doi: 10.11720/wtyht.2026.0117
张晓明, 张建智. 时移孔间地震 CT 技术在煤层硬顶板压裂监测中的应用[J]. 物探与化探, 2026, 50(5): 991-999. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.0117
Zhang X M, Zhang J Z. Application of time-lapse cross-hole seismic tomography in hydraulic fracturing monitoring of hard coal seam roofs[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(5): 991-999. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.0117

时移孔间地震 CT 技术在煤层硬顶板压裂监测中的应用

张晓明[1], 张建智[2]
(1. 河北省地质矿产勘查开发局第五地质大队(河北省海洋地质环境调查中心), 河北 唐山 063000; 2. 中国煤炭地质总局 地球物理勘探研究院, 河北 涿州 072750)

摘 要: 针对煤层顶板水力压裂过程中"应力场—损伤场—渗流场"耦合演化难以精细刻画的技术瓶颈, 提出时移孔间地震 CT 监测方法。该方法融合孔中高密度三分量检波器阵列与动态速度场重建技术, 构建"激发—高密度接收—时移复测"的动态监测范式, 实现硬顶板压裂扰动下地层物性参数的高分辨率重构。在晋北某煤矿 4 号煤层上部硬顶板压裂区开展现场试验: 采用 24 道三分量检波器跨孔阵列, 通过压裂前后两次重复扫描, 结合各向异性约束的 SIRT 迭代算法及"CT 骨架+属性细节"的混合速度建模策略, 将成像垂向分辨率提升至 5 m, 空间分辨率优于 2.0 m。监测结果表明: 压裂后目标层段纵波速度平均降低约 100 m/s, 相干属性呈负异常, 均方根振幅呈正异常, 验证了压裂导致岩体破碎、裂隙发育的力学响应特征; 经 674 个高可靠性微震事件交叉验证, 低速异常体与微震事件云的优势走向偏差仅 2°, 体积交并比(IoU)达 0.71(95% 置信区间: 0.63～0.79), Hausdorff 距离为 18 m, 证实了该方法在压裂效果评估与压裂改造体积边界划定中的可靠性。本研究突破了现有监测手段在"应力—结构—功能"多尺度耦合表征上的局限, 为煤矿硬顶板水力压裂的动态监测提供了新的技术途径。

关键词: 时移地震; 硬顶板; 水力压裂; 孔间层析; 微震验证
中图分类号: P631; P31 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)05-0991-09

0 引言

坚硬顶板在煤矿开采中普遍具有高弹性模量、低泊松比及显著的应变软化特征, 其周期性破断常诱发冲击地压、矿震乃至突发性的顶板垮塌, 已成为制约煤矿安全、高效回采的风险源[1-2]。传统监测手段如钻孔应力计、顶板离层仪及常规微震系统虽能捕捉破断信号, 却难以刻画水力压裂诱导下应力场—损伤场—渗流场耦合演化的全过程[3-4]。例如, 在黄陵二号煤矿 215 工作面井下深孔定向区域水力压裂工程中, 虽通过微震事件统计验证了顶板关键层(15～45 m 覆岩)的整体弱化效果, 但无法解析压裂液滤失过程中孔隙压力扩散前沿与裂隙活化的时空对应关系[5]; 华丰煤矿基于矿山压力理论构建的顶板运动模型虽与微震监测结果具有一致性, 但该方法本质上属于准静态反演, 无法反映压裂瞬态载荷下 Timoshenko 梁式顶板的弯曲刚度衰减过程与弹性变形能密度峰值的迁移轨迹[6]; 坪上煤业采用的孔—巷联合微震系统虽将导水裂隙带高度测定误差压缩至 4.8%, 但其依赖微震事件数与频次密度的经验映射关系, 未能建立应力释放速率与裂隙分形增长维度之间的本构联系[7]。总之, 现有现场监测体系普遍偏重速度场的宏观重构, 缺失对岩体力学参数随时间动态变化特征的定量描述。

目前, 煤层硬顶板压裂的地震 CT 监测技术仍存在两类突出局限: 一方面, 现有煤矿地震 CT 方法多为单孔/跨孔单次扫描, 仅能获得静态速度结构, 无法识别压裂前后的微小物性变化, 且反演分辨率多低于 10 m, 难以满足压裂改造体积(simulated reservoir

收稿日期: 2026-05-19; **修回日期**: 2026-08-12
第一作者: 张晓明(1977-), 男, 汉族, 江西吉安人, 本科, 高级工程师, 研究方向为地球物理勘查。Email: 282106533@qq.com
通讯作者: 张建智(1978-), 男, 汉族, 宁夏中卫人, 正高级工程师, 研究方向为综合地球物理勘查技术。Email: 3224827@qq.com

volume,SRV)精细刻画需求；另一方面，现有时移地震 CT 研究多聚焦于孔隙型油气储层，未考虑煤矿硬顶板脆性强、层理发育、各向异性显著的地质特征，常规反演算法易产生速度假象，难以适应矿井强干扰、小尺度观测等复杂工况[8-11]。

时移地震作为油气勘探领域岩体动态响应监测的核心技术，近年来在硬岩工程与非常规能源开发领域逐步得到推广应用。传统地震 CT 多聚焦静态速度结构重建，而时移拓展则要求对压裂、采矿或爆破等扰动过程中介质弹性参数的连续演化进行高分辨率表征。在水力压裂监测场景中，当裂缝网络扩展引发孔隙压力重分布与应力场迁移时，静态建模已难以反映真实波速场的瞬态非线性变化[12]。尽管压裂孔 CT 观测系统凭借射线覆盖均匀性与采样密度优势，为迭代线性反演提供了更优的数据基础，但震源起震记录误差仍会导致旅行时残差累积，亟需通过更精细的预处理流程予以校正[13]。现有研究表明：依托 SIRT 算法实现断面波速异常区的空间识别，提取弱化梯度衰减特征，可有效刻画岩体动态损伤范围[14]；基于精确 Zoeppritz 方程的时移地震流体动态监测反演方法，显著提高了流体饱和度和压力变化的联合反演精度，可为注采策略优化提供可靠依据[15]。时移地震 CT 技术能够提供高分辨率地下结构成像，为硬顶板压裂效果的动态监测提供了新的思路[16]。

本文提出一种融合孔中高密度三分量检波器阵列、动态速度场重建技术的时移孔间地震 CT 方法，构建适配煤矿硬顶板压裂场景的观测与处理体系，实现对硬顶板压裂扰动下深层物性参数的高精度重构，突破了现有监测范式在“应力—结构—功能”多尺度耦合表征上的局限，为煤层顶板压裂效果定量评估提供了技术支撑，推动了时移地震 CT 在煤矿压裂监测领域的工程化应用。

1 时移孔间地震 CT 方法原理

孔间地震 CT 观测系统在工作面顶板压裂区，于 T1、T2 两口直井(孔间距 80 m)中部署 24 台三分量宽频带检波器。接收采用跨孔阵列，道间距为 2.5 m，接收段覆盖 200~400 m。激发点位于另一口井内，点距为 15 m，在目标层段(220~340 m)内共布设 9 个激发点。通过激发、接收井互换的观测方式，对目标层段(埋深 300~350 m)形成≥5 次/m 的射线密度，为高精度反演提供数据基础。激发源采用孔中可控震源，在压裂作业前、压裂作业结束且压裂液充分滤失后各实施 1 次重复扫描，两次扫描的激发参数、接收参数完全一致，保障数据的时间维度可比性与物理一致性，监测井相对位置见图 1。

针对煤矿井下强电磁、机械振动干扰特征，接收端集成自适应陷波与基于小波包分解的非局部均值去噪算法，可以有效压制工频干扰与随机噪声；初至拾取引入 GeoEast 平台 AI 初至拾取技术，结合人工交互质控，使 P 波到时拾取误差稳定在±0.5 ms 以内。反演过程引入各向异性约束的 SIRT 迭代算法，结合区域地质先验构建分层速度初始模型，将波速扰动异常阈值设定为背景值的−5%～+3%，精准识别因水力裂缝扩展、应力释放导致的波阻抗降低区。

为保障时移数据的重复性，避免非压裂因素导致的伪异常，压裂前后两次扫描采用完全一致的观测系统(激发点/接收点位置偏差<0.1 m)，预处理流程中采用地表一致性静校正(校正量误差<1 ms)、全局振幅归一化(以井中直达波振幅为基准校正)、常相位校正(相位偏差<5°)实现数据匹配；走时数据质控标准为：初至拾取误差<1 ms、同一激发点的走时重复误差<2 ms、连续扫描的走时相对偏差<0.5%，不符合标准的炮记录直接剔除，最终有效炮记录利用率达 92%，为后续高分辨率反演奠定了数据基础。

2 孔间地震时空分辨率提升策略

传统孔间地震 CT 仅开展直达波速度迭代反演，其分辨率通常大于 10 m，难以满足压裂精细刻画分辨率 2～5 m 的需求。本次提出了一套“三步走”的高分辨率速度建模策略，提升了成像精度。

第一步：构建高精度低频骨架。采用各向异性约束的 SIRT 迭代算法(参数：30 次迭代，收敛阈值<0.1%/次，各向异性权重 0.3)，以测井数据验证，反演速度相对误差小于 2%。

第二步：融合多尺度高频细节。将 CT 反演的低频速度场(0～10 Hz)与测井/VSP 的高频信息(>100 Hz)在频域进行加权融合(低频权重 0.7，高频权重 0.3)，再应用克里金插值(球状变异函数模型，变程 25 m)生成全频带速度模型，交叉验证平均绝对误差 22 m/s。

第三步：进行各向异性校正。利用椭圆各向异性模型(参数 ε=0.12，δ=0.08)对速度场进行方位校正，最终形成指导高精度成像的“CT 骨架+属性细节”混合速度模型。采用该策略后叠加剖面垂向分辨率由原始的 10 m 提升至 5 m(基于 λ/4 准则，主频 70 Hz)，验证了其方法的先进性。

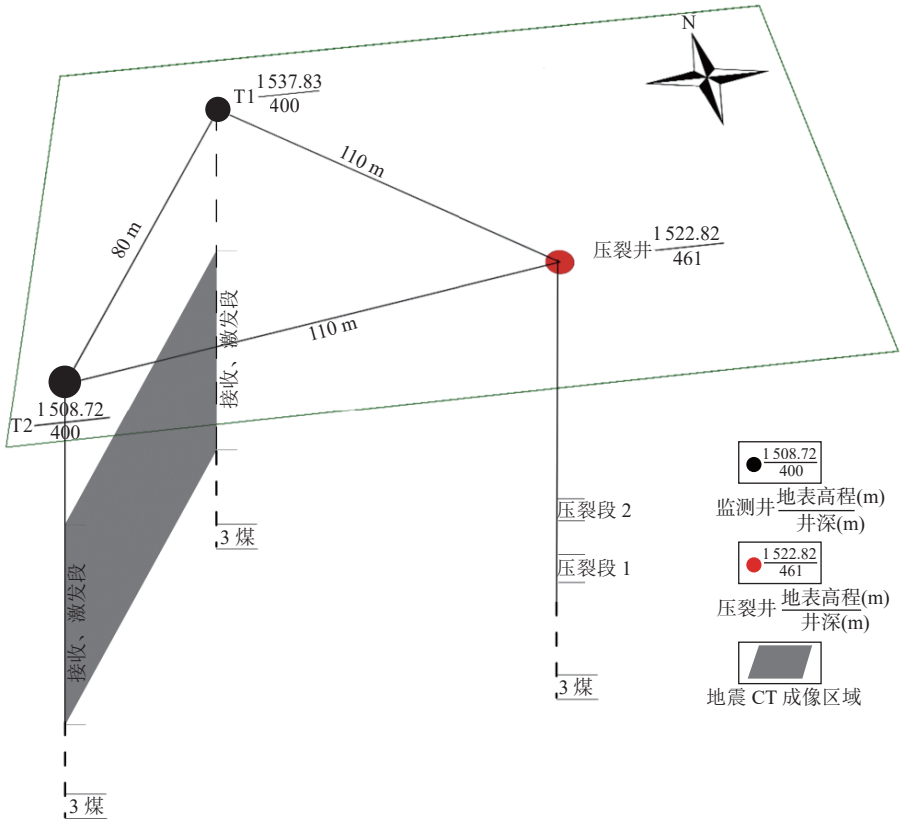


图 1　井位置空间关系示意

Fig. 1　Schematic of the spatial relationship of well locations

3　现场试验与结果分析

3.1　研究区概况与数据采集

晋北某煤矿可采煤层为山 4、3、5、8 号煤层, 其中山 4 号煤层直接顶为高岭质泥岩、砂质泥岩、泥岩、粉砂岩, 抗压强度 14.5～53.7 MPa; 3~5 号煤层直接顶由于岩浆的侵入破坏, 在东部变为火成岩, 为硅化煤顶板, 在岩浆岩侵入区顶板主要由砂质泥岩、高岭岩、高岭质泥岩、粉砂岩、泥岩组成, 其中岩浆岩抗压强度为 54.4～57.81 MPa, 泥质岩抗压强度为 11.3～71.3 MPa; 8 号煤层直接顶岩性为砂质泥岩、粉砂岩、泥岩、高岭质泥岩, 抗压强度 5.3～62.7 MPa, 平均 32.5～38.5 MPa, 整体属于典型的高硬度顶板。

弱化工作面关键层以减弱工作面来压强度, 同时增强顶煤透气性, 促进顶煤及时垮落, 避免瓦斯集中释放和采空区瓦斯大量涌出, 达到初采瓦斯超限治理的目的。根据矿方要求, 压裂关键层确定在山 4 煤层上部, K4~K5 之间的区域。压裂关键层分成 2 层 2 次压裂, 第一层(下部)压裂主要层位 47(K4)、45 及 43 号砂岩, 采用合层压裂; 第二层(中上部)压裂 41 号砂岩。压裂孔为直孔分段压裂, 压裂关键层确定为山 4 煤层上部 K4~K5 之间的硬砂岩层段, 分为 2 层分步压裂: 第一层(下部)压裂 K4、45 及 43 号砂岩, 采用合层压裂工艺; 第二层(中上部)压裂 41 号砂岩。压裂采用酸化+水力加砂复合压裂方式, 施工排量 12～16 L/s, 最高泵压 44.2 MPa, 累计注入液量 812 m^3, 支撑剂总量 10 t, 有效实现了对高弹性模量顶板岩体的定向弱化。

本次孔间地震 CT 数据采集采用孔间跨孔走时层析系统, 发射源为井中脉冲式重锤震源(瞬时出力 5×10^5 N, 扫频带宽 5～1 000 Hz), 接收阵列由 24 道三分量检波器组成, 空间采样间隔 0.5 ms, 记录长度 1.0 s。针对硬顶板强各向异性(层理面波阻抗差达 35%)与纵波速度横向梯度($\Delta v_P/v_P$>12%)的复杂地质条件, 通过优化初至拾取质控流程, 将初至拾取误差控制在±0.35 ms 以内, 显著提升了速度结构反演的稳定性, 孔间地震 CT 工作方式见图 2。

本次井间地震资料采用 90°正交三分量检波器接收, 获取的是全波场在三个分量上的投影。针对偏振参数随反射点深度变化的特点, 利用协方差矩阵计算时变偏振参数, 实现三分量数据的动态极化旋转与合成, 得到图 3 所示的纵、横波记录。该过程有效压制了纵波剖面上的横波干扰, 显著增强了横波剖面的能量, 为后续属性提取提供了高质量的数据基础。

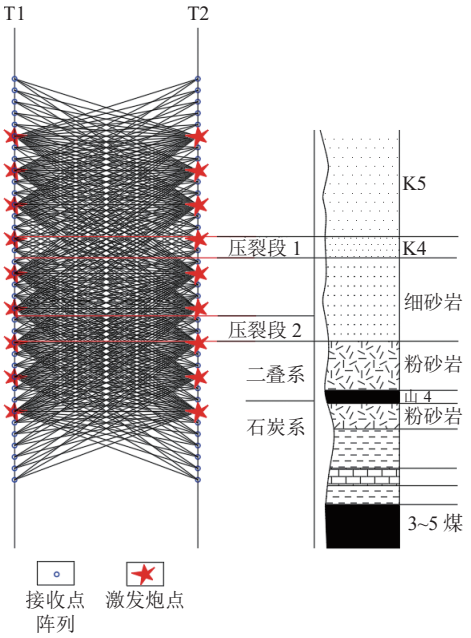


图 2　孔间地震 CT 工作方式示意

Fig. 2　Schematic of the seismic CT operation mode in the well

3.2　压裂诱导纵波属性演化特征

基于前述质控后的时移走时数据与优化的 SIRT 迭代算法，分别反演得到压裂前、压裂后的纵波速度模型，图 4 显示的压裂后速度降低范围（靠近 T2 井，约 100 m/s）与第一段压裂的施工范围（约 810 m^3 液量注入）及微震事件集中区域呈现出高度的空间一致性。这种波场—速度—事件的空间重叠，证实了 CT 监测结果准确捕捉了压裂诱导的物性变化。

反射波叠加成像采用垂直地震剖面—共深度点（VSP-CDP）变换成像方法，对压裂前后的上、下行纵波反射波进行叠前时间偏移，选择 2.5 m 的面元间距获得高分辨率时间域剖面。图 5 的成像剖面中，压裂层段（250～300 ms）波组关系清晰，信噪比高，同相轴连续性较好，纵波主频达 70 Hz，频宽约 110 Hz。对比压裂前后剖面并计算差值，差值剖面中红色圈出的压裂层段对应位置地震波场变化显著，结合压裂施工参数分析，该波场变化是由压裂诱导的岩体结构改变导致。

井间地震反射纵波剖面不仅包含地下地层构造信息，还蕴含岩石物理特征与流体响应信息。通过地震属性提取技术可挖掘这些隐蔽信息，用于分析压裂前后岩体的结构变化。分别提取了相干属性与均方根振幅属性开展综合分析。

相干属性基于多道振幅相似性计算，将振幅数据体转化为相关系数据体，可突出地层不连续性，为解释小断层、裂缝发育带提供依据。对压裂前后的井间地震剖面提取相干属性并计算差值，图 6 的差值剖面中压裂段对应的时间段内相干值呈明显负异常，说明压裂后地层非均质性增强、破碎程度提升，裂隙发育程度显著高于压裂前。

对压裂前后的井间地震剖面提取均方根振幅剖面并作差值，图 7 的差值剖面上压裂段对应的时间段内均方根振幅呈明显正异常。该现象可从岩石物理机制角度解释：压裂过程中高压流体注入硬顶板后，原生孔隙被流体充填、岩体内部产生大量新生张性裂隙，地层等效孔隙度升高且裂隙面产生散射效

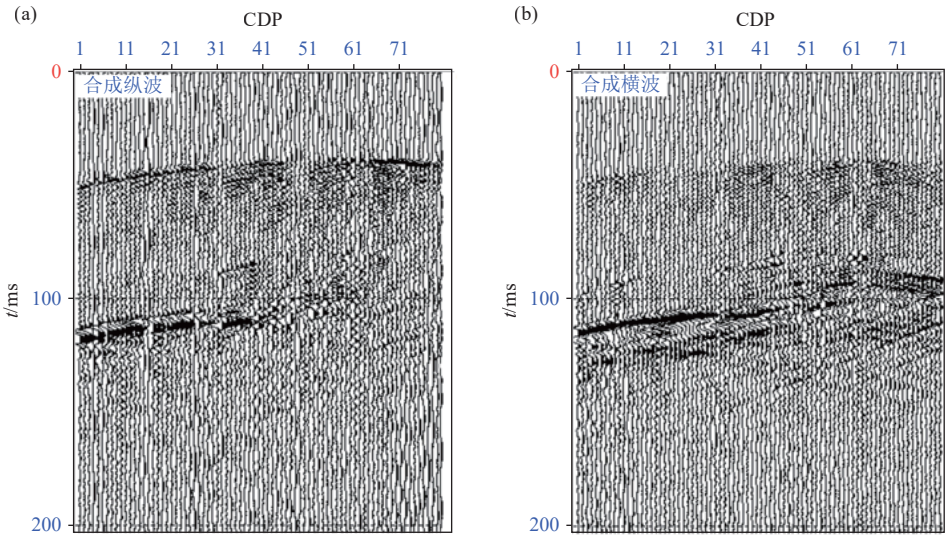
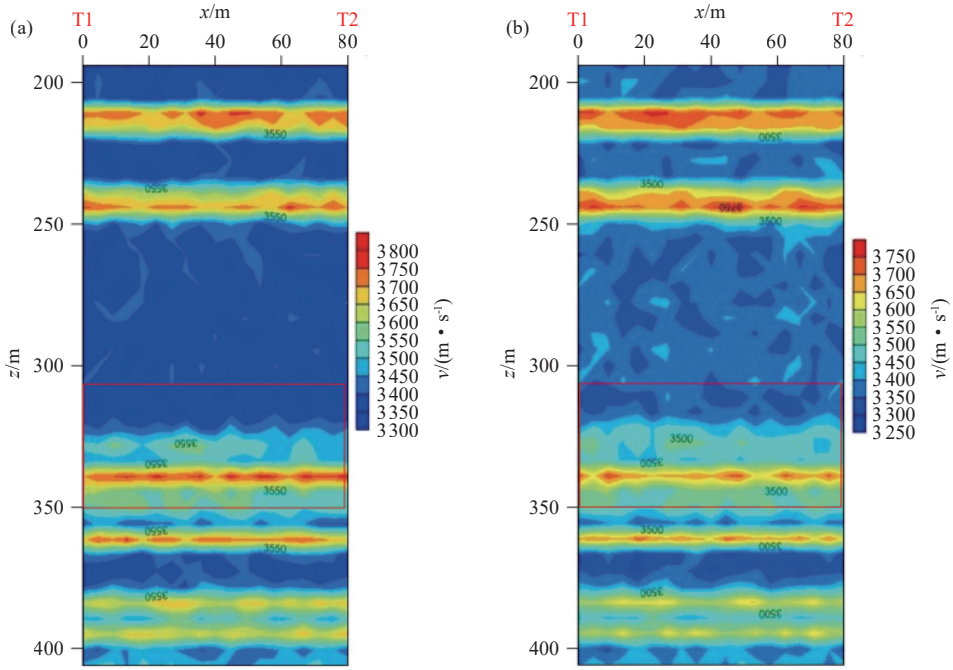


图 3　井间三分量合成后的纵波 (a)、横波 (b) 记录（激发 T1/接收 T2 井，接收井段 200～400 m，震源点 295 m）

Fig. 3　P-wave(a) and S-wave(b) records after the synthesis of three components of the wells

(excitation T1/reception T2 wells, the receiving section is 200~400 m, the source point is 295 m)



a—压裂前纵波速度模型; b—压裂后纵波速度模型

a—P-wave velocity model before fracturing; b—P-wave velocity model after fracturing

图 4　压裂前后 T1/T2 井纵波速度模型

Fig. 4　P-wave velocity model of wells T1/T2 before and after fracturing

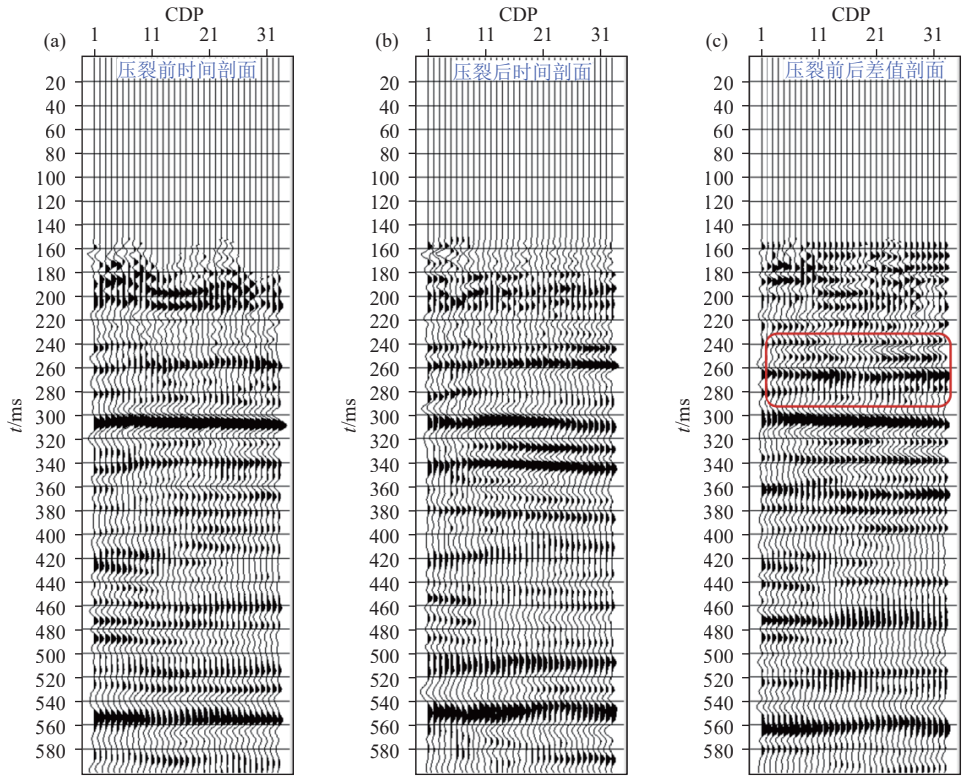


图 5　压裂前后井间地震反射纵波剖面及其差值剖面

Fig. 5　Seismic reflection P-wave profiles between wells before and after fracturing and their difference profiles

应, 导致地震波传播过程中能量衰减减弱、反射振幅增强, 说明岩层向破碎方向发展, 与纵波速度降低的物性变化规律一致。

通过多属性分析时移井间地震数据, 速度场、波形差值、相干属性和振幅属性均反映出压裂前后地层发生了明显变化, 说明压裂显著改变了压裂层段

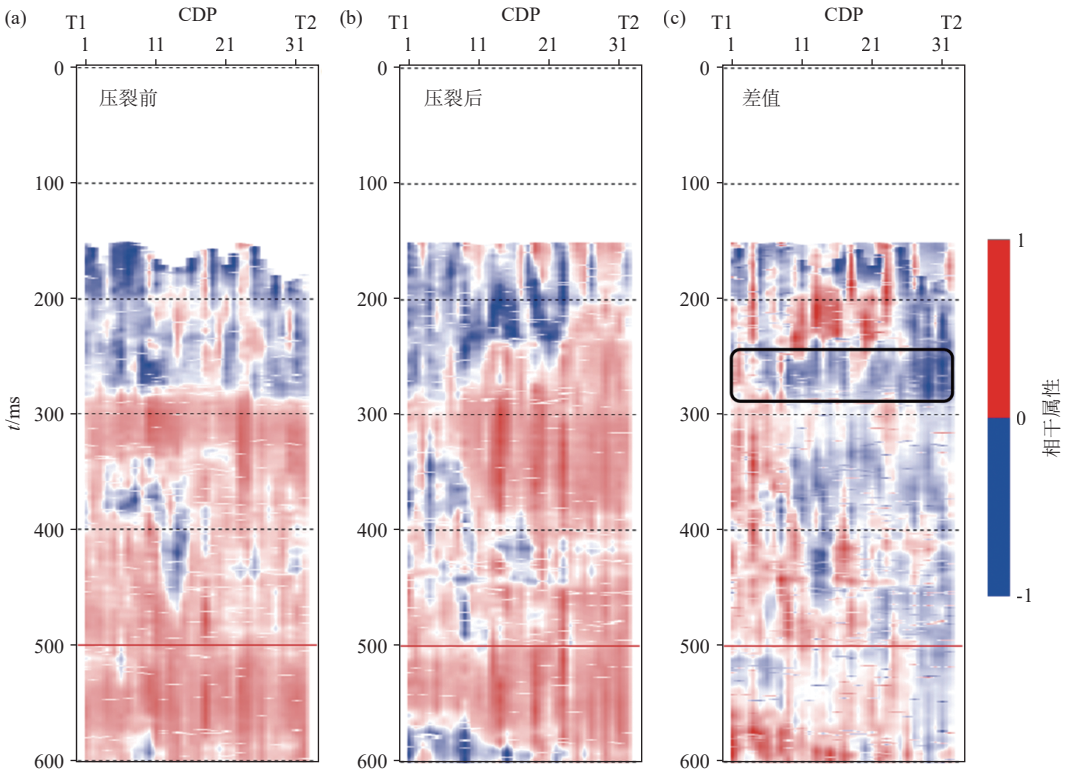


图 6　压裂前后相干属性剖面及其差值剖面

Fig. 6　The coherent attribute profiles before and after fracturing and their difference profiles

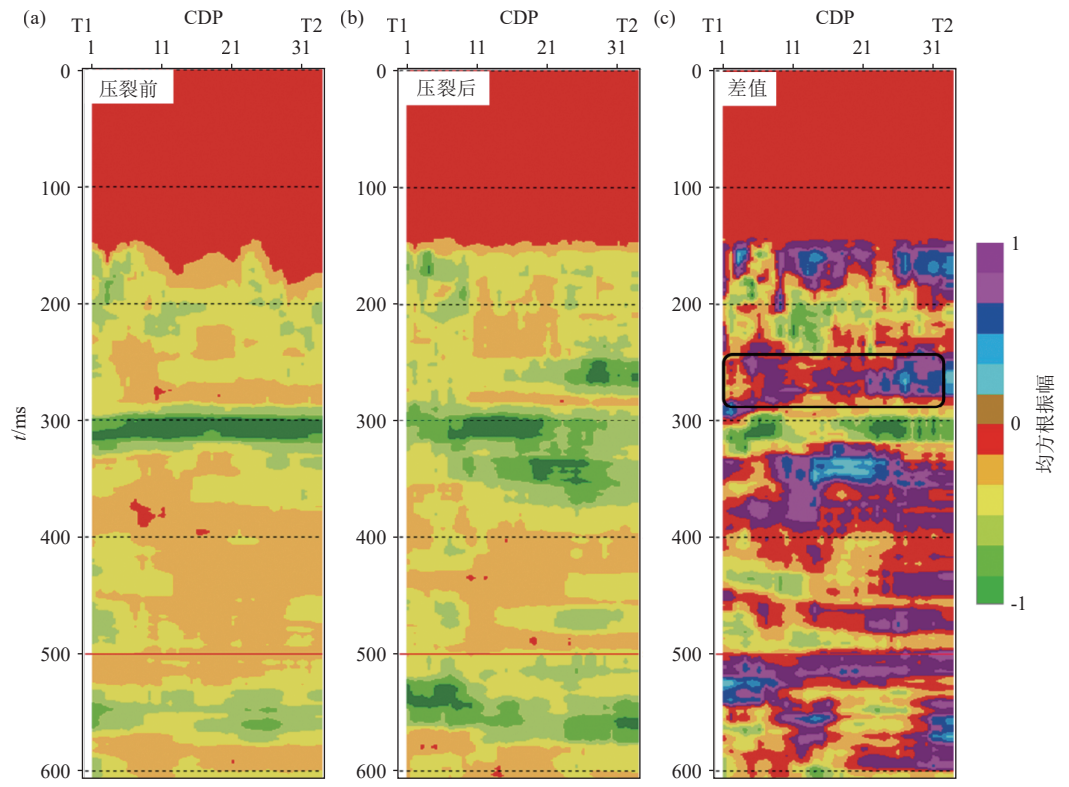


图 7　压裂前后均方根振幅属性剖面及其差值剖面

Fig. 7　Root-mean-square amplitude attribute profiles before and after fracturing, as well as their difference profiles

的岩石强度与内部结构，达到了预期改造目的。

上述结果表明，本文提出的“CT 骨架—属性细节”混合建模、各向异性约束 SIRT 算法以及多参数交叉验证体系，在实际应用中得到了有效验证。

4　压裂监测结果可靠性验证

为验证时移孔间地震 CT 成像结果的可靠性, 构建了多源异构数据交叉验证体系, 通过独立地球物理观测的时空一致性分析, 以量化评价时移地震 CT 成果的物理可信度与地质可解释性。

1)微震事件表征: 微震监测通过记录岩石破裂释放的弹性波, 可获取压裂过程中裂缝网络的时空演化轨迹。相较于地震 CT 反演的间接物性参数(速度、阻抗), 微震事件空间定位提供了点源尺度(米级精度)的裂隙发育直接证据, 其丛集分布、震源机制解及能量释放特征, 构成验证 CT 成像结果的独立约束条件。本次共采集压裂诱发的有效微震事件 895 个, 经信噪比筛选与初至拾取质控, 最终采用 674 个高可靠性事件(信噪比>3 dB、至少 6 个检波器记录、定位残差 RMS<15 ms)建立验证基准。孔中微震事件的选取要求: ①信噪比>3 dB 为《煤矿微震监测系统通用技术条件》(NB/T 11526—2024)规定的有效事件最低阈值, 可排除井下电磁、机械振动产生的强干扰信号; ②至少 6 个检波器记录是满足三维定位的最少检波点数量, 可避免定位结果的多解性; ③定位残差 RMS<15 ms 对应井下 200 m 孔距观测条件下的定位误差<10 m, 与 CT 反演的空间分辨率匹配, 若阈值过松会导致定位偏差过大, 过严则会损失超过 30% 的有效破裂事件, 无法覆盖完整的裂隙发育范围。

2)一致性验证: 将地震 CT 反演所得的低速异常体(速度降幅>8%, 相对于背景模型)与微震事件空间分布进行三维叠合分析, 结果显示两者在几何形态、破裂机制、活动强度上均呈现显著相关性: ①走向一致性: 低速异常体长轴走向为 NE65°±5°, 与微震事件云拟合平面的优势走向(NE63°±8°)偏差仅 2°, 且与区域最大水平主应力方向(NE60°～70°)高度一致, 表明 CT 反演准确捕捉了压裂裂缝受应力控制的延伸机制。②震源机制匹配: 微震事件中 82% 为张性/张剪性破裂, 与低速异常体分布范围完全重合; 仅 18% 的剪性破裂事件分布在低速异常体边缘, 对应压裂过程中裂隙尖端的应力集中区, 与硬顶板压裂“中心张裂、边缘剪滑”的扩展规律一致。③能量—速度关联: 微震事件累计能量释放与 CT 速度降幅呈正相关, 高能量事件(>10^3 J)集中分布在速度降幅>15% 的区域, 对应压裂主裂缝发育带; 低能量事件(<10^2 J)分布在速度降幅 8%～15% 的区域, 对应次生裂隙发育带, 进一步验证了 CT 速度异常与裂隙发育程度的对应关系。

3)可靠性评价: 时移孔间地震 CT 解释剖面中人工裂隙带的物性分异判识逻辑得到多重佐证: ①低速异常对应裂隙发育区: 微震事件密度与 CT 速度降幅呈显著负相关, 建立“速度降低—微震活动—裂隙扩展”的可靠关联。②属性边界可信度: 地震 CT 低速异常体边界与微震事件包络面的 Hausdorff 距离为 18 m, 小于 CT 空间分辨率 2.0 m 的误差允许范围(孔间观测系统的空间分辨率随深度变化, 18 m 为微震水平定位误差(±15 m)与 CT 反演横向定位误差(±3 m)的合理叠加范围, 远小于 SRV 边界的最小刻画尺度(≥30 m), 不影响工程应用精度), 表明基于 CT 成果的 SRV 边界划定具有工程应用价值。③不确定性量化: 考虑微震定位误差(水平±15 m)与 CT 反演分辨率, 采用蒙特卡洛模拟(1 000 次随机扰动)评估空间重合度, 结果显示低速异常体与微震事件云的体积交并比(IoU)均值为 0.71(95% 置信区间: 0.63～0.79), 达到高可靠性等级(IoU>0.6)。

为进一步增强分析的可靠性, 本文从两个维度进行了验证: ①内部自洽性: 速度降低(约 100 m/s)、相干属性负异常、均方根振幅正异常三者物理意义一致, 共同指向岩体破碎、裂隙发育。②外部交叉验证: 通过 674 个高可靠性微震事件的空间分布与优先走向, 与 CT 反演的低速异常体进行了严格比对, 二者走向偏差仅 2°, 体积交并比(IoU)达 0.71(95% 置信区间: 0.63~0.79), 证实了 CT 解释结果的可信度。

5　结论

1)时移孔间震 CT 可精准识别硬顶板压裂后的物性变化, 压裂影响区域在速度差值剖面上表现为 100 m/s 左右的纵波速度降低, 相干属性呈负异常、均方根振幅呈正异常, 多属性联合解释可完整刻画压裂裂隙的空间展布, 垂向分辨率可达 5 m、空间分辨率优于 2.0 m, 满足硬顶板压裂 SRV 边界的刻画需求。

2) “CT 骨架—属性细节”混合速度建模与各向异性约束 SIRT 算法可有效适配硬顶板强各向异性地质特征, 垂向分辨率较传统方法提升 1 倍, 反演相对误差低于 2%, 解决了常规地震 CT 分辨率不足、速度假象多等问题。

3)微震多参数交叉验证体系实现了 SRV 边界的定量评价, 低速异常与微震事件云的 IoU 达 0.71, 边界圈定误差满足工程需求, 可为压裂效果评估提

供标准化验证流程。

需要指出的是，本文方法要求压裂前后观测系统完全一致，在实际操作中增加了施工难度。因此，本方法更适用于观测条件可控且源—检位置可精确复位的井间监测场景。未来，降低算法对数据质量的敏感性，并开发更便捷的源—检重复定位技术，将是推广应用的关键。

参考文献（References）：

[1] Guo F L, Peng M X, Meng X B, et al. Control mechanism of earthquake disasters induced by hard-thick roofs'Breakage via ground hydraulic fracturing technology[J]. Processes, 2025, 13(3): 919.

[2] 来兴平, 崔峰, 张尧, 等. 坚硬顶板破断尺度效应下冲击地压灾害演化规律及防控技术 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(5): 1843−1854.
Lai X P, Cui F, Zhang Y, et al. Evolution law and prevention technology of rock burst disasters under the scale effect of hard roof fracture[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(5): 1843−1854.

[3] 窦林名, 何江, 曹安业, 等. 冲击地压动静载耦合诱冲机理及防治技术 [J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 359−368.
Dou L M, He J, Cao A Y, et al. Coupling mechanism of dynamic and static loads inducing rock burst and prevention technology[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 359−368.

[4] 周宏伟, 杨光宇, 陈学慧, 等. 煤层顶板地面水力压裂微地震监测技术应用研究 [J]. 陕西煤炭, 2025, 44(12): 9−19.
Zhou H W, Yang G Y, Chen X H, et al. Application of microseismic monitoring technology for ground hydraulic fracturing of coal seam roof[J]. Shanxi Coal, 2025, 44(12): 9−19.

[5] 贾继平, 王道成, 李赵岩. 综采工作面硬厚顶板深孔定向区域水力压裂卸压技术 [J]. 陕西煤炭, 2025, 44(12): 106−111.
Jia J P, Wang D C, Li Z Y. Pressure relief technology of deep-hole directional regional hydraulic fracturing for hard and thick roof in fully mechanized working face[J]. Shanxi Coal, 2025, 44(12): 106−111.

[6] 韩国栋, 杨永杰, 张兴民. 华丰矿采场顶板破裂位置实时微地震监测技术研究 [J]. 安全与环境学报, 2006, 6(S1): 81-83.
Han G D, Yang Y J, Zhang X M. Research on real-time microseismic monitoring technology for roof rupture position in Huafeng coal mine stope[J]. Journal of Safety and Environment, 2006, 6(S1): 81-83.

[7] 杨晋华, 李刚, 江浩, 等. 基于孔—巷联合微震监测采场覆岩裂隙发育时空演化规律 [J]. 能源与环保, 2025, 47(10): 74−82.
Yang J H, Li G, Jiang H, et al. Spatial-temporal evolution law of overburden fracture development in stope monitored by borehole-roadway combined microseismic system[J]. China Energy and Environmental Protection, 2025, 47(10): 74−82.

[8] 刘斌, 李术才, 聂利超, 等. 基于跨孔地震 CT 的岩溶区桩基持力层评价方法研究 [J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 643−652.
Liu B, Li S C, Nie L C, et al. Evaluation method of pile bearing stratum in karst area based on cross-hole seismic CT[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2): 643−652.

[9] 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.
Pei Z L. Present status and progress of crosswell seismic tomography[J]. Progress in Geophysics, 2001, 16(3): 91−97.

[10] Tan J Q, Wang S X, Liu C. Feasibility of time-lapse seismic monitoring of CO_2 sequestration in a depleted gas field: The Strachan field, UK[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2021, 106: 103255.

[11] 刘润泽, 姜久红, 朱传庆. 同步迭代重建技术在井间地震层析成像中的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(3): 532−540.
Liu R Z, Jiang J H, Zhu C Q. Application of simultaneous iterative reconstruction technique in crosshole seismic tomography[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(3): 532−540.

[12] 张晓林, 张峰, 李向阳, 等. 水力压裂对速度场及微地震定位的影响 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(10): 3552−3560.
Zhang X L, Zhang F, Li X Y, et al. Influence of hydraulic fracturing on velocity field and microseismic location[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(10): 3552−3560.

[13] 骆循, 裴正林. 井间地震层析成像中的走时层析算法研究进展 [J]. 地球物理学进展, 2015, 30(4): 1692−1701.
Luo X, Pei Z L. Research progress of travel time tomography algorithms in crosswell seismic tomography[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(4): 1692−1701.

[14] 张平松, 李永盛, 杨华忠. 硬岩深孔爆破破坏范围地震波 CT 测试 [J]. 工程勘察, 2012, 40(5): 30−33.
Zhang P S, Li Y S, Yang H Z. Seismic wave CT test of hard rock deep-hole blasting damage range[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012, 40(5): 30−33.

[15] Zhou L, Liao J P, Yuan C, et al. Time-lapse seismic inversion for fluid dynamic monitoring based on the exact Zoeppritz equations[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(5): 2118−2128.

[16] Lumley D. Time-lapse seismic reservoir monitoring[J]. Geophysics, 2001, 66(1): 50−53.

Application of time-lapse cross-hole seismic tomography in hydraulic fracturing monitoring of hard coal seam roofs

ZHANG Xiao-Ming [1], ZHANG Jian-Zhi [2]

(1. *The Fifth Geological Brigade, Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration* (*Hebei Marine Geological Environment Survey Center*), *Tangshan* 063000, *China*; 2. *Research Institute of Coal Geophysical Exploration of China National Administration of Coal Geology*, *Zhuozhou* 072750, *China*)

Abstract: The hydraulic fracturing of coal seam roofs faces a technical bottleneck associated with the precise characterization of the coupled evolution of the stress, damage, and seepage fields. To address this challenge, this study proposed a time-lapse cross-hole seismic tomography method. This method integrates high-density downhole three-component geophone arrays with dynamic velocity field reconstruction technology, establishing a dynamic monitoring paradigm characterized by "excitation, high-density acquisition, and repeated time-lapse scanning". It enables high-resolution reconstruction of physical parameters of strata under the fracturing disturbance of hard coal seam roofs. A field test was carried out in the fracturing area of the hard roof above the No. 4 coal seam in a coal mine in northern Shanxi Province. Specifically, a cross-hole array with 24-channel three-component geophones was deployed, and two repeated scans were conducted before and after fracturing. By combining the anisotropy-constrained simultaneous iterative reconstruction technique (SIRT) and the hybrid velocity modeling strategy comprising CT skeleton and attribute details, the vertical imaging resolution was improved to 5 m, and the spatial resolution was better than 2.0 m. The monitoring results show that the P-wave velocities of the fractured target interval decreased by about 100 m/s on average, with negative coherence attribute anomalies and positive root mean square amplitude anomalies identified. These results verify the mechanical responses of fracturing-induced rock breaking and fracture propagation. Cross-validation of 674 high-reliability microseismic events reveals that the deviation between the dominant strikes of the low-velocity anomalies and the microseismic event cloud was merely 2°, the volumetric intersection over union (IoU) reached up to 0.71 (95% confidence interval: 0.63~0.79), and the Hausdorff distance was determined at 18 m. These results collectively confirm the reliability of the proposed method in evaluating fracturing performance and delineating stimulated reservoir volumes (SRVs). This study overcomes the limitations inherent in existing monitoring techniques for characterization of the stress-structure-function multi-scale coupling, providing a novel technical approach for dynamic monitoring of hydraulic fracturing of hard coal mine roofs.

Key words: time-lapse seismic; hard roof; hydraulic fracturing; cross-hole tomography; microseismic verification

（本文编辑: 叶佩）