doi: 10.11720/wtyht.2026.1404
马明. OVT 域地震资料分偏移距相干体融合技术在挠曲带解释中的应用[J]. 物探与化探, 2026, 50(2): 310-318. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1404
Ma M. Application of an OVT-domain seismic data split-offset coherence cube fusion technique in flexure zone interpretation[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(2): 310-318. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1404

OVT 域地震资料分偏移距相干体融合技术在挠曲带解释中的应用

马 明
(中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077)

摘 要: 挠曲构造作为煤矿井下一种致灾性强的重要地质构造, 其精确识别与刻画一直是矿井地质保障的技术难点, 常规地震勘探方法受限于分辨率和信噪比影响, 难以实现对其构造的精细识别。全数字高密度三维地震技术凭借其宽频带、宽方位、高覆盖次数的技术特点, 为挠曲构造的精细解释提供了高质量的数据基础。本文以阳泉矿区某区块为研究对象, 基于全数字高密度三维地震勘探数据, 提出并系统实践了一种基于 OVT 域的分偏移距相干体融合技术。该方法首先在 OVT 域中将地震数据按偏移距划分为远、中、近 3 个区间, 分别采用第三代 C3 相干算法计算各偏移距范围的相干数据体; 在此基础上, 运用属性融合技术将分偏移距相干体切片融合成为一幅综合相干体切片, 从而实现了研究区内主挠曲带及其他隐伏构造的精细刻画, 研究表明, 该技术对挠曲构造的识别结果与井下实际揭露情况吻合, OVT 域分偏移距相干体融合技术能够充分利用宽方位地震数据中丰富的方位角与偏移距信息, 有效克服单一相干体在多解性和分辨率方面的局限, 通过不同偏移距间地震响应特征的互补与融合, 显著提升了挠曲带构造精细识别能力, 为实现煤矿隐蔽致灾地质因素的“透明化”探测提供了有效技术途径。

关键词: 挠曲; 相干体; 全数字高密度三维地震勘探; OVT 域; 属性融合
中图分类号: P31; P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)02-0310-09

0 引言

随着煤矿智能化建设不断推进[1], 煤矿安全高效开采对地质构造勘查精度要求越来越高[2]。回采工作面地质构造的精准探测是智能化、透明化工作面的重要前提与保障[3-5]。挠曲构造是煤矿井下一种致灾性强、较隐蔽的致灾地质因素, 常表现为岩层发生膝折状弯曲的陡倾至垂直的构造变形带[6-7], 发育在煤层中不仅影响巷道布置, 还增大了煤层开采难度, 并给顶板管理带来困难[8]。目前三维地震勘探已成为挠曲预测的关键技术, 其中地震属性技术已成为识别和刻画挠曲平面形态的主力工具, 常用方法包括相干、曲率等属性分析。然而, 这些方法通常基于全偏移距叠加数据, 未能充分考虑不同偏移距地震波场对构造响应的差异性, 导致对复杂挠曲带边界、内部破碎带等细节刻画能力有限, 存在多解性, 因此, 如何充分利用原始地震数据中丰富的偏移距信息, 以提升挠曲构造的识别精度, 成为当前一个关键的技术挑战。

全数字高密度三维地震勘探技术因其宽频带、宽方位、高覆盖的特点, 能够提供更完整、保真的波场信息, 显著提升地震属性的敏感度和可靠性[9-11], 为挠曲带的精细解释提供了数据基石。OVT 域处理技术作为一种先进的宽方位地震数据处理方法, 能够保持采集时的方位角与偏移距信息, 是进行分偏移距地震属性分析的最佳数据域[12-13]。基于上述背景, 本文选取构造复杂的阳泉矿区作为研究对象, 针对研究区挠曲构造精细识别难题, 提出一种基于 OVT 域的分偏移距相干体融合技术。该方法旨在克

收稿日期: 2025-11-20; **修回日期:** 2026-01-28
基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3008903-02); 国家自然科学基金面上项目(42074175)
作者简介: 马明(1989-), 男, 助理研究员, 2016 年毕业于煤炭科学研究总院, 硕士, 主要从事地震资料处理与解释等方面的研究工作。Email: 464817940@qq.com

服全偏移距相干体的局限, 通过分离并融合不同偏移距范围的相干响应, 实现对挠曲带及其他隐伏构造的精细刻画, 为矿井地质灾害精准防治提供新的技术支撑。

1　OVT 数据处理及特点

1.1　研究区地质背景与地震数据概况

研究区位于阳泉矿区西南部, 沁水煤田的东北部, 受太行山隆起运动和 38°纬线构造带复合作用影响, 整体呈现东北高、西南低的单斜构造格局, 地层倾角 3°~15°。区内 8 号、15 号煤层埋藏深度 350~500 m, 并发育有次一级 NNE、NE 及 NEE 向褶皱群。主采的 15 号煤层挠曲构造尤为发育, 呈现构造密集、变形强烈的特征, 平面展布以 NE 向为主, 倾角介于 30°~70°之间, 多呈 S 型左旋破裂特征, 单一挠曲构造延伸长度一般不超过 1 000 m。区内断裂构造及陷落柱发育, 破坏了地层连续性, 该类构造导致煤层厚度发生显著变化, 并引起顶板岩层破碎。

煤层底板总体构成轴向 NNE 的向斜构造, 结合地形条件, 本次全数字高密度三维地震测线布设方向为 N18.41°W, 采用 24 线 4 炮线束状观测系统, 覆盖次数 108 次, 线距 40 m, 炮点距 20 m, 炮排距 40 m, 面元尺寸 5 m × 5 m, 最大炮检距 718 m, 并选用数字检波器实现高保真信号接收。研究区地质背景及炮点、检波点布置范围见图 1。

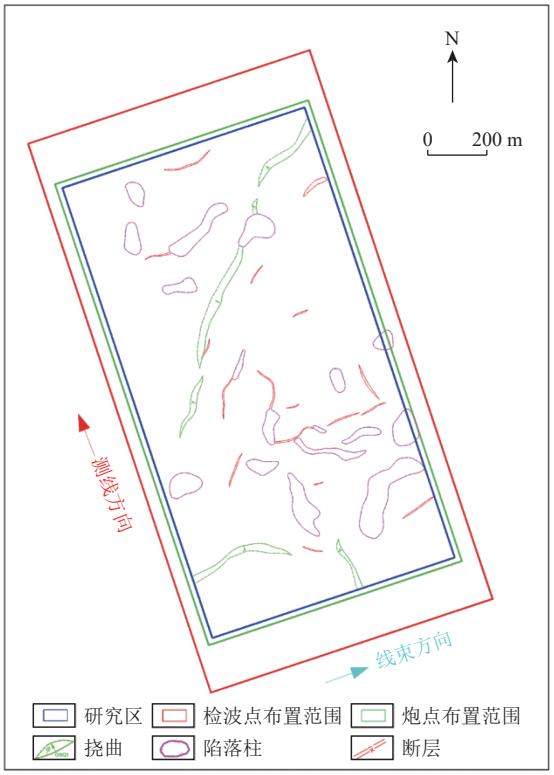


图 1　研究区地质背景及三维地震施工概况

Fig. 1　Geological background of the study area and overview of 3D seismic survey construction

1.2　OVT 数据处理流程

研究区面元分布统计结果如图 2 显示, 不同方位角与炮检距的地震数据分布均匀、覆盖完整, 实现了全方位地震波场信息的有效采集, 为构造精细识别奠定了数据基础。

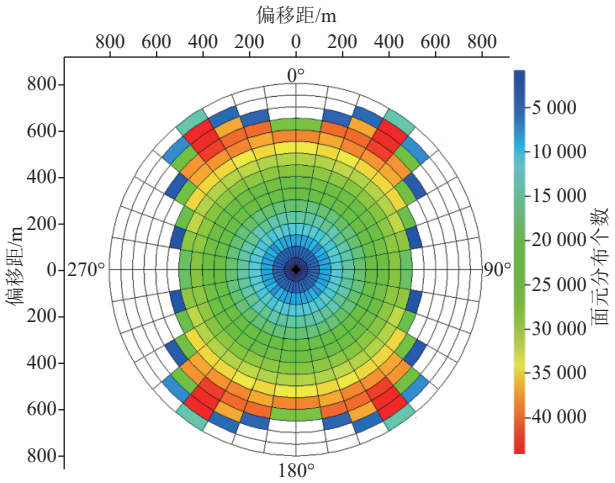


图 2　研究区面元分布统计

Fig. 2　Statistical distribution of surface elements in the study area

OVT 技术作为当前宽频带、宽方位、高密度地震数据的核心处理手段[14], 能够充分挖掘高密度宽方位地震数据中蕴含的波场信息, 显著改善成像效果并提升处理精度。本次 OVT 处理主要包括 OVT 面元划分、5D 数据规则化、OVT 域叠前时间偏移等关键步骤, 最终获得分偏移距数据。图 3 展示了本次研究的 OVT 数据处理流程。

1.3　处理效果分析

在 OVT 域地震资料处理中, 分偏移距剖面是指将地震数据按预设偏移距范围进行划分后所形成的数据剖面。此类剖面能够有效保留特定偏移距与方位角范围内的地震波场响应特征, 从而更精细地揭示地下构造的空间变化与属性差异。常用的偏移距划分方法主要包括以下两类: 其一为规则偏移距分组, 即按照固定偏移距间隔(如每 200 m)进行系统性划分[15]; 其二为变偏移距分组, 该方法依据实际资料的信噪比特征与地质目标需求, 对偏移距范围进行非均匀优化分组, 以提升有效信号的聚焦能力与构造识别精度。为分析不同偏移距数据对地质构造的识别能力, 本研究基于 OVT 域数据, 采用变偏移距分组方案生成分偏移距叠前时间偏移剖面, 具体划分为: 0~250 m(近偏移距)、200~450 m(中偏移距)、

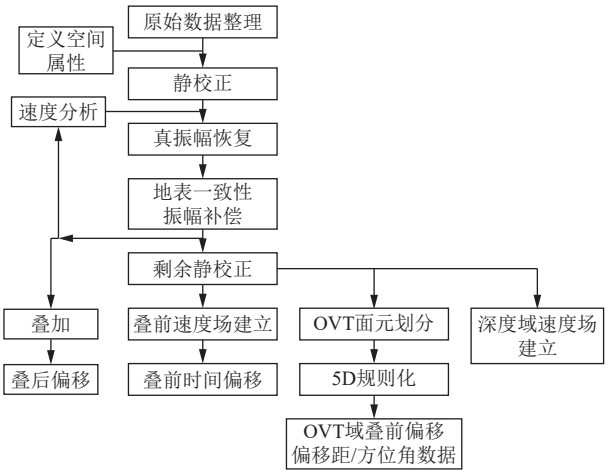


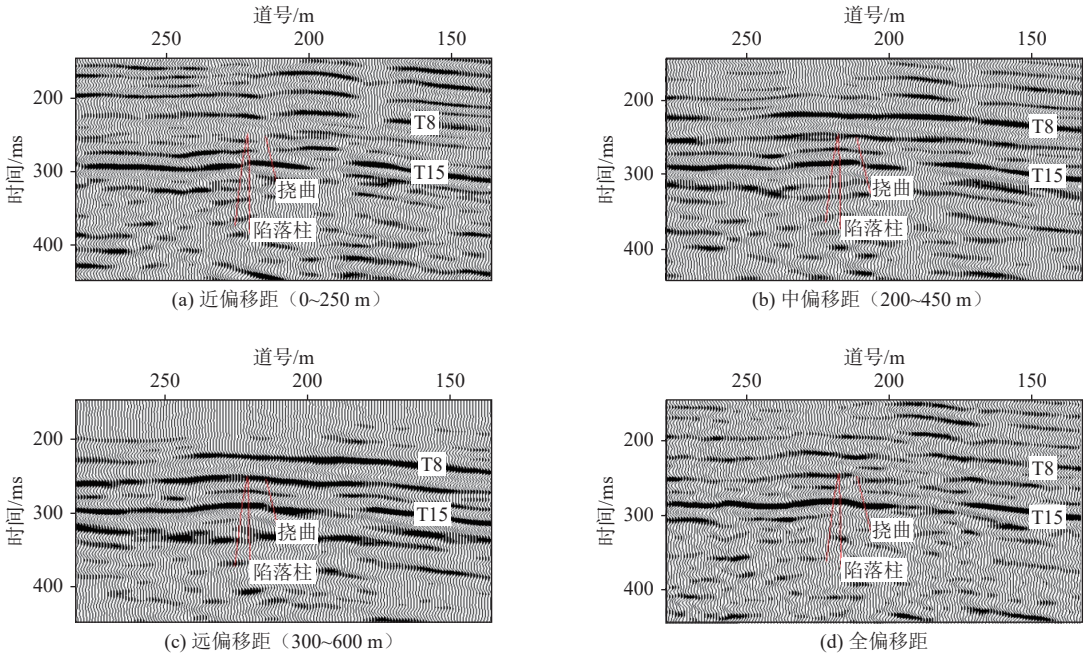
图 3　OVT 域地震数据处理流程

Fig. 3　Seismic data processing workflow for the OVT domain

300~600 m(远偏移距)。

图 4 展示了本次研究获得的 OVT 域分偏移距叠前时间偏移剖面,分析可见,不同偏移距剖面对于特定地质构造表现出显著的差异化响应特征和互补性。图 4 所示陷落柱为巷道揭露实例,该构造断陷了 15 号煤层 (T15)。分析表明,该陷落柱在近偏移距剖面 (图 4a) 上响应特征明显,而在中、远及全偏移距剖面中均未被有效识别。另一巷道揭露挠曲构造 GNQ2,其在中偏移距剖面 (图 4b) 上特征最为明显,远偏移距 (图 4c) 虽有所反映,但挠曲形态不够清晰,近偏移距剖面 (图 4a) 则未观察到明显构造响应,全偏移距剖面(图 4d)因信息混杂导致构造细节被掩盖。

这种差异化构造响应特征,分偏移距处理实现了针对性的波场照明优化。近偏移距数据对高角度界面和局部异常体更为敏感,而中、远偏移距数据则更有利于揭示地层整体结构和缓倾角构造。因此,综合运用远、中、近偏移距数据体进行联合解释具有显著的必要性,有助于构建多尺度照明体系,形成响应特征互补,提高构造识别精度,为复杂地质条件下的精准地质保障提供了可靠的技术途径。



(a) 近偏移距（0~250 m）　(b) 中偏移距（200~450 m）

(c) 远偏移距（300~600 m）　(d) 全偏移距

图 4　不同偏移距地震时间剖面

Fig. 4　Seismic time profile at different offsets

2　OVT 域分偏移距相干体融合技术

基于前文对分偏移距数据构造响应互补性的分析,本章将进一步探讨该特性在地震属性计算中的应用,提出了 OVT 域分偏移距相干体融合技术。

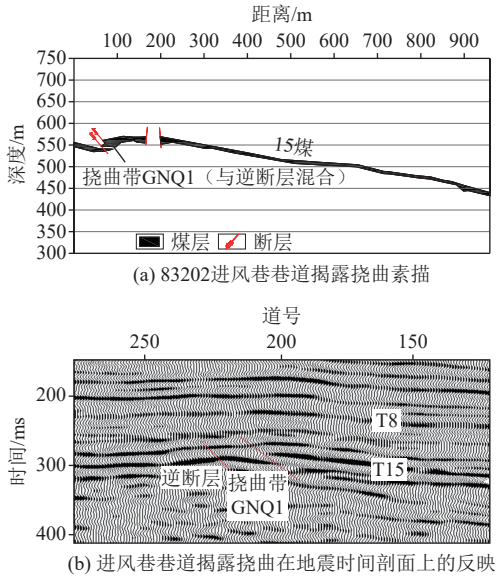
2.1　属性优选:曲率与相干属性的机理对比及适用性分析

在挠曲构造解释中,相干属性与曲率属性是两种常用手段。相干属性通过量化相邻地震道波形的相似性来表征地层的横向不连续性,对断层、裂缝、挠曲等破坏地层连续性的构造反应灵敏[16-17];挠曲带内部岩层破碎、变形会引起波阻抗与波形特征的突变,因此在相干切片上通常表现为低相干值的线性或带状异常,能够直观反映挠曲的位置、走向及延伸范围。曲率属性作为描述地层几何形态变化的二阶导数属性[18],对地层的弯曲变形极为敏感,常用于刻画挠曲、褶皱等构造的几何形态与变形强度,在挠曲

解释中常被视为首选工具。然而, 针对阳泉矿区构造复杂、挠曲发育强烈的地质特点, 本研究通过对比测试发现, 单一的曲率属性在应用中存在一定局限, 而 OVT 域分偏移距相干融合技术更具适用性。主要依据如下:

1)曲率属性基于地层连续性的假设, 适用于识别以塑性变形为主的"连续弯曲"构造。但本区挠曲构造不仅表现为岩层陡倾(30°~70°)弯曲, 往往还伴生强烈的脆性变形, 发育密集裂隙、破碎带乃至小尺度断层, 形成"弯曲+破裂"的复合变形带。在此类情况下, 地层连续性遭受破坏, 曲率属性的计算基础受到干扰, 容易在挠曲核部产生噪声, 难以准确刻画其边界。相比之下, 相干属性直接检测地层不连续性[19], 对挠曲带内部的破裂响应更为直接和稳定, 图 5 展示了巷道揭露的挠曲带 GNQ1 及其在地震剖面上的响应, 该挠曲带与逆断层伴生; 图 6 为曲率与相干属性对比结果, 可见曲率属性成像杂乱, 而相干属性能够清晰、直观地刻画挠曲的位置、走向及延伸形态。

2)OVT 域信息的充分利用。曲率属性通常基于叠加后的数据体或解释层位提取, 难以充分利用 OVT 域中随偏移距变化的波场信息。常规相干分析通常基于全偏移距叠加数据, 这种处理方式虽然提升了信噪比, 但也造成了不同偏移距地震波场信息的"平均化", 从而掩盖了特定构造的精细特征, 导致解释存在多解性。本研究引入 OVT 域分偏移距技术的逻辑在于利用地震波传播的差异性: 近偏移距数据主要由垂直入射波组成, 对同相轴错断、微细裂隙等高角度构造细节分辨率高; 而远偏移距数据包含更多广角反射信息, 对地层的倾斜界面和整体弯曲形态照明效果更好。因此, 通过分别计算不同偏移距的相干体并进行融合, 能够有效互补单一数据体的短板, 既利用近偏移距信息对同相轴错断、微细裂隙等高角度构造细节分辨率高的特点, 又利用远偏移距信息完整恢复了挠曲的整体弯曲轮廓, 从而

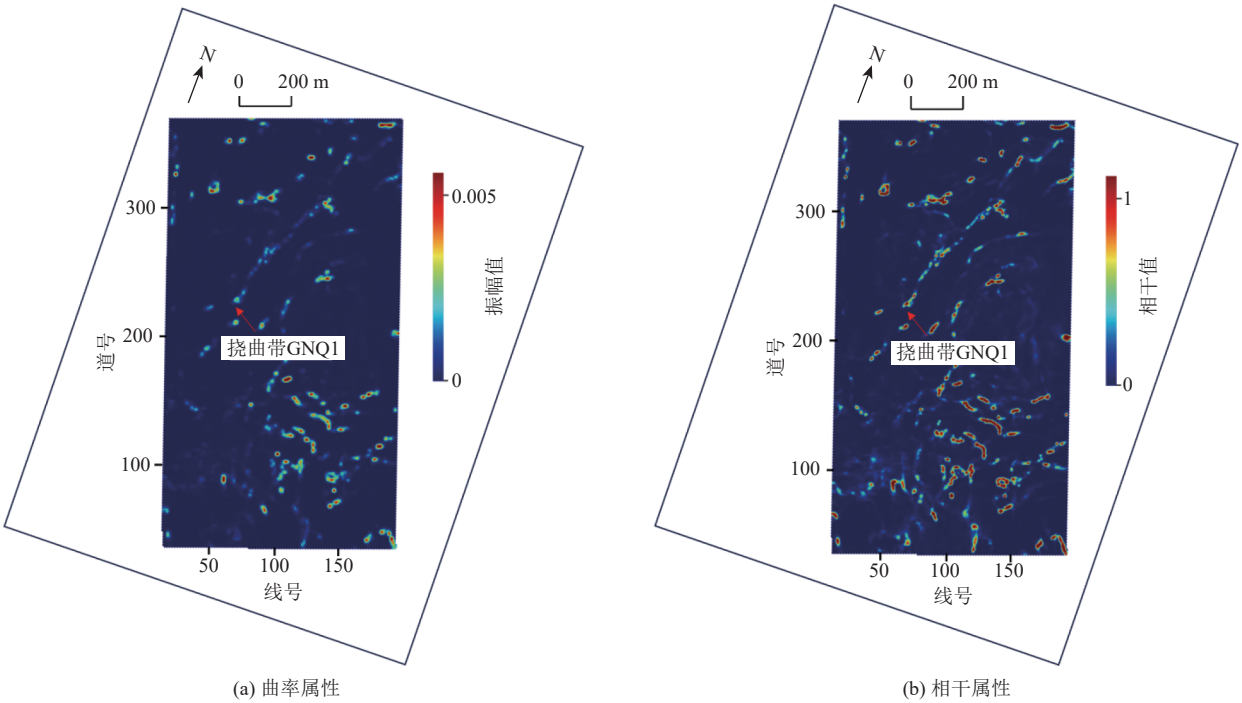


(a) 83202进风巷巷道揭露挠曲素描

(b) 进风巷巷道揭露挠曲在地震时间剖面上的反映

图 5　巷道揭露挠曲地震时间剖面

Fig. 5　Seismic time profile of flexural seismic response in the tunnel



(a) 曲率属性　　(b) 相干属性

图 6　曲率与相干属性对比

Fig. 6　Comparison of curvature and coherence properties

实现了对复杂挠曲构造的高精度刻画。

2.2　OVT 域分偏移距相干体计算

本文采用第三代 C3 相干算法展开研究。相比于 C2 相干，C3 相干算法可以从地震数据中获得更多的相干成分，提高了相干属性的横向分辨率，并且具有更好的抗噪性[20-21]。

首先构建协方差矩阵（如式（1）所示），然后利用其特征值计算相干系数（如式（2）所示）：

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}\sum\limits_{t_n=r-T}^{t+T}u_{t_n1}^2 & \sum\limits_{t_n=r-T}^{t+T}u_{t_n}u_{t_n2} & \cdots & \sum\limits_{t_n=r-T}^{t+T}u_{t_n}u_{t_nM}\\ \sum\limits_{t_n=r-T}^{t+T}u_{t_n1}u_{t_n} & \sum\limits_{t_n=r-T}^{t+T}u_{t_n2}^2 & \cdots & \sum\limits_{t_n=r-T}^{t+T}u_{t_n1}u_{t_nM}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ \sum\limits_{t_n=r-T}^{t+T}u_{t_n1}u_{t_nM} & \sum\limits_{t_n=r-T}^{t+T}u_{t_n2}u_{t_nM} & \cdots & \sum\limits_{t_n=r-T}^{t+T}u_{t_nM}^2\end{bmatrix},\tag{1}$$

$$c=\frac{\lambda_{\max}}{\sum\limits_{i=1}^{M}\lambda_i},\tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{C}$ 表示 $M\times M$ 维的地震数据协方差矩阵；c 为相干值，是衡量地震数据波形相似性或地层横向连续性的指标；$\lambda_{\max}$ 为协方差矩阵计算得到的最大特征值；λ_i 为协方差矩阵 $\boldsymbol{C}$ 的第 i 个特征值；M 是协方差矩阵的维度，通常等于参与计算的地震道的数量；$\sum\limits_{i=1}^{M}\lambda_i$ 为协方差矩阵 $\boldsymbol{C}$ 的所有特征值之和；对角线元素（$\sum u_{t_n1}^2,\sum u_{t_n2}^2,\cdots,\sum u_{t_nM}^2$）：计算的是单个通道在该时间窗口内的信号能量；非对角线元素（$\sum u_{t_n1}u_{t_n2},\sum u_{t_n1}u_{t_nM}$）：计算的是不同通道之间信号的互相关性；$t$：地震数据计算的中心时间点；$T$ 为用于计算相干性的时间窗半宽度；$\sum\limits_{t_n=r-T}^{t+T}$ 代表在一个特定的时间窗口内进行求和。这个窗口从时刻 $r-T$ 开始，到时刻 $t+T$ 结束。

本研究基于 OVT 域高精度地震数据，对相干体计算参数进行了精细化设置。首先，分析时窗采用短时窗（5~10 ms），旨在聚焦由挠曲、断层、陷落柱等构造引起的局部波形突变，避免因上下同相轴的“平均效应”弱化异常边界的尖锐性；其次，分析道数选用 3×3 道组合，在兼顾横向分辨率与抗噪能力的同时，有效提升对小尺度地质异常体边界的刻画能力；最后，倾角补偿设置为 20°，该值略大于研究区地层最大倾角 15°，可避免将地层自然倾斜误判为构造不连续，从而抑制虚假条带噪声，突显真实构造响应。基于上述参数，利用 OVT 域分偏移距叠前时间偏移数据，分别构建了远、中、近偏移距相干剖面，如图 7 所示。不同偏移距的相干体剖面对地质异常的响应特征各异：巷道实揭陷落柱 GX30 在近偏移距相干体地震时间剖面上呈现同相轴明显下拉、中断、杂

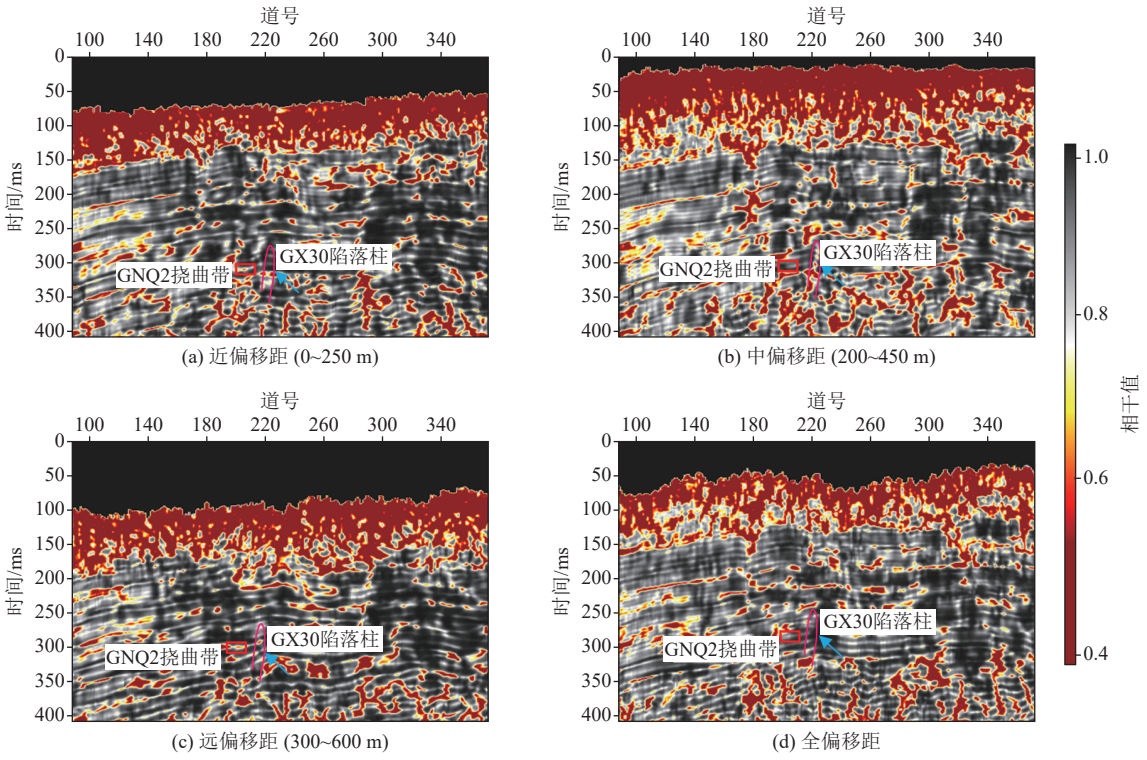


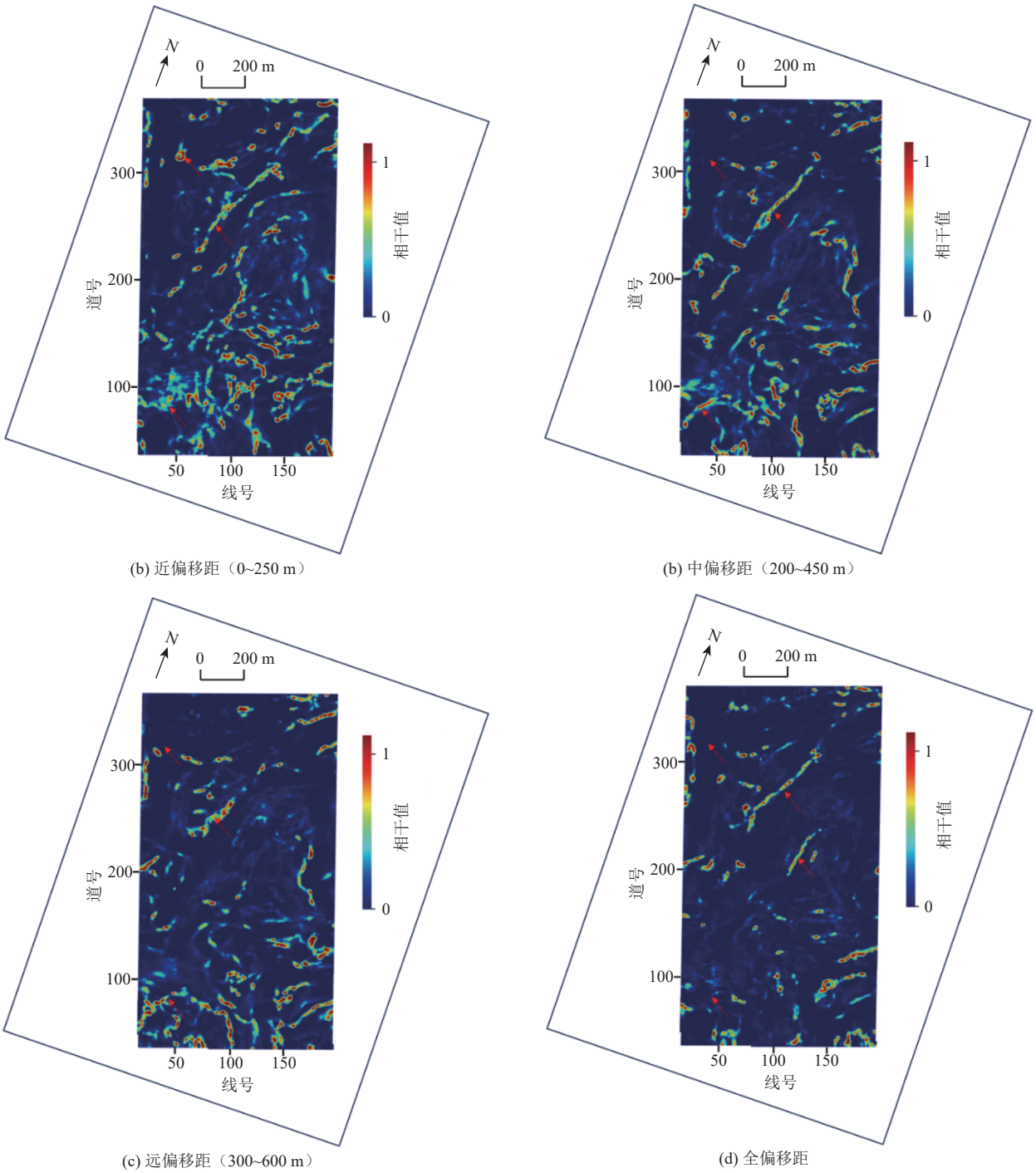
图 7　不同偏移距相干体地震时间剖面

Fig. 7　Seismic time profile of coherent body at different offset distances

乱的低相干柱状结构, 另一巷道揭露挠曲构造 GNQ2 在中偏移距及远偏移距相干体剖面表现倾斜的条带状低相干带。

2.3　OVT 域分偏移距相干体切片

在生成相干体数据基础上, 以 15 号煤层底界面上延 10 ms、下延 10 ms 形成属性提取时窗, 分别提取相干体切片, 系统开展挠曲构造的差异化响应分析。为了更直观地刻画挠曲构造, 本文对相干数据体进行了取反处理, 因此图中红色高值区指示挠曲及破碎带发育位置, 蓝色低值区代表地层连续。挠曲带在相干切片上主要表现为线性或舒缓波状的线性异常条带, 图 8 展示了不同偏移距条件下的相干体切片特征。从图 8 中可以看出, 全偏移距相干切片对研究区挠曲构造格局的整体刻画能力有限, 不同偏移距地震信息的相互叠加导致构造细节被掩盖, 致使部分关键构造形迹未能清晰显现。相比之下, 分偏移距相干切片能够有效揭示构造特征的差异性响应, 如箭头所示区域, 同一构造在不同偏移距



(b) 近偏移距（0~250 m）　(b) 中偏移距（200~450 m）

(c) 远偏移距（300~600 m）　(d) 全偏移距

图 8　分偏移距相干体切片

Fig. 8　Slice of a phase-shifted coherent volume

切片中表现出显著的识别度差异，其中，近、中偏移距切片对构造主体形态反映最为清晰；而远偏移距切片则对地层整体弯曲特征具有更好的表征能力。这种系统性的响应差异充分证明了分偏移距相干体切片方法在提升构造识别精度与地质解释可靠性方面具有重要价值。

2.4　分偏移距相干体切片融合

为有效集成各偏移距数据在构造识别中的优势，本研究对分偏移距相干体进行了融合处理。通过色彩空间的混合效应，显著增强了单一属性难以辨识的构造细节。如图 9 所示，箭头所指的构造特征在融合属性中得以同步呈现，清晰刻画出 NE 向与 NW 向主挠曲带的边界形态。经系统解释，本研究识别出的挠曲带与以往七采区已知挠曲带间距约 1.0 km，符合阳泉矿区挠曲构造发育的地质规律，且与井下进风巷实际揭露情况吻合良好。同时，相干属性融合图精细刻画了研究区北部的隐伏陷落柱构造形态，以及一组与 NE 向挠曲带平行展布的断层带。该融合技术为理解构造空间展布规律和变形机制提供了直观的地球物理依据，显著提升了复杂构造区的解释精度。

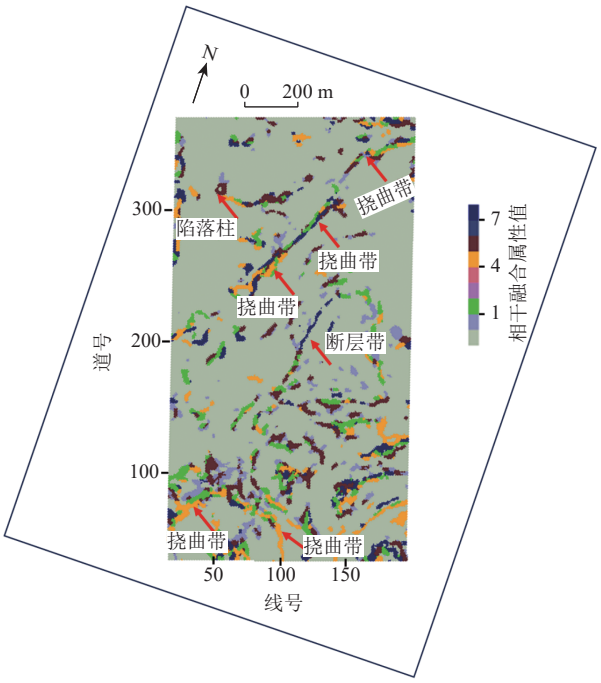


图 9　分偏移距相干体融合切片

Fig. 9　Split-offset distance coherent volume fusion slice

3　结论

针对阳泉矿区复杂的挠曲构造解释难题，本研究利用 OVT 域全数字高密度地震资料，开展了分偏移距相干体融合技术研究，主要取得以下认识：

1) OVT 技术保留了地震波的偏移距信息，分偏移距分析揭示了不同波场对构造的响应差异。近偏移距数据对陷落柱等垂向剧烈变化地质体成像精度高，而中、远偏移距数据则在刻画挠曲形态及地层弯曲背景方面具有天然优势。

2) 相比于曲率属性和全偏移距相干属性，OVT 域分偏移距相干体融合技术通过属性融合，将不同偏移距的构造响应特征有机结合，能更具针对性地揭示挠曲构造的细节特征，有效消除了解释盲区。

3) 该技术不仅精确识别了主挠曲带的空间展布，还成功刻画了伴生的隐伏断层与陷落柱，解释结果与井下揭露吻合度高，为煤矿工作面地质透明化模型构建及隐蔽灾害治理提供了高精度的地球物理依据。

参考文献（References）：

[1] 谢和平，吴立新，郑德志. 2025 年中国能源消费及煤炭需求预测 [J]. 煤炭学报，2019，44(7)：1949−1960.
Xie H P, Wu L X, Zheng D Z. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025[J]. Journal of China CoalSociety, 2019, 44(7): 1949−1960.

[2] 姬中奎，疏义国，翟恩发，等. 准格尔煤田奥灰水害区域超前治理技术研究 [J]. 煤炭技术，2022，41(11)：109−112.
Ji Z K, Shu Y G, Zhai E F, et al. Research on advance treatment technology for water hazards in the Aogui area of the Junggar coalfield[J]. Coal Technology, 2022, 41(11): 109−112.

[3] 程建远，刘文明，朱梦博，等. 智能开采透明工作面地质模型梯级优化试验研究 [J]. 煤炭科学技术，2020，48(7)：118−126.
Cheng JY, Liu W M, Zhu M B, et al. Experimental study on cascade optimization of geological models in intelligent mining transparency working face[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 118−126.

[4] 刘再斌，刘程，刘文明，等. 透明工作面多属性动态建模技术 [J]. 煤炭学报，2020，45(7)：2628−2635.
Liu Z B, Liu C, Liu W M, et al. Multi-attribute dynamic modeling technique for transparent working face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2628−2635.

[5] 苏晓云. 厚煤层内小断层的反射槽波探测技术及应用 [J]. 煤田地质与勘探，2022，50(1)：25−30.
Su X Y. Application of reflected in-seam wave detection for small faults in thick coal seams[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(1): 25−30.

[6] 王晋生. 阳煤五矿褶皱和挠曲构造对煤层开采的影响 [J]. 煤矿开采，2015，20(1)：20−22.
Wang J S . Impact of folds and flexural structures in the Yangquan coal mine No. 5 on coal seam mining[J]. Coal Mining Technology, 2015, 20(1): 20−22.

[7] 尚铮. 利用综合方法解释挠曲构造 [J]. 华北国土资源，2017(6)：118−120.

Shang Z. Interpreting flexural structures using an integrated approach[J]. North China Land Resources, 2017(6): 118−120.

[8] 王军. 三维地震属性技术在挠曲解释中的应用 [J]. 华北国土资源, 2017(5): 94−96.
Wang J. Application of 3D seismic attribute technology in flexural interpretation[J]. North China Land Resources, 2017(5): 94−96.

[9] 王树威. 全数字高密度三维地震勘探中地震属性预测煤层厚度的应用 [J]. 能源与环保, 2019, 41(6): 51−56.
Wang S W. Application on seismic attributes forecasting coal thickness of all digital high density 3D seismic exploration[J]. China Energy and Environmental Protection, 2019, 41(6): 51−56.

[10] 赵立明, 崔若飞. 全数字高密度三维地震勘探在煤田精细构造解释中的应用 [J]. 地球物理学进展, 2014, 29(5): 2332−2336.
Zhao L M, Cui R F. Application of digital high density seismic exploration in fine structural interpretation in coalfield[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(5): 2332−2336.

[11] 杨臣明. 全数字高密度煤矿采区三维地震技术研究与实践 [J]. 中国煤炭地质, 2014, 26(3): 46−52.
Yang C M. Research and practice of fully digital high-density three-dimensional seismic technology for coal mining areas[J]. Coal Geology of China, 2014, 26(3): 46−52.

[12] 刘依谋, 印兴耀, 张三元, 等. 宽方位地震勘探技术新进展 [J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(3): 596−610.
Liu Y M, Yin X Y, Zhang S Y, et al. Recent advances in wide-angle seismic exploration technology[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(3): 596−610.

[13] Al-Zahrani A, Lawton D, Fereja S. Interpretation of 3D multicomponent seismic data for investigating natural fractures in the Horn River Basin, northeast British Columbia[J].CSPG CSEG CWLS Convention,2010.

[14] 杨光明, 金学良, 张宪旭, 等. 宽频宽方位处理技术在淮北矿区全数字高密度地震勘探中的应用 [J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(6): 55−63.
Yang G M, Jin X L, Zhang X X, et al. Application of broadband wide azimuth processing technology in full digital high density seismic exploration in Huaibei mining area[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(6): 55−63.

[15] 王鑫, 陈新荣. 分偏移距动校正技术 [J]. 石油物探, 2003,42(2): 212−214.
Wang X, Chen X R. Offset division normal moveout correction[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2003, 42(2): 212−214.

[16] 张珈畅, 李涛, 梁宏刚, 等. 塔里木盆地二八台地区走滑断裂体系研究 [J]. 物探与化探, 2024, 48(6): 1588−1598.
Zhang J C, Li T, Liang H G, et al. Strike-slip fault system in the Erbatai area, Tarim Basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(6): 1588−1598.

[17] 赵汝敏, 柏冠军, 李培培. 超道相干体技术在复杂断块断裂解释中的应用 [J]. 物探与化探, 2013, 37(5): 942−946.
Zhao R M, Bai G J, Li P P. Application of super-wave coherent body technology in complex block fault interpretation[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(5): 942−946.

[18] 王清振, 姜秀娣, 翁斌, 等. 高抗噪性三维体曲率分析技术及其在高陡地层发育区的应用 [J]. 石油物探, 2017, 56(4): 559−566.
Wang Q Z, Jiang X D, Weng B, et al. A 3D curvature attribute analysis method with excellent anti-noise property suitable for high steep formation[J]. Geophysical Prosepecting for Petroleum, 2017, 56(4): 559−566.

[19] 柏冠军, 赵汝敏, 杨松岭, 等. 地震曲率技术在地震资料解释中的应用 [J]. 中国工程科学, 2011, 13(5): 23−27.
Bai G J, Zhao R M, Yang S L, et al. Application of seismic curvature technology in seismic data interpretation[J]. Chinese Journal of Engineering Science, 2011, 13(5): 23−27.

[20] Gersztenkorn A, Marfurt K J. Eigenstructure-based coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping[J]. Geophysics, 1999, 64(5): 1468-1479.

[21] 隋京坤, 郑晓东, 李艳东. 基于最大特征值估计的 C3 算法及应用 [J]. 物探与化探, 2014, 38(6): 1293−1297.
Sui J K, Zheng X D, Li Y D. A fast algorithm to estimate the dominant eigenvalue of real symmetric matrices amd its application to C3 algorithm[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(6): 1293−1297.

Application of an OVT-domain seismic data split-offset coherence cube fusion technique in flexure zone interpretation

MA Ming

(*CCTEG Xi'an Research Institute* (*Group*) *Co.*, *Ltd.*, *Xi'an* 710077, *China*)

Abstract: Flexure structures are highly hazardous geological structures in underground coal mines. Their accurate identification and characterization have long been a technical challenge in the geological guarantee of the mines. Conventional seismic exploration methods struggle to achieve fine-scale identification of flexure structures due to their limitations in resolution and signal-to-noise ratio. In contrast, fully digital high-density 3D seismic exploration technology, characterized by wide frequency bands, wide azimuths, and high coverage frequency, can provide high-quality data for fine-scale interpretation of flexure structures. This study investigated a block in the Yangquan mining area. Using the fully digital, high-density 3D seismic exploration data, this study proposed and systematically implemented an offset vector tile (OVT)-domain split-offset coherence cube fusion technique. Specifically, the seismic data were classified into far-, moderate-, and near-offset intervals in the OVT domain. The coherence cubes in the three intervals were computed using the

third-generation coherence (C3) algorithm. Furthermore, the attribute fusion technique was employed to integrate the split-offset coherence cube slices into a comprehensive coherence cube slice, enabling fine-scale characterization of the main flexure zone and other concealed structures within the study area. The results demonstrate that the identified flexure structures based on the proposed technique align with the actual wellbore exposures. By leveraging the rich azimuth and offset information in wide-azimuth seismic data, the proposed technique can effectively overcome the limitations of individual coherence cubes in terms of the multiplicity of solutions and resolution. Furthermore, by complementing and integrating seismic response characteristics across different offsets, this technique can significantly enhance the capability for fine-scale identification of flexure structures. Therefore, this study provides an effective technical approach for achieving transparent detection of concealed geological hazards in coal mines.

Key words: flexure; coherent cube; fully digital high-density 3D seismic exploration; offset vector tile(OVT) domain; attribute fusion

（本文编辑：叶佩）