

玉北地区逆冲构造带地震处理成像关键技术 研究与应用

沈向存, 魏华动, 吴国培

(中国石油化工股份有限公司西北油田分公司, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 逆冲构造带是玉北地区奥陶系油气勘探重要领域, 受窄方位地震采集和层间多次波混叠效应影响, 逆冲构造带及洞型储层成像不能满足勘探部署需求, 制约了该区已发现油藏的拓展。笔者在分析影响复杂构造成像关键因素的基础上, 采用了 OVT 域道集规则化处理, 弥补了常规三维地震空间采样不规则的缺陷。同时, 通过使用近似垂直断裂带的长偏移距方位角道集进行成像, 提高了构造带速度建模的精度, 尽可能地削弱了层间多次波混叠效应。结合多次波 VSP 波场特征分析与应用, 逆冲构造带及缝洞型储层的成像质量得到明显改善。

关键词: OVT; 规则化处理; 分方位道集; 层间多次波; VSP 波场; 匹配分离

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.06.07

0 引言

玉北地区位于和田古隆起油气成藏有利区带, 主要以逆冲与走滑断裂分期一异向叠加变形控制的奥陶系缝洞型储层为主要勘探目标, 经过多年油气勘探发现了玉北 1 油藏, 是“三新”领域油气勘探的重要阵地。近年来在周边同类型逆冲构造带部署 L1、Y2 等多口探井, 实钻与预测差异大, 逆冲构造带准确成像面临挑战。

针对复杂构造带成像技术主要有两大类: ①叠前时间偏移技术, 如克希霍夫叠前时间偏移^[1]、最小二乘叠前时间偏移^[2]和黏弹性叠前时间偏移^[3]等; ②叠前深度偏移技术, 如各向异性叠前深度偏移^[4]和逆时偏移^[5]等。但是在玉北逆冲构造带成像中上述技术并没有取得实质效果。主要有三方面原因: 一是奥陶系资料信噪比低、能量吸收衰减严重; 二是窄方位地震采集逆冲构造带空间采样照明度不均

匀; 三是层间多次波混叠效应强, 识别压制难度大。

因此, 首先要解决深层逆冲构造带照明度不均匀和低信噪比弱信号成像问题。最有效的方法是基于预测误差滤波理论和数学变换等方法进行地震数据的规则化重建^[6]。五维规则化处理^[7]是一种通过数学变换实现的数据规则化技术, 被广泛应用在有效信号恢复^[8]、频谱泄漏恢复^[9]、高陡构造准确成像^[10]等处理环节中。其次是要解决多次波识别压制问题。表面多次波可以利用高分辨率 Radon 变换^[11]、抛物线 Radon 变换^[12]等技术得到较好的压制; 层间多次波与有效波差异性不明显, 主要是基于形成机理进行预测压制, 如波场延拓法^[13]、反馈迭代法^[14]、逆散射级数法^[15]等, 在实际应用中也取得一定效果, 但同时也造成过饱和压制, 造成地震资料同相轴比较破碎。

针对所面临的问题和成像需重点解决的问题, 笔者在对玉北三维地震采集观测系统和层间多次波波场的方位各向差异性分析的基础上, 首先通过对

收稿日期: 2023-08-24

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科技部资助项目(P22124)

第一作者: 沈向存(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事储层预测与圈闭评价等研究工作, E-mail: shenxc_xbsj@sin-ope.com。

OVT 域五维规则化叠前道集进行优势方位分选并成像,以此尽可能地削弱由于逆冲构造带照明度不均匀引起的构造成像不准确和层间多次波混叠效应;其次,利用一阶层间多次波叠后可预测特点,利用匹配追踪算法进一步实现残余层间多次波的压制,应用结果表明玉北地区逆冲构造带及奥陶系缝洞型储层成像得到了明显改善。

1 层间多次波差异性分析

玉北地区奥陶系层间多次波非常发育,严重地影响了构造、储层等成像,造成假象影响部署,如 Y1 井构造顶部地层成像呈近平行层状反射,构造带两翼存在多个地层尖灭特征明显不符合钻井认识(图 1),而且依据估算逆冲构造带上盘地层倾角为 6° 左右,远小于实际。从动校拉平后 CRP 道集 3.3 s~4 s 之间奥陶系地层仍残留“弧”状反射的层间多次波反射,但由于与有效波波场及速度特征差异不明显,不易压制(图 2)。因此,有必要对层间多次波的产生条件、波场特征等进行分析研究,进一步提升层间多次波识别压制的针对性。

1.1 产生必要条件分析

建立简单三层水平层状介质模型(图 3(a)),填充参数 1 中不同的速度 ϑ_i 、密度 ρ_i ($i=1,2,3$) (表 1),分析产生层间多次波的必要条件及与有效反射的差异性。

结果表明,层间多次波能量远小于有效反射,且与顶底界面反射系数的大小成正比关系,而且只有当底界反射系数 R_2 大于 0,顶界反射系数 R_1 小于 -0.06 时,才能观察到层间多次波能量(图 3(b)、

图 3(c)),所以认为上负下正的强反射界面组合是产生层间多次波的必要条件。

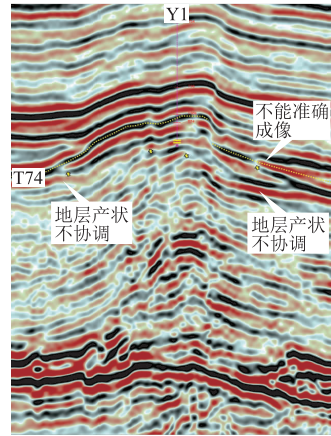


图 1 过 Y1 井常规叠前时间偏移剖面
Fig. 1 Conventional PSTM profile through well Y1

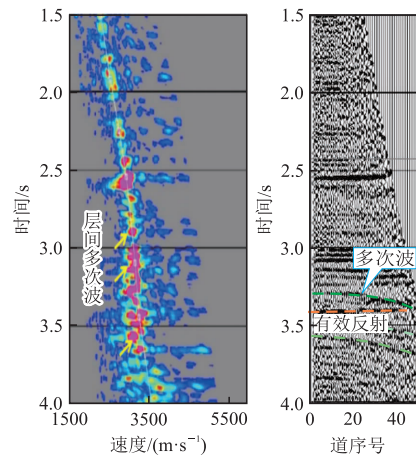


图 2 Y1 井旁速度谱及 CRP 道集
Fig. 2 Velocity spectrum and CRP trace collection by well Y1

表 1 层状模型岩石物理参数取值表

Tab. 1 Values for physical parameters of stratified model rock

	$\vartheta_1/(m/s)$	$\rho_1/(kg/m^3)$	$\vartheta_2/(m/s)$	$\rho_2/(kg/m^3)$	$\vartheta_3/(m/s)$	$\rho_3/(kg/m^3)$
参数 1	5 200	2 530	2 000~6 000	2 010~2 650	5 800	2 600
参数 2			4 200	2 380		

因此,玉北地区实钻井揭示的该区发育古近系膏岩、二叠系火成岩、石炭系小海子组灰岩、巴楚组标准灰岩和生屑灰岩等局部特征稳定的高速层是导致该区层间多次波发育根本原因。

1.2 波场特征分析

重点对水平层状模型产生的层间多次波波场特征进行正演模拟分析,具体如下:

1) 旅行时特征分析。利用参数 2 填充并模拟,一阶多次波和二阶多次波与上覆地层强反射界面存

在稳定的“源—镜”对应关系,从而推断出两者产生的层间多次波分布,即可以通过 R_1 和 R_2 界面地震波旅行时预测出层间多次波空间位置,实际模拟结果也得到进一步验证(图 3(a))。因此,可以通过“源—镜”分别对应的玉北构造带上覆高速层界面反射的双程旅行时精细刻画进行层间多次波旅行时的预测,从而实现层间多次波空间展布特征的预测。

2) 能量特征分析。二阶及以上的层间多次波能量远小于一阶,且随着反射系数的减小迅速衰减

(图 3(d)), 而从 1.1 节可知地震波在传播过程中产生的层间多次波的能量小于有效反射, 可以看出影响构造及储层成像的主要是一阶层间多次波。因此, 要重点针对明显影响构造带成像的一阶层间多次波进行识别压制, 二阶及以上可以忽略。

3) 频率特征分析。分别以 20 Hz、30 Hz、40 Hz 雷克子波作为入射子波, 分析层间多次波频率与入射波关系, 可以看出它的频率较有效波向低频端稍微移动(图 3(e)), 但整体上继承了有效波的频率特征, 即高频入射产生相对高频的层间多次波。由于

受吸收衰减作用影响奥陶系主频在 18 Hz~20 Hz, 而上覆地层频率在 25 Hz~28 Hz, 可以适当地通过频率筛选的方式对浅层产生的部分具有相对高频特征层间多次波进行压制。

1.3 波场混叠效应分析

分别构建垂直于和平行于构造带的剖面结构模型(图 4(a)、图 4(c)), 开展不同方位层间多次波波场特征模拟。结果表明层间多次波继承, 并放大了上覆地层产状特征。

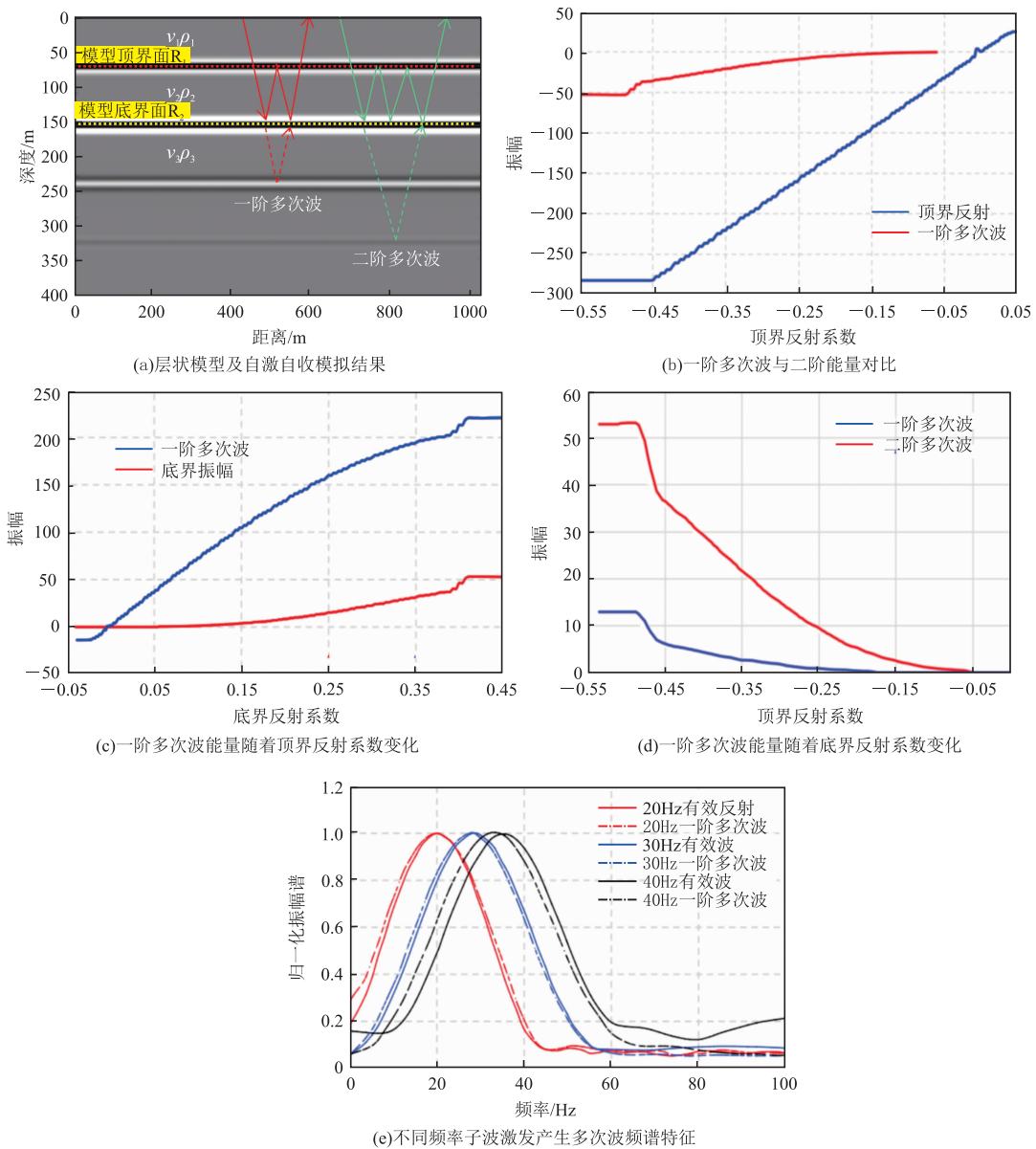


图 3 多次波波场特征分析

Fig. 3 Analysis of multiple wavefield characteristics

在垂直于构造带的方位上层间多次波近似水平分布,构造带大倾角有效反射保持了绝大部分原始地层地震反射特征,两者差异明显(图 4(b)),比较容易识别压制;而在平行于构造带剖面上构造带有效反射与层间多次波产状近似,两者混叠相互干涉,导致了有效反射的振幅、

频率及相位特征都发生明显畸变(图 4(d)),甚至部分重合到了一起。这也启示我们在复杂构造带成像中可以选取尽可能垂直于构造带方位的大偏移距地震道集信息成像,可以较好地规避层间多次波的混叠效应,提升复杂构造的成像精度。

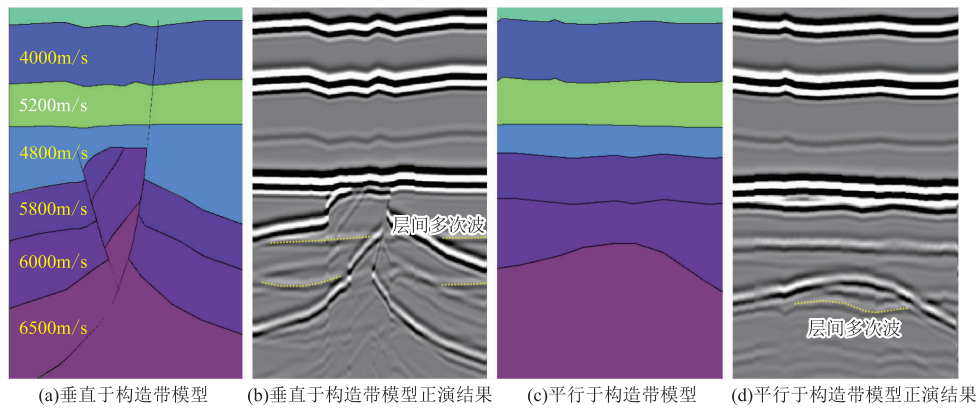


图 4 过 Y1 井 OVT 域全波场叠前时间偏移剖面

Fig. 4 Full-waveform prestack time-migrated profile in the OVT domain of well Y1

2 OVT 域优势方位道集偏移成像

结合前期成像存在的问题和波场特征差异分析,本次逆冲构造带成像重点首先是在叠前道集数据优化及五维规则化基础上,开展速度场建模、关键参数测试及方位道集划分分析研究,通过优选近似垂直于构造带的长偏移距方位道集数据成像,突出层间多次波波场特征差异性,提升构造带成像质量(图 5)。

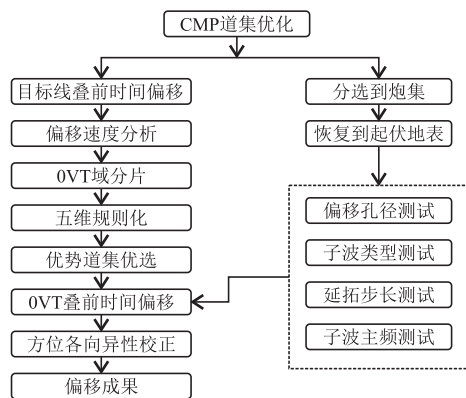


图 5 OVT 域优势方位道集偏移成像技术流程

Fig. 5 Workflow of OVT domain dominant azimuth common-offset migration imaging

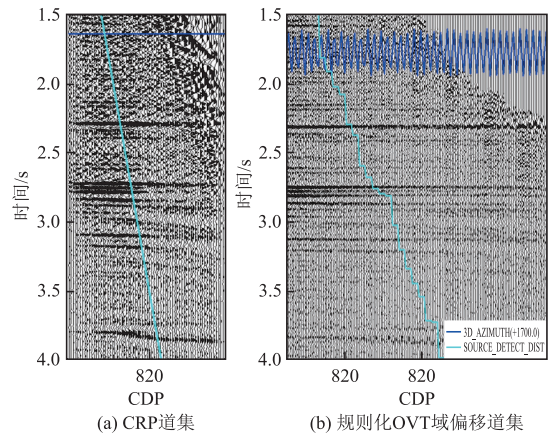


图 6 CRP 道集与规则化 OVT 域偏移道集对比

Fig. 6 Compares the CRP data set with the regularized OVT domain offset data set

2.1 地震数据规则化处理

Y1 井三维覆盖次数 160 次,纵横比 0.467,最长偏移距 7 035 m,最大非纵距 2 975 m,属窄方位三维地震采集。地震资料受接收线距和偏移距等早期观测参数限制,逆冲构造带大倾角地层地震空间采样及照明度不足,按炮检距进行分组形成的道集道数少,CRP 道集中、远道信息少、反射能量不均衡(图 6)。OVT 域五维规则化处理采用傅立叶重构技术可以将不规则的地震数据规则化到网格中心

点,也可以对稀疏空间采样地震数据进行加密处理,可以很好解决远近偏移距能量不均衡问题,提升地质目标的成像精度,如提高逆时偏移的成像精度^[16-7];深部含煤地层及其断层、陷落柱、挠曲等微小构造的精细刻画^[18]等。

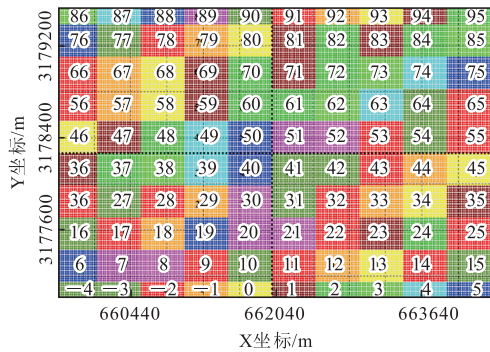


图7 一个十字排列道集的炮检距向量片分布示意图
Fig. 7 Shows a schematic diagram of the distribution of shot-receiver distance vector slices in a cross-arranged seismic data set

因此,对研究区地震资料进行数据规则化处理,提升逆冲构造带照明度。按照炮线和检波线 $400\text{ m} \times 400\text{ m}$ 等距离网格将其划分为若干个小的炮检距矢量片(图7),形成具有限定范围的炮检距和方位角的OVT域道集,并对抽取所有十字排列道集中相应的数据组成每个OVT道集的一次覆盖数据进行规则化处理。与常规时间偏移的CRP道集对比,规则化后的道集具有更大炮检距范围,它的近、中、远偏移距能量一致性强,信噪比得到明显提升,而且与有效波速度相近的层间多次波“弧”状反射特征也有了明显的削弱(图6)。但全波场偏移成像(图9(a))与常规偏移(图1)对比,逆冲构造带成像、多次波压制问题仍没有得到有效解决。

2.2 优势方位道集优选与成像

地震采集观测系统中,最大偏移距是一个重要的参数,它在速度模型的反演中起到至关重要的作用。尤其是大偏移距信息能够显著增强对陡倾角地层的照明,为精细的速度分析提供了资料,使得深层目标能够聚焦速度能量团^[19],也更有利于复杂构造带的成像。考虑逆冲构造带NE走向及长偏移距分布,我们按照方位角一炮检距信息将规则化的OVT道集分成了四个分方位道集,它们是 $45^\circ \sim 135^\circ$ 、 $135^\circ \sim 225^\circ$ 、 $225^\circ \sim 315^\circ$ 和 $315^\circ \sim 45^\circ$ (图8)。相比于传统的方位角划分的扇区面元,OVT域分方位面元的覆盖次数和形态更加规则。

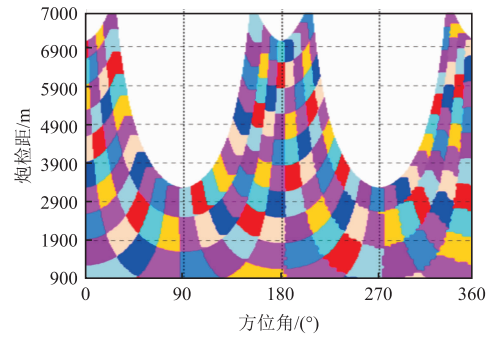


图8 OVT域方位角一炮检距分布示意图
Fig. 8 Illustrates the distribution of azimuth angles and gun-detector distances in the OVT domain

采用相同的处理流程和参数,对四个分方位道集进行叠前时间偏移成像处理。在近似平行构造带的分方位道集数据中,远道信息较少且受到波场混叠效应的影响,构造带顶部成像仍呈现似层状反射(图9(b)、图9(d))。而在近似垂直于构造带的分方位道集中,具有中远偏移距优势,构造带内部上倾地层产状与顶界呈现明显的不整合接触(图9(c)、图9(e)),更符合逆冲构造样式。将这两个优势分方位道集进行融合偏移成像,信噪比明显提高,构造带成像更加清晰(图9(f))。通过优选方位近似垂直于构造带的长偏移距的分方位道集成像,提升了速度拾取精度,规避了波场混叠效应,较有效地改善了复杂构造带的成像质量。

3 层间多次波叠后压制

3.1 层间多次波识别与预测

VSP资料提供了多次波的识别和压制的依据,能够有效地追踪和确定多次波的产生层位、传播路径以及对有效波场的干扰程度。为了避免VSP原始资料信噪比所引起的不确定性,并突出层间多次波的波场特征,基于Y1井实测的VSP资料进行了上行波、下行波和井旁地震道波场的模拟,从结果上可以清晰地观察到层间多次波旅行时大于有效反射,同相轴与有效波大致平行,不能延伸到与初至有效反射波相交的地方,而终止的深度位置则是形成多次波的最深一次反射波的反射界面(图10(a),黄色箭头)。在井旁地震道集中,层间多次波呈现出“弧”状反射特征(图10(b),图2),并且在零偏移距处与VSP波场的旅行时特征具有较好的对应关系。

依据与有效波平行、不相交、反射终止的特征准确识别出产生层间多次波的强反射界面有石炭系小

海子组灰岩、巴楚组生屑灰岩、标准灰岩等。在层间多次波相对稳定和可预测性认识的基础上,通过精细井震标定及解释,以实际的构造带顶部近平行波组反射及两翼异常尖灭特反射为依据(图 1,黄色箭头),利用“源—镜”关系对强反射界面两两组合,预

测层间多次波的旅行时。最终识别出影响构造带成像的一阶层间多次波的“源—镜”组合主要有小海子灰岩—生屑灰岩、标准灰岩—生屑灰岩和小海子灰岩—标准灰岩等组合。结果与实际构造带及两翼异常反射异常具有较好的对应关系(图 10(c))。

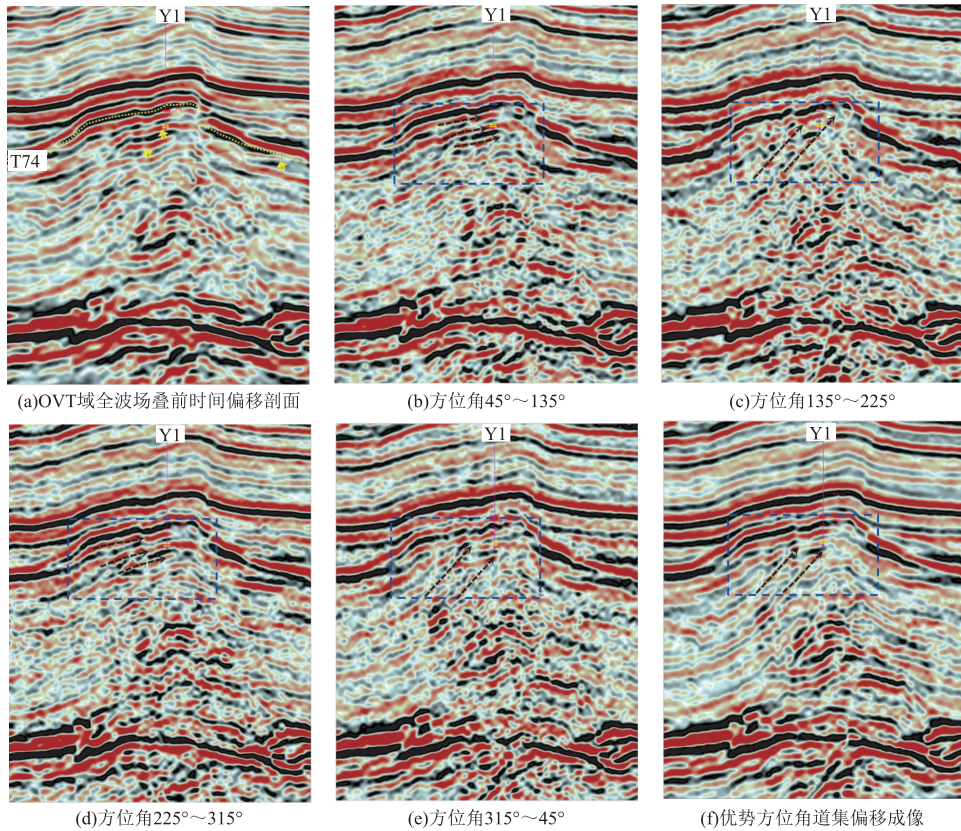


图 9 分方位道集偏移成像对比

Fig. 9 Comparison of reverse-time migration images of shot profiles in different azimuth directions

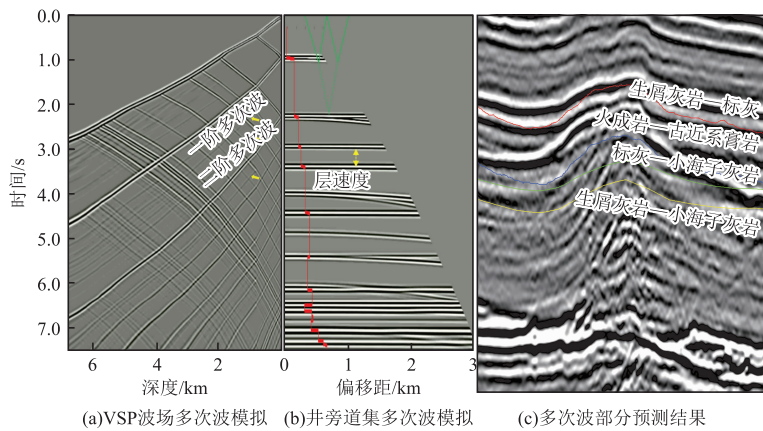


图 10 Y1 井多次波特征对比分析与预测

Fig. 10 Comparative analysis and prediction of Y1 well multiple wave features

3.2 振幅特征匹配分离

匹配追踪算法是一种时频分析方法,具有高时

频分辨率和高效性。它可以通过简单的迭代算法有效地找出信号的分解式,广泛应用于噪声压制、油气

检测、薄层反演等领域。在灰岩强干扰背景下的砂岩储层及流体性质预测^[20]和地震信号去噪^[21]等方面,该算法取得了良好的应用效果。这里以 Hilbert 变换的瞬时频率和层间多次波空间分布预测为约束条件,采用以 Morlet 小波为时频原子的匹配追踪算法^[22],对每个识别的层间多次波虚反射分别进行测试时频原子的频率、相位、时延和尺度等参数,分析在时频原子上的投影特征^[23]和分离效果,直到获得最佳时频原子参数组合实现振幅匹配重构。通过与井旁地震道压制前后效果的对比,可以明显观察到层间多次波能量的削弱(图 11)。

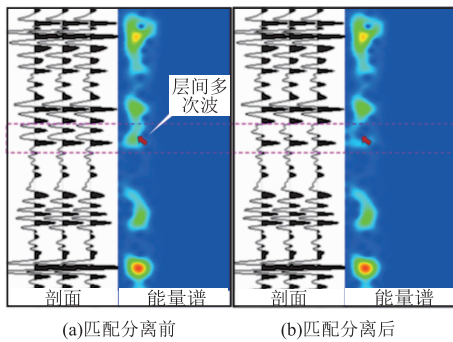


图 11 多次波匹配分离效果前后对比
Fig. 11 Comparison of the pre and post separation effects of multiple wave matching

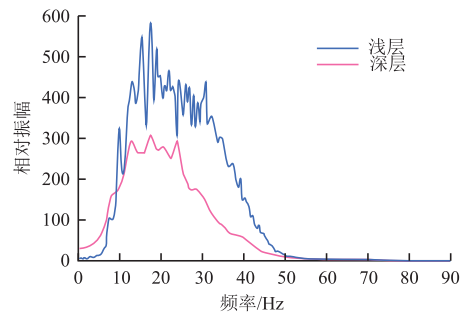


图 12 研究区浅层和深层频谱对比
Fig. 12 Comparison of the shallow and deep frequency spectra in the study area

3.3 优势频率信息提取

研究认为适当突出目的层的中低频信息,可以有效改善地震数据的成像质量,如利用低频信息提高构造成像的精度^[24];提升深层弱信号的成像质量^[25];利用具有更高振幅分辨率和保真性的低频信息改善地质异常体的成像质量^[26];利用低频信息优势获得煤层下伏地层及灰岩内部溶洞的成像^[27]。由于受到吸收衰减的影响,奥陶系相比浅层有效信号较弱、高频能量低(图 12)。根据层间多次波频率特征具有继承性的特点(图 3(e)),可以推测浅层高速层之间产生的层间多次波频率要稍高于深层。以

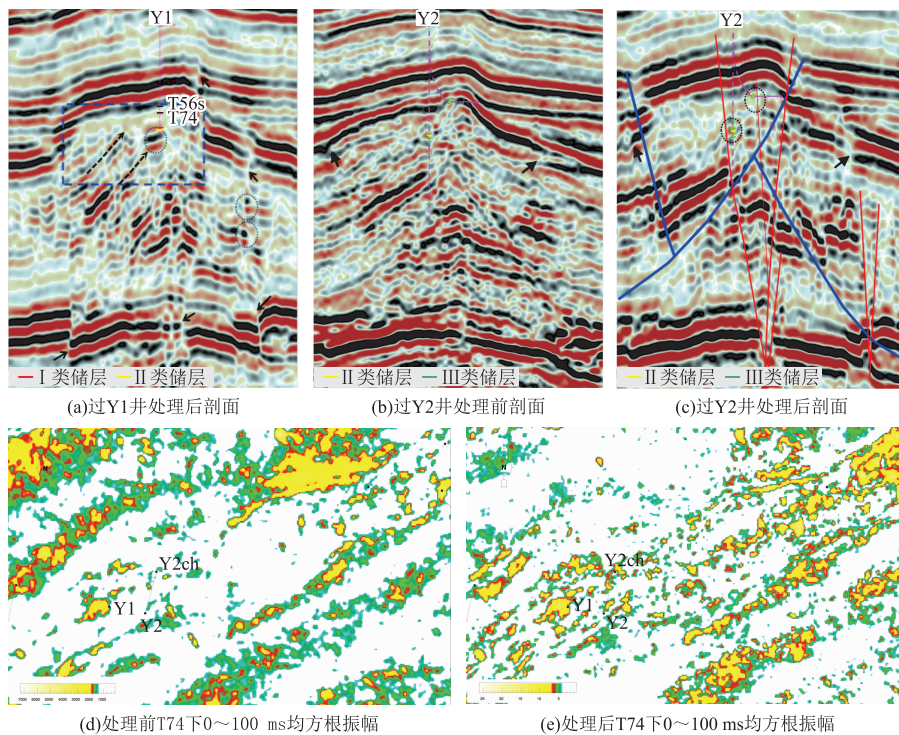


图 13 复杂构造带成像效果对比分析
Fig. 13 Comparative analysis of imaging results in a complex structural belt

断裂和缝洞型储层等地质目标为约束,在保证频带完整的前提下,通过调节带通滤波器压制具有较高频率的层间多次波能量,增强有利于地质目标成像的中低频信息,可以进一步提升优势方位道集成像中构造带、内部地层和缝洞型储层等地质目标成像效果(图 13(a))。

4 应用效果分析

经过 OVT 域地震数据规则化处理后,逆冲构造带内部地层处理的产状和接触关系明显好于前期处理结果(图 1、图 9(a)),如从地震剖面估算的地层倾角与 Y1 井奥陶系 5 749 m~5 606 m 井段的成像测井分析的真实地层倾角值吻合,约为 10° 左右;奥陶系的缝洞型储层的似“串珠”状强振幅反射异常成像也得到了明显改善,与 Y1 井奥陶系钻遇的 7.5 m/Ⅰ类储层和 19 m/Ⅱ类储层具有良好的对应关系(图 13(a))。Y2 井点处逆冲构造带及内部结构成像也得到明显改善,两翼异常尖灭反射得到有效压制,断裂特征更加清晰,已钻遇的Ⅱ、Ⅲ类储层受走滑断裂控制特征明显(图 13(b)、图 13(c))。从奥陶系鹰山组的平面振幅数据还可以观察到,沿逆冲构造带顶部发育的碳酸盐岩缝洞型储层的强振幅属性分布特征更符合逆冲与走滑断裂分期一异向叠加变形控制的奥陶系缝洞型储层分布规律(图 13(d)、图 13(e))。

5 结论

笔者通过采用 OVT 域道集规则化处理、优势方位道集成像以及层间多次波匹配分离等技术,在玉北地区 Y1 井逆冲构造带的成像中的联合应用,有效提升了地质目标的成像精度,并得出以下结论:

1)反射系数足够大且上负下正的“源—镜”组合是产生层间多次波的必要条件,它是相对稳定和可预测的。

2)一阶层间多次波是影响逆冲构造带成像的主要干扰因素,通过 VSP 波场分析和强反射界面的精细解释可以更准确地对其进行标定和预测。

3)地震数据规则化处理可以有效提高常规地震采集资料的信噪比和能量的一致性,合理地使用可以提升地震资料成像质量。

4)合理利用偏移距和方位角信息,可以一定程度上规避波场混叠效应,突出地震波传播特征差异

性,有利于复杂构造带成像。

参考文献:

- [1] LIU G F, LI C. Practical implementation of prestack Kirchhoff time migration on a general purpose graphics processing unit[J]. Acta Geophysica, 2016, 64(4): 1051—1063.
- [2] 袁茂林. 最小二乘叠前时间偏移在川东南复杂构造成像中的应用[J]. 复杂油气藏, 2021, 14(3): 43—47.
YUAN M L. Application of least-squares migration in imaging of complex structures in Southeast Sichuan [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2021, 14(3): 43—47. (In Chinese)
- [3] 刘伟, 张剑锋. 黏弹性叠前时间偏移: 陡倾角构造成像与实际应用[J]. 地球物理学报, 2018, 61(2): 707—715.
LIU W, ZHANG J F. De-absorption prestack time migration: Steep dip structure imaging and its application[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(2): 707—715. (In Chinese)
- [4] 吴超, 许安明, 尚江伟, 等. TTI 各向异性叠前深度偏移技术在库车复杂山地的应用[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(1): 103—107.
WU C, XU A M, SHANG J W, et al. Application of TTI anisotropic prestack depth migration technology in complex mountain areas of kuqa depression[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(1): 103—107. (In Chinese)
- [5] YILMAZ Ö, DOHERTY S M. Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data[M]. Tulsa, Okla.: Society of Exploration Geophysicists, 2001.
- [6] 李振春, 王姣, 孙苗苗, 等. 地震数据规则化重构方法策略[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(1): 40—49.
LI Z C, WANG J, SUN M M, et al. Strategy of seismic data regularized reconstruction[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(1): 40—49. (In Chinese)
- [7] 王伟, 陈双廷, 王宝彬, 等. 五维规则化技术研究与应用[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(增刊 1): 28—33.
WANG W, CHEN S T, WANG B B, et al. Research and application of five-dimensional regularization technology[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52 (Suppl 1): 28—33. (In Chinese)
- [8] 张春枫, 杜启振, 张富源, 等. 基于改进匹配追踪傅里叶插值的地震数据规则化重构[J]. 大庆石油地质

- 与开发, 2023, 42(6): 132—139.
ZHANG C F, DU Q Z, ZHANG F Y, et al. Regularized reconstruction of seismic data based on improved matching pursuit Fourier interpolation[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2023, 42(6): 132—139. (In Chinese)
- [9] 王艳香, 徐兴荣, 孟会杰, 等. 五维规则化技术及在尼日尔 Agadem 区块的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2022, 57(增刊 2): 23—28.
WANG Y X, XU X R, MENG H J, et al. 5D regularization technology and its application in Block Agadem, Niger [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2022, 57(Suppl 2): 23—28. (In Chinese)
- [10] 杨小龙. 四川桂花灰岩地区低信噪比高陡构造成像处理方法[J]. *地质学刊*, 2021, 45(4): 420—424.
YANG X L. Discussion on imaging processing technology aiming at the high steep structure with low SNR in Guihua limestone area, Sichuan Province[J]. *Journal of Geology*, 2021, 45(4): 420—424. (In Chinese)
- [11] 刘仕友, 马继涛, 孙万元, 等. 基于低频约束的高分辨率 Radon 变换多次波压制方法研究[J]. *物探化探计算技术*, 2019, 41(3): 293—298.
LIU S Y, MA J T, SUN W Y, et al. Multiple attenuation using low frequency constrained high-resolution parabolic Radon transform[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 41(3): 293—298. (In Chinese)
- [12] 李东庆, 袁刚, 杨金龙, 等. 逆散射级数和抛物线 Radon 变换联合的层间多次波压制策略[J]. *石油物探*, 2021, 60(2): 295—303.
LI D Q, YUAN G, YANG J L, et al. Suppression of internal multiples by combining inverse scattering series and the Radon transform[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2021, 60(2): 295—303. (In Chinese)
- [13] 孙海龙. 基于波场延拓的多次波压制技术及其改进[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
SUN H L. Method of wave field extrapolation and its improvement to remove multiples[D]. Changchun: Jilin University, 2015. (In Chinese)
- [14] 常青, 徐秀刚, 孙道朋. 基于反馈迭代和独立分量分析的多次波压制技术研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(10): 65—70.
CHANG Q, XU X G, SUN D P. The method of multiple attenuation based on feedback iteration and independent component analysis[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2018, 48(10): 65—70. (In Chinese)
- [15] 杨金龙, 朱立华. 逆散射级数层间多次波压制方法及其应用[J]. *石油物探*, 2018, 57(6): 853—861.
YANG J L, ZHU L H. Inverse scattering series internal multiple attenuation method and its application[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2018, 57(6): 853—861. (In Chinese)
- [16] 许璐. 地震数据炮域规则化方法研究及应用[J]. *物探与化探*, 2018, 42(6): 1245—1252.
XU L. Research on the regularization method for seismic data in shot domain [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(6): 1245—1252. (In Chinese)
- [17] 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-azimuth seismic exploration [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2014, 49(3): 596—610. (In Chinese)
- [18] 田忠斌, 李娟, 申有义, 等. OVT 域处理技术在沁水盆地深部煤层气勘探中的应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2020, 48(6): 93—102.
TIAN Z B, LI J, SHEN Y Y, et al. The application of OVT domain processing technology in deep CBM exploration in Qinshui Basin [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(6): 93—102. (In Chinese)
- [19] 蔡志东, 王世成, 韦永祥, 等. VSP 波场研究与应用现状[J]. *石油物探*, 2021, 60(1): 81—91.
CAI Z D, WANG S C, WEI Y X, et al. Research and application status of VSP wavefields [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2021, 60(1): 81—91. (In Chinese)
- [20] 罗明, 刘汉卿, 宗兆云, 等. 东沙隆起区灰岩强振幅影响下储层识别与流体检测研究及应用[J]. *物探化探计算技术*, 2023, 45(3): 335—343.
LUO M, LIU H Q, ZONG Z Y, et al. Research and application of reservoir identification and oil-gas prediction under the influence of the strong amplitude of limestone in the Dongsha uplift area [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2023, 45(3): 335—343. (In Chinese)
- [21] 任浩, 李宗杰, 薛姣, 等. 基于稀疏反演的多道匹配追踪地震信号去噪方法及其应用[J]. *石油物探*, 2019, 58(2): 199—207.
REN H, LI Z J, XUE J, et al. Multichannel matching pursuit based on sparse inversion for seismic data denoising and its application [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2019, 58(2): 199—207. (In Chinese)

- [22] YANG H, WANG. SEISMIC. time-frequency spectral decomposition by matching pursuit. *GEOPHYSICS*, VOL. 72, NO. 1 (JANUARY-FEBRUARY 2007); P. V13—V20.
- [23] 成谷, 张宝金. Morlet 小波匹配追踪方法的时频原子参数分析[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(6): 2247—2255.
- CHENG G, ZHANG B J. Analysis on parameters of time-frequency atoms in matching pursuit based on Morlet wavelet[J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(6): 2247—2255. (In Chinese)
- [24] 靳中原, 韩立国, 胡勇, 等. 基于低频信息补偿的数据驱动 Marchenko 成像[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(9): 3601—3615.
- JIN Z Y, HAN L G, HU Y, et al. Low frequency information compensation based data-driven Marchenko imaging[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(9): 3601—3615. (In Chinese)
- [25] 丁燕, 杜启振, 刘力辉, 等. 基于压缩感知和宽带俞式低通整形滤波器的地震低频信息特征分析与补偿[J]. *地球物理学报*, 2019, 62(6): 2267—2275.
- DING Y, DU Q Z, LIU L H, et al. Feature analysis and compensation of seismic low-frequency based on compressed sensing and broad-band Yu-type low-passing shaping filter[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(6): 2267—2275. (In Chinese)
- [26] 沈向存, 李宗杰, 姜忠正. 巴麦地区奥陶系低信噪比资料层间多次波叠后压制技术及应用[J]. *石油物探*, 2022, 61(3): 483—489.
- SHEN X C, LI Z J, JIANG Z Z. Post-stack suppression technology for internal multiples and its application in low signal-to-noise ratio data of Ordovician Bamai area in Tarim Basin, China[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2022, 61(3): 483—489. (In Chinese)
- [27] 张宪旭. 基于数字检波器的奥灰内部溶洞地震成像技术研究[J]. *物探化探计算技术*, 2021, 43(2): 194—201.
- ZHANG X X. Research on seismic imaging technology of karst cave in Ordovician limestone based on digital geophone[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 43(2): 194—201. (In Chinese)

Research and application of key technologies for seismic processing imaging in the Yubei Thrust Belt

SHEN Xiangcun, WEI Huadong, WU Guopei

(Exploration and Production Research Institute, Sinopec Northwest Oil Field Company, Urumqi 830011, China)

Abstract: The thrust belt is an essential area for Ordovician oil and gas exploration in the Yubei region. However, the imaging of thrust structures and cave reservoirs is limited by the narrow-azimuth seismic acquisition and the interference of intra-layer multiple reflections. This constraint hinders the expansion of the already discovered oil reservoirs in the area. In this study, based on the analysis of critical factors affecting complex structural imaging, the OVT domain gathers regularization processing to compensate for the irregularities in conventional 3D seismic spatial sampling. Additionally, by using azimuthal gathers with a long-offset approximation of vertical fault zones for imaging, the accuracy of the velocity modeling for the thrust belt is improved, and efforts are made to minimize the interference effects of interbed multiple waves. By combining the analysis and application of multiple wave VSP wavefield characteristics, the imaging quality of the thrust belt and fractured cavity reservoirs is significantly improved.

Keywords: OVT; regularization processing; azimuthal gathers; interlayer multiple wave; VSP wavefield; matching and separation