doi: 10.11720/wtyht.2026.1355
周鹏. 基于叠后地震资料方位振幅变化率差异的裂缝预测技术[J]. 物探与化探, 2026, 50(1): 137-144. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1355
Zhou P. A fracture prediction technique based on differences in azimuthal amplitude variations in post-stack seismic data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(1): 137-144. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1355

基于叠后地震资料方位振幅变化率差异的裂缝预测技术

周 鹏
(中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028)

摘 要: 裂缝作为油气储层的重要渗透通道与储集空间, 其分布特征(密度、方向)的精准预测对油气勘探开发具有关键意义。现有叠后裂缝预测方法(如相干、曲率等)因无法有效提取方位差异信息, 难以满足精细化研究需求。本文提出一种基于叠后地震方位属性差异椭圆拟合的裂缝预测方法: 通过构造导向滤波优化原始数据, 选取 3 个及以上特征方位角提取方位属性, 利用椭圆拟合、量化属性的各向异性, 最终通过椭圆参数(扁率、长轴/短轴方向)反演裂缝密度与方向。某油田实际数据应用结果表明, 该方法预测的裂缝密度、方向与钻井实钻结果吻合度高, 显著优于传统叠后方法, 为缺乏宽方位叠前数据的工区提供了高精度裂缝预测的解决方案。

关键词: 储层预测; 裂缝; 密度; 方位属性; 椭圆拟合
中图分类号: P631.4; P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)01-0137-08

0 引言

裂缝型储层是全球油气勘探的核心目标之一, 据统计全球 30% 以上的油气产量来自裂缝型储层, 其发育程度直接决定储层的渗透率(裂缝发育区渗透率可提升 1~2 个数量级)与单井产能, 对油气田勘探开发经济效益具有决定性影响[1-2]。基于地震资料的预测作为裂缝预测的主流技术, 按数据类型可分为叠前与叠后两类方法, 二者在应用中存在各自的优势与局限。

叠前宽方位方法通过分析不同方位/炮检距反射波的速度、振幅等差异, 可直接反演裂缝的方位与密度(例如 AVAZ 技术), 但宽方位地震数据采集成本比常规叠后数据高 3~5 倍, 且单工区覆盖范围通常不足 100 km^2, 难以满足大型油气田整体勘探开发的需求[3-7]。

叠后方法通常是基于常规叠后地震数据(覆盖范围可达 500 km^2 以上、成本仅为叠前方法的 1/5)提取相干、最大似然体、曲率等属性间接预测裂缝, 虽具备成本低、易推广的优势, 但因未考虑地震波传播的方位各向异性特征, 无法区分裂缝的走向差异, 且无法识别低角度裂缝, 难以满足油气勘探和油田精细化开发(如剩余油挖潜、水平井位部署)对裂缝参数的定量需求[8-11]。

在实际生产中, 我国渤海、南海等海域 70% 以上的油气工区仅具备叠后地震数据, 因此"如何从叠后数据中挖掘方位差异信息, 突破传统叠后方法'无方位分辨能力'的技术瓶颈", 成为提升裂缝预测精度的核心问题。通过梳理国内外现有叠后裂缝预测技术, 可将其分为 3 类, 且均存在明显局限性。

1)结构属性类: 相干属性通过计算相邻地震道的相似性识别裂缝(裂缝会导致相似性降低), 但对低角度裂缝敏感度过低, 且易受地层岩性变化的干扰(如砂泥岩界面会产生虚假低相似性响应); 曲率属性通过地层弯曲程度反演裂缝(地层弯曲部位易发育张性裂缝), 但受地层形态影响显著, 例如在背斜构造核部, 曲率高值区可能仅反映地层形态而非裂缝, 无法区分构造裂缝与非构造裂缝(如成岩裂缝)。

2)算法增强类: 蚂蚁体技术通过模拟蚂蚁寻径过程增强裂缝的线性响应, 但对参数(步长、阈值、

收稿日期: 2025-09-28; **修回日期:** 2025-11-17
基金项目: 新型油气勘探开发国家科技重大专项项目 28 课题五"深层超深层勘探地球物理关键技术"(2025ZD1402805)
作者简介: 周鹏 (1978-), 男, 高级工程师, 2005 年毕业于中国石油大学(北京), 主要从事地震资料处理及储层预测研究工作。Email: zhoupeng@cnooc.com.cn

连接概率)依赖极强,不同工区需反复调试,且易产生多解性(如高陡地层与裂缝的响应难以区分);最大似然属性通过统计提取地震属性的异常值指示裂缝,但仅能定性识别裂缝发育区,无法量化裂缝的发育强度(密度),且易受随机噪声干扰。

3)方位属性类:部分研究尝试提取叠后数据的方位振幅、频率属性,但仅通过属性差值定性描述裂缝发育区,未建立"方位属性差异—裂缝参数(密度、方向)"的定量映射关系,无法获取裂缝的具体走向与密度数值,实用性受限[12]。

从岩石物理机制来看,裂缝的存在会导致地层呈现方位各向异性:地震波在平行裂缝方向传播时,因裂缝对波场的干扰弱,振幅衰减小、传播速度快;在垂直裂缝方向传播时,因波场散射与能量吸收,振幅衰减显著、传播速度慢,岩石物理裂缝储层响应特征分析表明,垂直裂缝方向振幅衰减量是平行方向的 2~3 倍。这一物理特性为通过叠后方位属性反演裂缝提供了理论基础[13-15]。

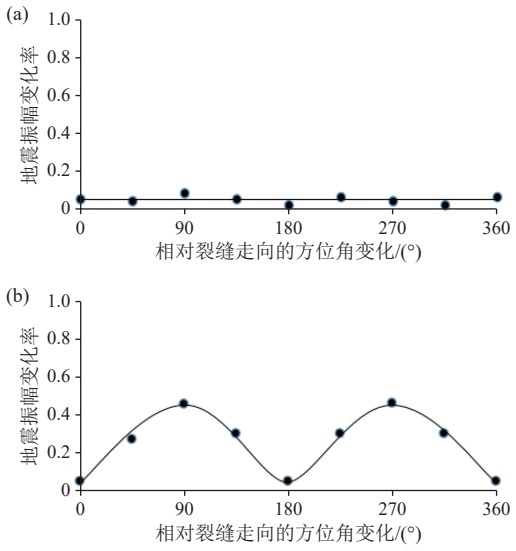
综上,现有叠后方法均未有效利用"方位属性差异"这一关键特征,无法实现裂缝参数的定量预测。本文基于地层方位各向异性机制,提出"构造导向滤波数据优化—多方位属性提取—椭圆拟合量化各向异性—裂缝参数反演"的技术流程,建立"方位属性差异—椭圆参数—裂缝参数"的定量关系,实现叠后数据中裂缝密度与方向的准确预测。

1　方法原理与技术流程

1.1　方法原理

对于以裂缝为主控因素的非均质地层,地震波的传播特性具有显著的方位依赖性,其核心机制为:各向同性地层,地震波在平面内不同方位角传播时(图 1a),振幅、速度等属性无明显差异(实验测得不同方位角振幅变化率差值< 5%);在裂缝发育区(图 1b),裂缝作为线性不连续面,会改变地层的弹性参数(如刚度系数 C_{11}、C_{13}),导致地震波传播的方位各向异性,平行裂缝方向地震波沿裂缝走向传播(0°、180°),波场受裂缝干扰弱,振幅变化率小(如实验中平行裂缝方向振幅变化率为<8%);垂直裂缝方向(90°、270°),地震波横穿裂缝,波场因散射与能量吸收发生显著变化,振幅变化率大(实验中垂直裂缝方向振幅变化率在 35%~45% 之间)。

叠后地震数据上,无裂缝发育位置(图 2,*A* 点),沿平面上不同方位角提取地震属性,不同方位角之间的地震属性差异小或者无变化,方位属性椭圆拟合近似为圆形。裂缝发育位置(图 2,*B* 点)的地震波传播具有方位各向异性,在叠后地震数据的响应为:平行裂缝方向因裂缝对波场干扰弱,地震属性(如振幅变化率)较稳定;垂直裂缝方向因波场散射与衰减,属性变化显著,椭圆拟合扁率大。基于上述机制,本文通过以下逻辑实现裂缝参数预测。



a—无裂缝各向同性地层;b—裂缝各向异性地层

a—fracture-free isotropic formation; b—fractured anisotropic formation

图 1　地震振幅变化率随方位角变化

Fig. 1　Variation of seismic amplitude change rate with azimuth angle

1)数据优化:采用构造导向滤波,在保留裂缝小尺度信息的同时压制噪声,提升数据信噪比;

2)差异捕捉:选取覆盖主要构造方向的特征方位角,提取方位属性(振幅变化率),量化不同方向的属性响应差异;

3)各向异性量化:通过椭圆拟合将离散的方位属性值转化为连续的几何参数(长轴、短轴、长轴方位角),并计算椭圆扁率,反映各向异性强度;

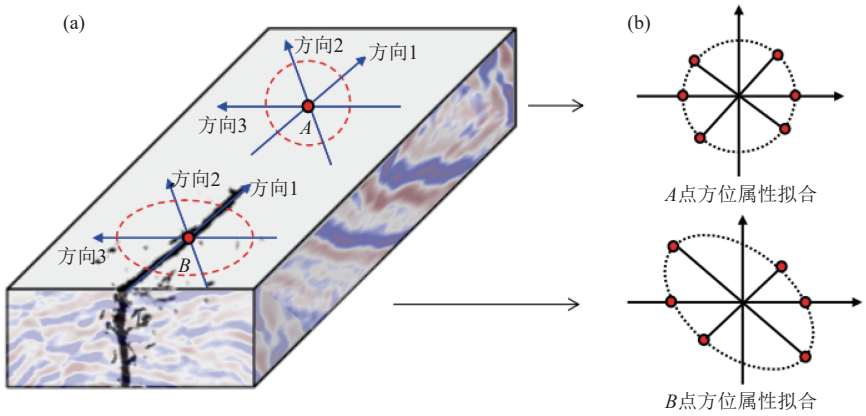
4)参数反演:建立椭圆参数与裂缝参数的映射关系——扁率越大,裂缝密度越高;椭圆短轴方位角与裂缝走向一致。

1.2　技术实现步骤

1.2.1　构造导向滤波数据优化

原始地震数据常受噪声干扰(如随机噪声、面波等),需通过滤波增强有效信号,但传统高斯平滑滤波会压制裂缝等小尺度构造,导致裂缝的分辨率降低。构造导向滤波基于地震同相轴走向自适应调整滤波方向,实现 "保裂缝—提信噪比"的平衡[16],具体原理如下:

同相轴走向计算:通过 3×3 邻域计算每个样点的局部梯度方向(梯度向量的垂直方向即为同相轴



a—地震数据及方位属性提取; b—方位属性椭圆模拟

a—seismic data and azimuth attribute extraction; b—elliptical simulation of azimuth attributes

图 2　叠后地震方位角差异裂缝检测方法示意

Fig. 2　Schematic of post-stack seismic azimuth difference fracture detection method

走向θ), 公式为:

$$\theta = \arctan\left(-\frac{\partial f/\partial x}{\partial f/\partial y}\right), \qquad (1)$$

式中: $f(x,y)$为原始地震数据在(x, y)处的振幅值; $\partial f/\partial x$、$\partial f/\partial y$分别为 x、y 方向的振幅梯度。并且进行了自适应滤波核设计, 沿同相轴走向θ构建 2D 高斯滤波核$G_\theta(x,y)$, 窗口大小设为 5×5(根据数据信噪比调整, 信噪比较低时可扩大至 7×7)。平行同相轴方向, 滤波核标准差$\sigma = 2.0$, 采用大窗口平滑, 增强地层连续性, 提升信噪比; 垂直同相轴方向, 滤波核标准差$\sigma = 0.5$, 采用小窗口平滑, 保留裂缝、岩性边界等不连续性。

在滤波计算上, 通过卷积运算实现数据优化:

$$f_{\text{opt}}(x,y) = f(x,y) * G_\theta(x,y) \qquad (2)$$

式中: $f_{\text{opt}}(x,y)$为优化后的数据; $*$为二维卷积运算。经此处理后, 可以有效地提高数据信噪比, 且不影响裂缝的线性响应特征。

1.2.2　特征方位角选取

为了更好反映裂缝特征, 需要沿不同的方位角提取地震属性, 方位角选取需结合工区地质背景(主要断层走向), 遵循“覆盖主要构造方向、均匀分布”原则, 具体步骤如下。

1) 主断层走向确定

基于地震剖面同相轴错动特征与断层解释图, 统计断层走向的平均值, 确定研究区主断层走向为φ_1, 并把φ_1设为初始的方位角。

2) 方位角设置

①基础方案(构造简单工区, 裂缝发育模式简单): 选取 3 个方位角, 间隔 45°, 覆盖 0°~90° 主要方向, 具体为, 第 1 方位角 φ_1(平行主断层走向); 第 2 方位角 $\varphi_2 = \varphi_1$+45°; 第 3 方位角 $\phi_3 = \varphi_1$+90°。

②优化方案(构造复杂工区, 如多组裂缝发育): 选取 5~7 个方位角, 以φ_1设为初始方位角, 间隔 30°(如φ_1+0°、φ_1+30°、φ_1+60°、φ_1+90°、φ_1+120°、φ_1+150°), 可有效减少椭圆拟合误差, 提升裂缝预测精度。

1.2.3　方位属性提取

选取振幅变化率作为方位属性, 振幅变化率对裂缝引起的波场扰动敏感, 响应强度是常规振幅属性的 1.5~2 倍, 沿 1.2.2 节中确定的方位角提取, 具体方法如下。

振幅变化率定义为: 某一方位角φ下, 地震数据在 (x, y) 处的振幅变化率 $A_\varphi(x,y)$, 定义为相邻样点振幅差的绝对值与距离的比值, 公式为:

$$A_\varphi(x,y) = \frac{\left|f_{\text{opt}}(x+i,y+i) - f_{\text{opt}}(x,y)\right|}{d}, \qquad (3)$$

其中: (i, j)为沿方位角φ的邻域偏移量, 取 $(1, 0)$(即水平方向相邻样点); d为相邻样点的距离, 等于地震数据的面元尺寸; $f_{\text{opt}}(x+i,y+j)$ 为$(x+i,y+j)$处优化后的振幅值。

多方位属性提取: 沿 φ_1、φ_2、φ_3分别提取振幅变化率, 得到 3 个方位属性数据体 $A_1(x,y)$、$A_2(x,y)$、$A_3(x,y)$。

1.2.4　椭圆拟合量化各向异性

裂缝引起的方位属性差异具有“椭圆分布特征”, 通过椭圆极坐标方程拟合 3 个方位的振幅变化率, 可量化各向异性强度, 具体步骤如下。

1)椭圆方程建立, 椭圆极坐标方程为:

$$A_\phi = \frac{ab}{\sqrt{(b\cos\phi)^2 + (a\sin\phi)^2}}, \qquad (4)$$

式中: A_φ为方位角 φ 对应的振幅变化率; a 为椭圆长

轴(对应垂直裂缝方向的最大振幅变化率)；b 为椭圆短轴(对应平行裂缝方向的最小振幅变化率)；φ 为方位角(与正北方向的夹角，逆时针为正)。

2) 参数求解：将 $A_1(\varphi_1)$、$A_2(\varphi_2)$、$A_3(\varphi_3)$代入椭圆方程，采用最小二乘法求解 a、b、θ(长轴方位角)，目标函数为：

$$\min\sum_{k=1}^{3}\left(A_{\phi_k}-\frac{ab}{\sqrt{(b\cos\phi_k)^2+(a\sin\phi_k)^2}}\right)^2, \qquad (5)$$

求解时，初始值设为 a=max (A_1, A_2, A_3)、b=min (A_1, A_2, A_3)，迭代次数设为 100 次，收敛阈值设为 10^{-6}，确保拟合精度(残差< 0.05)。

3) 扁率计算：扁率 γ 反映地层各向异性强度，公式为：

$$\gamma=\frac{a-b}{a}, \qquad (6)$$

式中：$\gamma\in[0,\ 1]$，γ越接近 1，各向异性越强，裂缝发育越密集。

1.2.5　裂缝参数求取

裂缝密度标定：以研究区岩芯、测井解释、油气等反映裂缝的数据对γ进行标定，得到全工区的裂缝密度数据体。

裂缝方向确定：椭圆短轴方向对应平行裂缝方向(因短轴方向振幅变化率最小，波场最稳定)，因此裂缝走向与椭圆短轴方位角一致。

2　数据处理

2.1　数据分析与传统叠后裂缝检测方法试验

2.1.1　实验数据概况

实验数据为我国渤海某潜山叠后三维地震数据(图 3)，工区面积约 500 km^2，涵盖 B-2、B-4 两口探井，目的层为火山岩储层，埋深 4 895~6 204 m；地震反射特征为中弱振幅、断续同相轴，数据主频 15 Hz，面元尺寸 12.5 m×25 m，时间采样间隔 2 ms，无宽方位叠前数据。

地质背景上，研究区发育 NE 向构造断裂(主走向 35°)，工区内的储层以裂缝型为主，B-2、B-4 井均钻遇裂缝发育层段，其中 B-2 井风化壳裂缝发育程度高，B-4 井风化壳裂缝较发育，发育程度差于 B-2 井，且取芯结果证实油气显示与裂缝发育程度呈正相关(B-2 井裂缝发育区油气产量为 20 m^3/d，无裂缝区仅 2 m^3/d)。

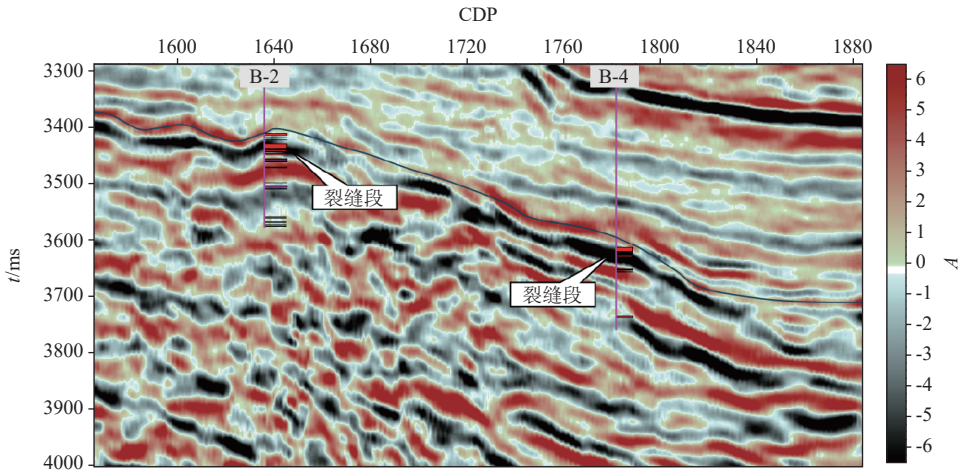


图 3　过井地震剖面

Fig. 3　Well-passing seismic profile

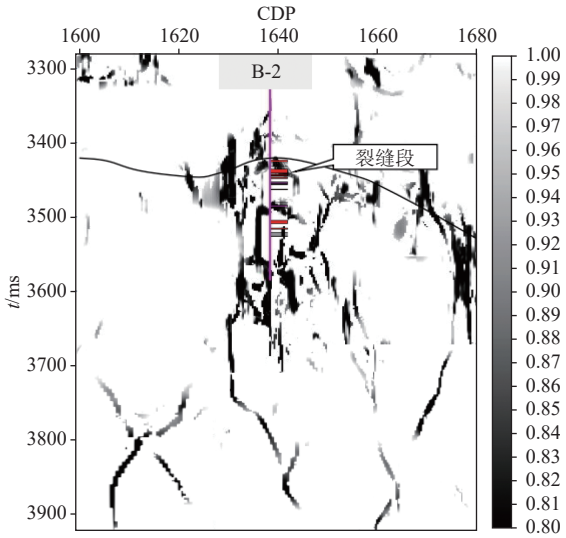
2.1.2　传统方法试验与局限性分析

选取常规叠后裂缝预测方法(相干属性、最大似然属性)进行试验，参数设置与结果如下。

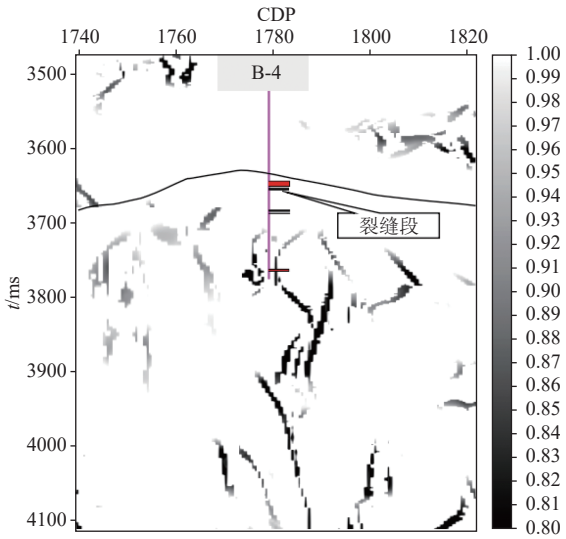
相干属性试验上，计算窗口为 5×5×5(时间×道×道)，相似性阈值设为 0.6；从相干结果的特征上分析(图 4、图 5a)，B-2 井区裂缝发育密集可识别出低相似性的线性响应，但 B-4 井区裂缝无低相干特征，发育较稀疏；且因噪声干扰，低相似性响应与岩性变化混淆，吻合度不高；无法区分裂缝走向，仅能定性识别裂缝发育区。

最大似然属性预测裂缝上，设置统计窗口为 10×10 道，异常值阈值设为 95% 分位数；提取了最大似然体平面图(图 5b)，从结果特征上分析，同样仅能在 B-2 井区识别出局部异常值区，无法区分噪声异常与裂缝异常，B-4 井区裂缝无有效响应；且无法量化裂缝密度，实用性受限。

综上，传统方法因无法利用方位信息，在裂缝方向识别与稀疏裂缝区预测上精度不足，难以满足工



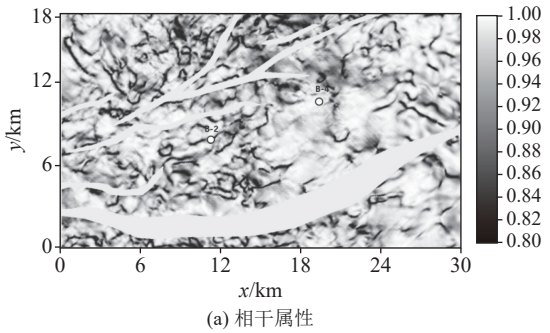
(a) 过B-2井相干属性



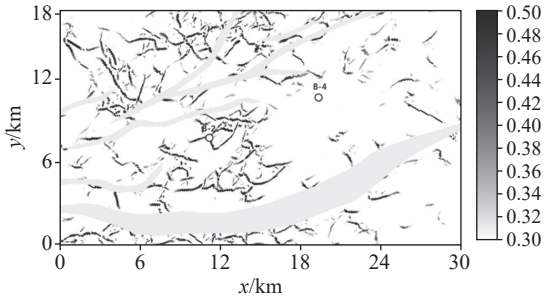
(b) 过B-4井相干属性

图 4　常规叠后裂缝预测剖面

Fig. 4　Conventional post-stack fracture prediction profile



(a) 相干属性



(b) 最大似然属性

图 5　常规叠后裂缝预测平面

Fig. 5　Conventional post-stack fracture prediction plane

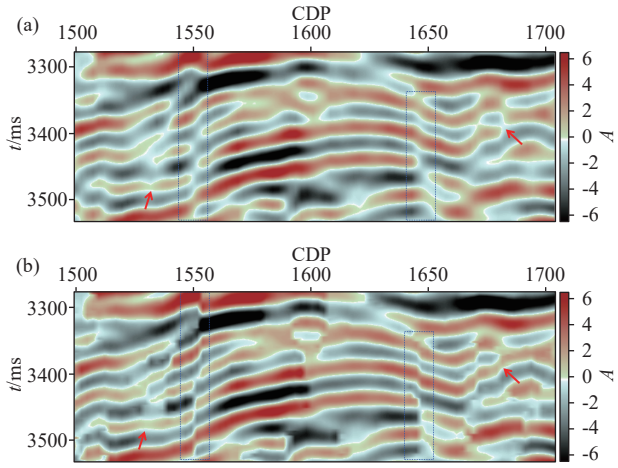


图 6　构造导向滤波处理前 (a) 后 (b) 地震资料对比

Fig. 6　Comparison of seismic data before(a) and after(b) structural-oriented filtering processing

区研究需求。

2.2　叠后方位角差异裂缝检测处理与效果

2.2.1　数据优化与构造导向滤波处理

采用 1.2.1 节参数(窗口 5×5, 平行方向 σ=2.0, 垂直方向 σ=0.5)对原始数据进行滤波, 从处理前后的对比来看(图 6), 处理后数据信噪比有所提高, 反射同相轴的连续性得到增强(图 6 红色箭头处), 裂缝的线性响应特征显著增强(图 6 蓝框处)。

2.2.2　方位属性提取

结合工区主断层走向(35°方向为工区主断层走向), 选取 3 个方位角(35°、80°、125°), 按 1.2.3 节方法提取振幅变化率属性。

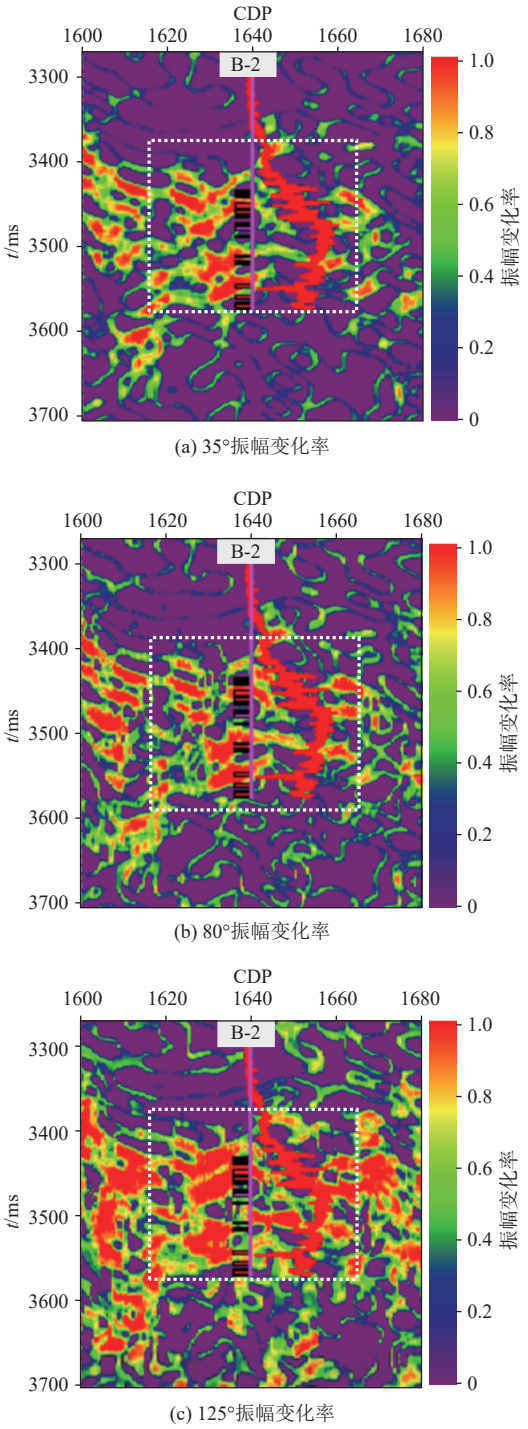
35° 方位属性(图 7a): 振幅变化率低(平均 0.23), 对应平行裂缝方向的稳定波场;

80° 方位属性(图 7b): 振幅变化率中等(平均 0.38), 对应斜交裂缝方向的波场;

125° 方位属性(图 7c): 振幅变化率显著升高(平均 0.46), 对应垂直裂缝方向的扰动波场; 三者差异验证了裂缝引起的方位振幅变化率随与裂缝走向的夹角增大而增大, 为后续椭圆拟合奠定基础。

2.2.3　椭圆拟合结果

按 1.2.4 节方法对 3 个方位属性进行椭圆拟合, 得到扁率数据体(图 8), 与 B-2、B-4 井的裂缝发育和油气显示对比(油气发现与裂缝发育程度正相关), 从对比结果上看, 扁率的大小与油气发现(裂缝发育)的相关性好: B-2 井区扁率 γ>0.6 的高值区与井钻遇的油气发育(裂缝发育层段, 埋深 5 100~5 300 m)



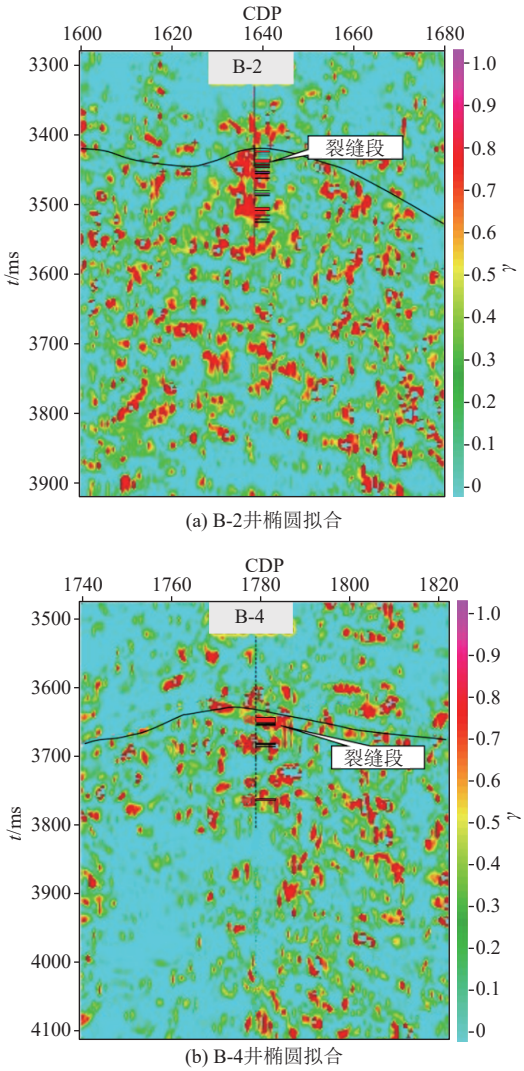
(a) 35°振幅变化率

(b) 80°振幅变化率

(c) 125°振幅变化率

图 7　叠后方位角振幅变化率属性

Fig. 7　Post-stack azimuth amplitude change rate attribute



(a) B-2井椭圆拟合

(b) B-4井椭圆拟合

图 8　叠后方位属性椭圆拟合剖面

Fig. 8　Post-stack azimuthal attribute ellipse fitting profile

吻合度高，γ 最大值达 0.95；B-4 井区扁率 γ=0.6~0.8 的区域与油气发现（裂缝发育层段，埋深 5 500~5 700 m）吻合，γ 值低于 B-2 井区；无裂缝区（如 B-2 井埋深>5 400 m，B-4 井埋深>5 700 m）扁率均值 γ<0.2，对应椭圆近似圆形，无方位各向异性；预测结果与井实钻一致，表明拟合结果可靠。

2.2.4　裂缝参数预测结果

B-2、B-4 井在风化壳部位裂缝都较发育，沿风化壳层段（埋深 4 895~5 000 m）提取裂缝密度与方向平面图（图 9），选取了高扁率区（γ>0.6）为裂缝发育区，图 9 的色标代表裂缝密度，结果如下：

裂缝密度：B-2、B-4 井都处于裂缝密度预测高值区，B-2 井因靠近大断裂（距离<1.5 km），受断层、应力场影响，裂缝密度更大，扁率 γ 值域处于 0.75~0.95 区间，B-4 井区远离大断裂（距离>3 km），扁率 γ 值域处于 0.6~0.8 区间，裂缝发育，但比 B-2 井稍差。

裂缝方向：工区整体裂缝发育方向为 NE 向（图 9 右下角玫瑰图），与区域的断层解释基本一致；B-2、B-4 井裂缝方向整体上与区域裂缝方向一致，B-2 井离大断裂更近，受区域断层控制强，其裂缝方向更为复杂，局部裂缝方向呈 NE25°~55° 的发散分布，B-4 井区断裂影响小，主要受地层应力控制，裂缝方向更集中，呈 NE35°~50°分布。

对比传统方法（图 4、图 5）与本文方法的预测结

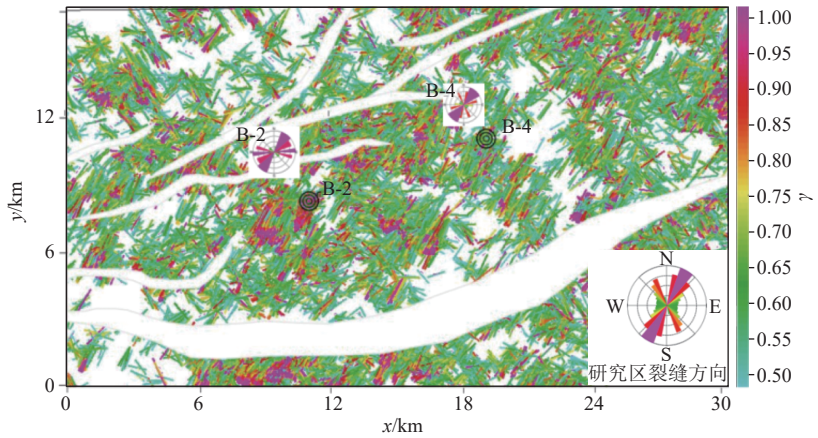


图 9　研究区裂缝密度和裂缝方向

Fig. 9　Fracture density and fracture direction in the study area

果(B-2 井风化壳裂缝发育、B-4 井无裂缝),本文方法在裂缝密度和方向的预测精度上均显著优于结构类相干等属性、算法增强类最大似然等的裂缝预测结果,与实钻吻合度明显提升。

3　结论

本文针对传统叠后裂缝预测方法无法有效提取方位差异信息,难以满足油气勘探开发精细化研究的需求,采用"构造导向滤波—多方位属性提取—椭圆拟合—参数反演"的技术流程,建立"方位属性差异—椭圆参数—裂缝参数"的定量映射关系,为叠后数据实现高精度裂缝预测提供了理论依据。

以地层方位各向异性机制为依托,发展了一种基于叠后地震方位属性差异椭圆拟合的裂缝预测方法,该方法相对于传统的相干、最大似然体等属性,能够进一步提升裂缝密度与方向的定量预测精度,为提高裂缝储层的表征提供了技术基础。

将所提出的方法应用于渤海某潜山叠后三维地震数据工区,得到合理、可靠的裂缝参数预测结果,与钻井实钻结果吻合度高,且运算量仅为叠前方法的 1/5,适合大规模应用,为缺乏宽方位叠前数据工区精准预测裂缝的密度和方向提供了新的方案。

参考文献(References):

[1] 邓运华. 渤海大中型潜山油气田形成机理与勘探实践 [J]. 石油学报, 2015, 36(3): 253−261.
Deng Y H. Formation mechanism and exploration practice of large-medium buried-hill oil fields in Bohai Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(3): 253−261.

[2] 徐长贵, 周家雄, 杨海风, 等. 渤海湾盆地大型变质岩潜山油田勘探发现及地质意义 [J]. 石油学报, 2023, 44(10): 1587−1598, 1611.
Xu C G, Zhou J X, Yang H F, et al. Discovery of large-scale metamorphic buried-hill oilfield in Bohai Bay Basin and its geological significance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(10): 1587−1598, 1611.

[3] 汪舒, 王锐, 杨家义, 等. 基于非平稳褶积模型的泊松阻抗及裂缝参数叠前地震各向异性高分辨率直接反演方法 [J]. 物探与化探, 2025, 49(3): 642−652.
Wang S, Wang R, Yang J Y, et al. High-resolution direct inversion of Poisson's impedance and fracture parameters using prestack seismic anisotropy data based on the non-stationary convolution model[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 49(3): 642−652.

[4] 梁志强, 李弘. 不同方位各向异性反演技术对比和总结 [J]. 物探与化探, 2024, 48(2): 443−450.
Liang Z Q, Li H. Comparison and summary of different azimuthal anisotropy-based inversion techniques[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(2): 443−450.

[5] 谢锐, 阎建国, 陈琪. 叠前各向异性系数反演及在裂缝预测中的应用 [J]. 物探与化探, 2022, 46(4): 968−976.
Xie R, Yan J G, Chen Q. Prestack inversion of anisotropic coefficients and its application in fracture prediction[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(4): 968−976.

[6] 陈天杰, 程冰洁, 徐天吉, 等. 基于正交各向异性介质频变 AVAZ 反演的裂缝含气性预测 [J]. 石油地球物理勘探, 2024, 59(3): 567−580.
Chen T J, Cheng B J, Xu T J, et al. Prediction of fracture gas bearing based on frequency-dependent AVAZ inversion in orthotropic medium[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2024, 59(3): 567−580.

[7] 周鹏, 刘志斌, 张益明, 等. 卡塔尔 A 区块碳酸盐岩盖层裂缝分析及预测 [J]. 中国海上油气, 2015, 27(5): 31−36.
Zhou P, Liu Z B, Zhang Y M, et al. Fracture analysis and prediction of carbonate cap-rock in Q atar A block[J]. China Offshore Oil and Gas, 2015, 27(5): 31−36.

[8] 肖曦, 周鹏, 张益明, 等. 基于绕射信息提取技术的断裂识别方法及应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(5): 1130−1136, 1179, 930.
Xiao X, Zhou P, Zhang Y M, et al. Research and application of fracture identification method based on diffraction information extraction technology[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(5):

1130−1136, 1179, 930.

[9] 王成泉, 王孟华, 周佳宜, 等. 多属性融合定量储层预测方法研究与应用——以廊固凹陷杨税务潜山为例 [J]. 物探与化探, 2022, 46(1): 87−95.
Wang C Q, Wang M H, Zhou J Y, et al. Application of multi-attribute fusion in quantitative prediction of reservoirs: A case study of Yangshuiwu buried hill in Langgu sag[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 87−95.

[10] 刘韬, 王铁一, 孙珂, 等. 碳酸盐岩缝洞型储层叠前—叠后地震综合预测方法及应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2023, 58(6): 1463−1471.
Liu T, Wang T Y, Sun K, et al. Pre-stack and post-stack seismic comprehensive prediction method and its application in carbonate fractured-vuggy reservoirs[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2023, 58(6): 1463−1471.

[11] 周鹏, 肖曦, 陶杰, 等. 绕射信息提取技术及其在致密砂岩断裂系统识别中的应用 [J]. 石油物探, 2020, 59(2): 276−282.
Zhou P, Xiao X, Tao J, et al. Diffraction information extraction and its application to the identification of tight sandstone fracture systems[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(2): 276−282.

[12] 陈志刚, 马文杰, 赵宏忠, 等. 利用叠后地震资料方位强度属性预测开启裂缝 [J]. 地球物理学进展, 2020, 35(5): 1745−1750.
Chen Z G, Ma W J, Zhao H Z, et al. Prediction of openness fracture with azimuthal intensity based on post-stack seismic data[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(5): 1745−1750.

[13] 李红梅, 曲志鹏, 张云银, 等. HTI 介质下五维地震脆性稳定预测方法研究 [J]. 石油物探, 2025, 64(1): 151−162.
Li H M, Qu Z P, Zhang Y Y, et al. Robust HTI brittleness prediction using 5D seismic data[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2025, 64(1): 151−162.

[14] 印兴耀, 刘欣欣. 储层地震岩石物理建模研究现状与进展 [J]. 石油物探, 2016, 55(3): 309−325.
Yin X Y, Liu X X. Research status and progress of the seismic rock-physics modeling methods[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(3): 309−325.

[15] 印兴耀, 马正乾, 向伟, 等. 地震岩石物理驱动的裂缝预测技术研究现状与进展(Ⅰ)——裂缝储层岩石物理理论 [J]. 石油物探, 2022, 61(2): 183−204.
Yin X Y, Ma Z Q, Xiang W, et al. Review of fracture prediction driven by the seismic rock physics theory (Ⅰ): Effective anisotropic seismic rock physics theory[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2022, 61(2): 183−204.

[16] 董旭光, 刘斌, 张浩, 等. 扩散滤波和统计学字典学习联合地震噪声压制方法 [J]. 石油地球物理勘探, 2025, 60(4): 852−860.
Dong X G, Liu B, Zhang H, et al. Diffusion filtering and statistical dictionary learning combined with seismic noise suppression[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2025, 60(4): 852−860.

A fracture prediction technique based on differences in azimuthal amplitude variations in post-stack seismic data

ZHOU Peng

(*CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing* 100028, *China*)

Abstract: Fractures serve as important seepage channels and storage spaces for hydrocarbon reservoirs. Therefore, the precise prediction of their distribution characteristics (density and orientation) holds critical significance for hydrocarbon exploration and development. However, existing fracture prediction methods using post-stack seismic data (such as coherence and curvature) cannot effectively extract azimuthal differences, thus failing to meet the demand for high-precision fracture prediction. Given this, this paper proposed a fracture prediction method by performing ellipse fitting on azimuthal attribute differences of post-stack seismic data. Specifically, the original data were optimized using structure-oriented filtering, from which three or more characteristic azimuth angles were further selected to extract azimuthal attributes. Then, the extracted attributes were analyzed using ellipse fitting to quantify attribute anisotropy. Ultimately, the fracture density and orientation were inverted using ellipse parameters (the ellipticity and major/minor axis directions). The practical application of this method in an oil field demonstrates a high coincidence between the predicted fracture density and direction and the actual drilling data, achieving superior accuracy compared to conventional fracture prediction methods. This method provides a high-precision fracture prediction solution for areas lacking wide-azimuth pre-stack seismic data.

Key words: reservoir prediction; fracture; density; azimuth attribute; ellipse fitting

(本文编辑: 叶佩)