波的波至时间随声源纵坐标变化而呈现的规律与孔周煤岩界面的形态表现出了很好的一致性,采用寻峰算法优化改进 F-K 法的滤波效果,精准反演出煤岩界面的位置与构造形态,成像结果与原始模型相似度高,煤岩界面倾角与正演模型误差为 0.4°、煤层厚度误差为 0.212 m,表明了本方法具有进行煤岩界面探测的可行性和潜力。

d. 反射波信号的提取是实现煤岩界面高精度成像的关键,本文的数值模拟中环境噪声较少,可以提取较为明显的反射波。但在实际工程中,复杂的井下环境以及声波在煤层中衰减效应,会使接收信号的信噪比降低。今后可围绕如何利用本技术探测实际煤矿小构造以及煤系反射声波信号的高效提取进一步开展研究。

符号注释:

c 为刚度折损系数; $\mathbf{C}^* = \eta \mathbf{M}$ 为阻尼矩阵; 阻抗 \mathbf{d}_i 为输入的对角线矩阵; f_0 为频率, $f_0 = 15\ 000\ \text{Hz}$; \mathbf{F} 为外力载荷, \mathbf{N} ; \mathbf{I} 为单位矩阵; $\mathbf{K}^* = c \mathbf{K}$ 为刚度矩阵; \mathbf{K} 为总体刚度矩阵; \mathbf{M} 为质量矩阵; \mathbf{n} 为边界处的单位法向向量; t 为时间, s ; v 为振动速度, m/s ; v_p 和 v_s 分别为介质材料中的纵波和横波波速, m/s ; T_0 为周期, s ; \mathbf{u} 为位移矢量; η 为质量比例阻尼稀释系数; τ 为边界处的切向向量; σ 为边界应力, Pa ; ρ 为介质密度, kg/m^3 。

参考文献(References)

- [1] LI Peng, CAI Meifeng, GUO Qifeng, et al. Current stress field and its relationship to tectonism in a coal mining district, central China, for underground coal energy exploration[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 5313–5328.
- [2] LI H. Major and minor structural features of a bedding shear zone along a coal seam and related gas outburst, Pingdingshan coalfield, northern China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2001, 47(2): 101–113.
- [3] ZHOU B, HATHERLY P, SUN W. Enhancing the detection of small coal structures by seismic diffraction imaging[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2017, 178: 1–12.
- [4] 焦阳, 窦文武, 谭菁, 等. 回采工作面地质构造精细化综合探测技术研究与应用[J]. 中国煤炭, 2019, 45(11): 53–58.
- JIAO Yang, DOU Wenwu, TAN Jing, et al. Research and application of fine comprehensive detection technology for geological structure of working face[J]. *China Coal*, 2019, 45(11): 53–58.
- [5] WANG H, WANG Q, HUANG L, et al. Intelligent decision-making system for integrated geological and engineering of deep coal-bed methane development[J]. *Energy & Fuels*, 2023, 37(18): 13976–13984.
- [6] 程建远, 朱梦博, 王云宏, 等. 煤炭智能精准开采工作面地质模型梯级构建及其关键技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2285–2295.
- CHEUNG Jianyuan, ZHU Mengbo, WANG Yunhong, et al. Cascade construction of geological model of longwall panel for intelligent precision coal mining and its key technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(8): 2285–2295.
- [7] JIANG Bici, CHENG Jianyuan, LI Ping, et al. Using BHR to detect coal seam interface in coal mine[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2023, 209: 104894.
- [8] 蒋必辞, 程建远, 李萍, 等. 基于钻孔雷达的透明工作面构建方法[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(1): 128–135.
- JIANG Bici, CHENG Jianyuan, LI Ping, et al. Construction method of transparent working face based on borehole radar[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(1): 128–135.
- [9] 范涛, 李萍, 张幼振, 等. 基于聚类的煤矿井下钻孔瞬变电磁异常响应边界成像方法[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(7): 63–69.
- FAN Tao, LI Ping, ZHANG Youzhen, et al. Imaging method of borehole transient electromagnetic anomaly response boundary in coal mines based on clustering[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(7): 63–69.
- [10] TANG Hongzhi, YANG Haiyan, LU Guangyin, et al. Small multi-turn coils based on transient electromagnetic method for coal mine detection[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2019, 169: 165–173.
- [11] XUE Guoqiang, CHEN Wen, CHENG Jiulong, et al. A review of electrical and electromagnetic methods for coal mine exploration in China[J]. *Ieee Access*, 2019, 7: 177332–177341.
- [12] 牛德成, 苏远大. 基于声波远探测的浅海软地层邻井眼成像方法[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(6): 21–27.
- NIU Decheng, SU Yuanda. Adjacent borehole imaging method based on acoustic remote detection in shallow unconsolidated formations[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(6): 21–27.
- [13] HORNBY B. E Imaging of near-borehole structure using full-waveform sonic data[J]. *Geophysics*, 1989, 54(6): 747–757.
- [14] TANG Xiaoming, ZHENG Y, PATTERSON D. Processing array acoustic-logging data to image near-borehole geologic structures[J]. *Geophysics*, 2007, 72(2): E87–E97.
- [15] TANG Xiaoming, GLASSMAN H, PATTERSON D. Single-well acoustic imaging in anisotropic formations[J]. *Geophysics*, 2008, 73(4): D11–D16.
- [16] 赵旭东, 李国英, 刘炳忠. 远探测声波测井仪发射探头研究[J]. 测井技术, 2004, 28(6): 540–542.
- ZHAO Xudong, LI Guoying, LIU Bingzhong. On transmitting transducer of far detecting acoustic logging tool[J]. *Well Logging Technology*, 2004, 28(6): 540–542.
- [17] 张承森, 肖承文, 刘兴礼, 等. 远探测声波测井在缝洞型碳酸盐岩储集层评价中的应用[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(3): 325–328.
- ZHANG Chengsen, XIAO Chengwen, LIU Xingli, et al. Application of remote detection acoustic logging to fractured-vuggy carbonate reservoir evaluation[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2011, 32(3): 325–328.
- [18] 柴细元, 张文瑞, 王贵清, 等. 远探测声波反射波成像测井技术在裂缝性储层评价中的应用[J]. 测井技术, 2009, 33(6): 539–543.
- CHAI Xiyuan, ZHANG Wenrui, WANG Guiqing, et al. Application of remote exploration acoustic reflection imaging logging technique in fractured reservoir[J]. *Well Logging Technology*, 2009, 33(6): 539–543.
- [19] 董经利, 许孝凯, 张晋言, 等. 声波远探测技术概述及发展[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(2): 566–572.
- DONG Jingli, XU Xiaokai, ZHANG Jinyan, et al. Overview and development of acoustic far detection technology[J]. *Progress in Geophysics*, 2020, 35(2): 566–572.
- [20] 唐晓明, 魏周拓. 声波测井技术的重要进展: 偶极横波远探测测井[J]. 应用声学, 2012, 31(1): 10–17.
- TANG Xiaoming, WEI Zhou tuo. Significant progress of acoustic logging technology: Remote acoustic reflection imaging of a dipole acoustic system[J]. *Applied Acoustics*, 2012, 31(1): 10–17.
- [21] 李思亦, 唐晓明, 何娟, 等. 基于声波远探测和岩石力学分析的井旁裂缝有效性评价方法[J]. 石油学报, 2020, 41(11): 1388–1395.
- LI Siyi, TANG Xiaoming, HE Juan, et al. Fracture characterization combining acoustic reflection imaging and rock mechanics[J].

- Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(11): 1388–1395.
- [22] 唐晓明, 李盛清, 许松, 等. 页岩气藏水平测井裂缝识别及声学成像研究[J]. 测井技术, 2017, 41(5): 501–505.
- TANG Xiaoming, LI Shengqing, XU Song, et al. Acoustic characterization and imaging of shale gas fractures in horizontal wells: Field case study in the Sichuan Basin of southwest China[J]. Well Logging Technology, 2017, 41(5): 501–505.
- [23] TANG Xiaoming. Imaging near-borehole structure using directional acoustic-wave measurement[J]. *Geophysics*, 2004, 69(6): 1378–1386.
- [24] 李盛清. 声波远探测成像处理方法及地质应用研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- LI Shengqing. A study on borehole acoustic reflection imaging and geological application[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [25] LIU Liu, SHI Zhenming, TSOFLIAS G P, et al. Detection of karst voids at pile foundation by full-waveform inversion of single borehole sonic data[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, 152: 107048.
- [26] CHEN Xuelian, TANG Xiaoming, QIAN Yuping. Simulation of multipole acoustic logging in cracked porous formations[J]. *Geophysics*, 2014, 79(1): D1–D10.
- [27] WANG Hua, TAO Guo, ZHANG Kuo, et al. Borehole acoustic reflection logging by ffdm and fem simulations and data analysis[J]. Seg Technical Program Expanded Abstracts, 2013, 32: 621–625.
- [28] 解闯, 宋鹏, 谭军, 等. 声波方程变网格有限差分正演模拟的虚假反射分析[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(2): 639–648.
- XIE Chuang, SONG Peng, TAN Jun, et al. Analysis of spurious reflections of variable grid finite difference forward modeling based on acoustic wave equation[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(2): 639–648.
- [29] LAI Jin, WANG Guiwen, FAN Zhuoying, et al. Fracture detection in oil-based drilling mud using a combination of borehole image and sonic logs[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 84: 195–214.
- [30] TANG Xiaoming, CHEN Xuelian, XU Xiaokai. A cracked porous medium elastic wave theory and its application to interpreting acoustic data from tight formations[J]. *Geophysics*, 2012, 77(6): D245–D252.
- [31] WANG Bing, TAO Guo, WANG Hua, et al. Extracting near-borehole P and S reflections from array sonic logging data[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2011, 8(2): 308–315.
- [32] 魏周拓, 陈雪莲, 范宜仁, 等. 井旁地质界面的反射波模拟及 f-k 偏移成像[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(36): 9044–9047.
- WEI Zhou tuo, CHEN Xuelian, FAN Yiren, et al. Study of the sound field numerical simulation and prestack f-k migration imaging of near-borehole geological interface[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(36): 9044–9047.
- [33] 闫怡飞, 赵云, 宋胜利, 等. 基于反射声波测井有限元方法的井旁裂缝分布特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(3): 57–63.
- YAN Yifei, ZHAO Yun, SONG Shengli, et al. Near wellbore fracture distribution characteristics based on acoustic reflection logging finite element method[J]. Journal of China University of Petroleum,
- roleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(3): 57–63.
- [34] 雪宇超. 井旁地应力对全波列声波测井影响的正反演研究及应用[D]. 西安: 西安石油大学, 2021.
- XUE Yuchao. Research and application of forward and inverse analysis of the influence of borehole in-situ stress on the full-wave sonic logging[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2021.
- [35] 邓军, 王津睿, 任帅京, 等. 声波探测技术在矿井领域中的应用及展望[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(6): 149–162.
- DENG Jun, WANG Jinrui, REN Shuaijing, et al. Application and prospect of acoustic detection in the mining sector[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(6): 149–162.
- [36] HUANG Linlin, LIU Xiangjun, YAN Sen, et al. Experimental study on the acoustic propagation and anisotropy of coal rocks[J]. *Petroleum*, 2022, 8(1): 31–38.
- [37] 孟召平, 张吉昌, TIEDEMANN J. 煤系岩石物理力学参数与声波速度之间的关系[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1505–1510.
- MENG Zhaoping, ZHANG Jichang, TIEDEMANN J. Relationship between physical and mechanical parameters and acoustic wave velocity of coal measures rocks[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5): 1505–1510.
- [38] WANG Hua, TAO Guo, SHANG Xuefeng. A method to determine the strike of interface outside of borehole by monopole borehole acoustic reflections[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 133: 304–312.
- [39] 薛洪来, 温哲. 煤矿隐伏小断层的瓦斯抽采钻孔探测方法[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(3): 69–77.
- XUE Honglai, WEN Zhe. The concealed small faults detection based on gas drainage boreholes along and cross the coal seam[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(3): 69–77.
- [40] 王斌. 中国地质钻孔数据库建设及其在地质矿产勘查中的应用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- WANG Bin. The construction of the national geological drilling database and its application in geological resource exploration[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [41] 车小花, 乔文孝, 阎相祯. 反射声波成像测井的有限元模拟[J]. 应用声学, 2004, 23(6): 1–4.
- CHE Xiaohua, QIAO Wenxiao, YAN Xiangzhen. Numerical simulation of borehole acoustic-reflection imaging using the finite element method[J]. Applied Acoustics, 2004, 23(6): 1–4.
- [42] 孙志峰, 陈洪海, 刘西恩. 超声反射成像测井的有限元分析[J]. 应用声学, 2013, 32(6): 495–500.
- SUN Zhifeng, CHEN Honghai, LIU Xien. The finite element analysis of ultrasonic reflection method used in acoustic logging[J]. Applied Acoustics, 2013, 32(6): 495–500.
- [43] 李丹. 反射声波测井的成像研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
- LI Dan. Study on imaging for acoustic reflection imaging logging[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2021.
- [44] 徐方慧, 王祝文, 武焕平. 基于有限差分方法的溶洞地层井孔声波数值模拟[J]. 石油物探, 2021, 60(3): 505–515.
- XU Fanghui, WANG Zhuwen, WU Huanping. Finite-difference modeling of borehole acoustic logging in formations with caves[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2021, 60(3): 505–515.

- [45] 赵云. 基于声波有限元的页岩气储层微裂缝分布规律研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- ZHAO Yun. Study on fracture distribution of shale gas reservoir based on acoustic finite element method[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [46] 朱特. 基于声波有限元法的页岩气储层压裂裂缝分析[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.
- ZHU Te. Analysis of the shale gas reservoir fracturing cracks based on the acoustic finite element method[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015.
- [47] 杨顶辉. 双相各向异性介质中弹性波方程的有限元解法及波场模拟[J]. 地球物理学报, 2002, 45(4): 575–583.
- YANG Dinghui. Finite element method of the elastic wave equation and wavefield simulation in two-phase anisotropic media[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(4): 575–583.
- [48] 李全贵, 凌发平, 胡千庭, 等. 煤系地层弹性波阶段性衰减特性分析[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(3): 466–477.
- LI Quangui, LING Faping, HU Qianting, et al. Analysis of phased attenuation characteristics of elastic wave in coal measure strata[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(3): 466–477.
- [49] 邓呈祥. 井中声波远探测三维数值模拟及成像方法研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019.
- DENG Chengxiang. Research on three-dimensional numerical modeling and imaging method of single-well acoustic reflection imaging logging[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2019.
- [50] 刘汇鑫. 压制井中直达波的声波远探测方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.
- LIU Huixin. Acoustic remote sensing logging method to suppress borehole direct wave[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2020.
- [51] 王迪. 叠前非平稳资料 Q 值扫描及反演的动校正方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
- WANG Di. Scan scheme Q estimation and inversion-based normal moveout correction based on non-stationary prestack gather[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2021.
- [52] 王莹, 周静, 刘豪, 等. 反射波提取及偏移叠加概述[J]. 山东化工, 2021, 50(21): 80–82.
- WANG Ying, ZHOU Jing, LIU Hao, et al. Summary of acoustic reflection detection technology[J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(21): 80–82.

(责任编辑 聂爱兰)