

裂缝模拟技术在HZ地区的应用

王日成

中国石化江苏油田分公司, 江苏 扬州

收稿日期: 2026年4月8日; 录用日期: 2026年5月9日; 发布日期: 2026年6月15日

摘要

叠后地震数据作为石油工业中最常用的数据, 在大多数情况下, 仅用于基于地震属性定性刻画裂缝发育程度。现有裂缝预测技术存在明显局限性: 在常用的叠后裂缝预测方法中, 蚂蚁体目前被认为是对裂缝识别精度较高的手段, 在剖面和平面上均能较好地指示裂缝发育。但是受制于资料、人工参数的影响, 其抗噪性能略差, 且仍停留在定性属性描述层面, 缺乏定量预测能力。为实现断裂的快速有效识别, 研究提出了一种基于张量方向场的裂缝定量预测技术, 利用叠后地震数据开展裂缝定量预测, 以提升断裂预测精准度。将该方法应用于苏北盆地HZ地区阜宁组页岩油储层, 通过与实际钻井成像测井资料中的裂缝密度及方位进行对比, 验证了该方法具有较高的可靠性。

关键词

裂缝定量预测, 裂缝预测, 苏北盆地, 储层预测, 页岩油

Application of Fracture Simulation Technology in HZ Region

Richeng Wang

Jiangsu Oilfield Branch of Sinopec, Yangzhou Jiangsu

Received: April 8, 2026; accepted: May 9, 2026; published: June 15, 2026

Abstract

Post-stack seismic data, as the most commonly used data in the petroleum industry, is mostly used only to qualitatively describe the degree of fracture development based on seismic attributes. Existing fracture prediction technologies have limitations. Among commonly used post-stack methods, ant-body simulation is currently considered to be a method with high accuracy in fracture identification

in post-stack fracture prediction, and it can indicate the existence of fractures well in both profile and planar views. However, constrained by data quality and manual parameter settings, it exhibits relatively poor noise resistance and remains confined to qualitative attribute characterization, lacking quantitative prediction capability. To achieve rapid and effective fracture identification, this study proposes a quantitative fracture prediction technology based on tensor direction field, using post-stack seismic data to conduct quantitative fracture prediction and improve the accuracy of fracture prediction. The method was applied to the shale oil reservoirs of the Funing Formation in the HZ area of the Subei Basin. Comparison with fracture density and fracture direction data from actual drilling imaging logging showed that this method has high reliability.

Keywords

Quantitative Fracture Prediction, Fracture Prediction, Subei Basin, Reservoir Prediction, Shale Oil

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

对于页岩气、页岩油等非常规储层，微断裂、天然裂缝发育区是造成钻井井况复杂、压裂窜扰、井间产能差异大的主要因素之一，且此类微断裂和裂缝发育区的识别与预测难度大、精度低。基于地震资料的裂缝识别与预测是目前重要的技术手段之一，常用的方法包括：利用叠后地震属性(如相干、曲率和倾角等)预测裂缝发育程度[1]、利用叠前宽方位角数据预测裂缝密度和发育方向[2]、基于岩石物理模型模拟裂缝型孔隙度[3]以及储层裂缝随机建模方法定量预测裂缝[4]等。在这些方法中，叠后地震数据虽作为最广泛的应用数据，但通常仅用于基于地震属性定性评价裂缝发育程度。本文提出了一种基于张量方向的裂缝定量预测技术[5]，其能提升叠后数据预测精度，对生产需求提供快速支撑。

2. 技术流程和技术方法

2.1. 技术流程

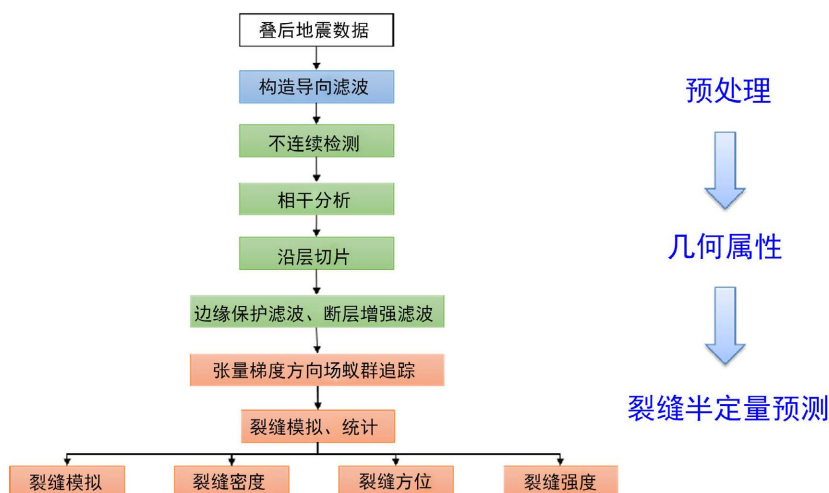


Figure 1. Flowchart of crack simulation technology
图 1. 裂缝模拟技术流程图

利用三维叠后地震数据,实现裂缝定量表征,技术流程图如图1所示,主要流程如下:

- ① 在叠后地震数据上,利用第三代本征值相干技术计算高精度相干体;
- ② 使用基于方向一致性的蚁群追踪算法,在脊线增强的约束下,对相干体进行后处理,以达到相干增强的目标;
- ③ 以模拟点张量方向场为基础,计算邻域内各方向的权值核函数,使用最优化聚类方法加权拟合模拟点主要方向的裂缝属性值;
- ④ 基于裂缝属性值模拟结果,统计单位半径内的相对裂缝密度与裂缝发育主方位,得到相对裂缝密度和裂缝发育方向。

基于以上步骤实现了利用叠后地震数据定量表征裂缝的目的。

2.2. 技术方法原理

2.2.1. 本征值相干技术

第三代本征值相干克服了第一代相干抗噪性差和第二代相干对小断层敏感性差的缺点,对于信噪比低的数据也能很好地提高分辨率,增强断层识别的精度。本征值相干技术将三维地震数据定义为一个 N 道 J 个采样点组成的 $J \times N$ 矩阵(公式(1)),本征结构相干性定义为三维时窗内的主要特征值 λ_1 与总能量 E_c 的比例[6]。

$$E_c = \frac{\lambda_1}{\sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J d_{jn}^2} = \frac{\lambda_1}{\sum_{n=1}^N \lambda_N} \quad (1)$$

式中, d_{jn} 为第 n 道第 j 个采样点。

2.2.2. 相干增强技术

断层在相干体剖面或平面上的有效信号均表现为线状特征,该特征类似于指纹或掌纹图像处理中的脊线特征。在相干增强中可以按照指纹或掌纹图像处理中基于种子区域增长的脊线方向估计进行蚁群追踪,在确定蚁群方向的基础上可进行相干值的增强计算(公式(2)):

$$C_{ij}^e = (1-\rho)C_{ij} + \rho \left(\sum_{k=1}^{n_{AA'}} g(n_{AA'-k}) \cdot \Delta C_{ijk \in AA'} + \Delta C_{BB'} \right) \quad (2)$$

式中, C_{ij}^e 为增强后的相干值, ρ 为增强因子, BB' 和 AA' 分别为脊线方向估计的蚁群方向及其法线方向, ΔC 表示某方向上的相干梯度, g 表示某方向上以 k 为中心的高斯滤波器。

2.2.3. 基于张量方向场的裂缝模拟技术

结构张量表示了区域结构纹理的变化方向和沿变化方向的变化量大小。因而精细的地震地层纹理和断层纹理可以由局部各点的方位信息变化关系来确定(公式(3)):

$$S(p) = \begin{bmatrix} \int w(r)(f_x(p-r))^2 dr & \int w(r)(f_x(p-r)f_y(p-r))dr \\ \int w(r)(f_y(p-r)f_x(p-r))dr & \int w(r)(f_y(p-r))^2 dr \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, f_x 、 f_y 分别表示函数 f 在 x 和 y 方向的偏导数; $w(r)$ 是关于半径 r 的分布函数,是表示窗口内数据的权重函数; $S(p)$ 是关于向量 $p(i, j)$ 的矩阵,即结构张量场。

假定裂缝方向的分布符合高斯分布,通过建立不同方向的裂缝模型,依据模拟窗口内各点的裂缝分布张量场方向构建权值函数,进而对窗口内的裂缝模型进行加权处理,从而实现裂缝模拟。

3. 裂缝模拟技术的应用效果

3.1. 研究区地质概况

HZ 地区(图 2)位于苏北盆地南部, 三维地震勘探面积 300 km², 有页岩油水平井 10 口, 本文目的层为新生界泥页岩层。区内主要发育若干条东西向正断层。页岩厚度大、分布广, 脆性矿物含量高, 油气显示丰富, 页岩油形成条件有利。阜二段页岩储集空间类型多样, 孔缝系统复杂, 储集性较好。本文切片都是在该区域沿目的层提取的。

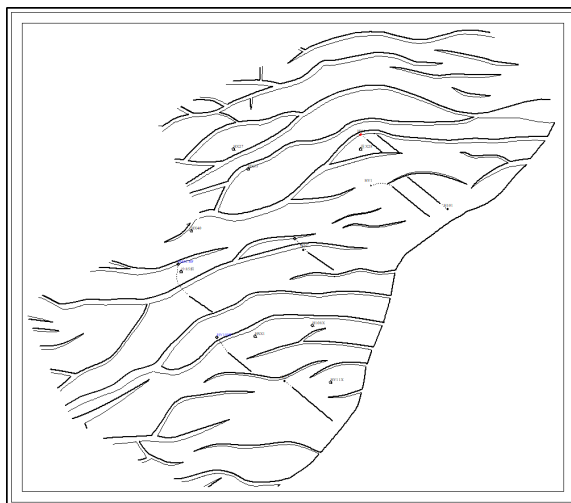


Figure 2. Location of HZ block
图 2. HZ 区块位置

3.2. 裂缝定量预测

裂缝模拟、裂缝密度及方位、裂缝强度共同指示区域裂缝发育特征, 使结果更加直观, 实现了基于叠后地震数据定量表征裂缝的技术目标(图 3~5)。

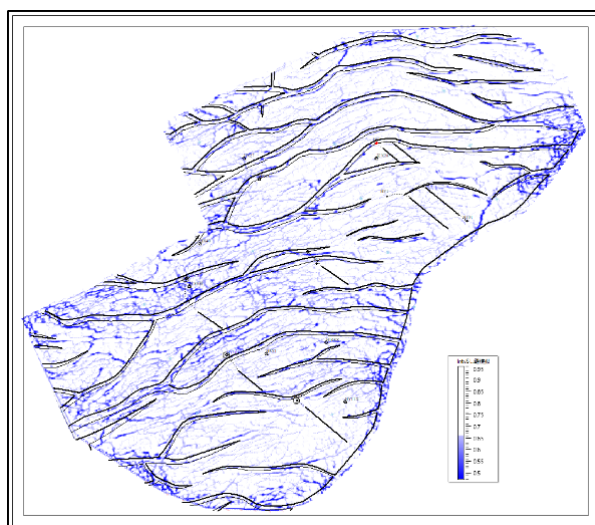


Figure 3. Simulated slice of crack in HZ block
图 3. HZ 区块裂缝模拟切片

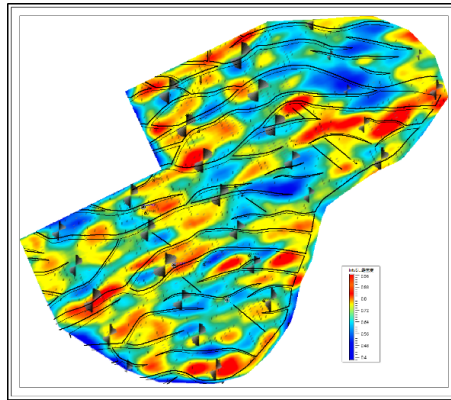


Figure 4. Crack density and orientation slice of HZ block
图 4. HZ 区块裂缝密度与方位切片

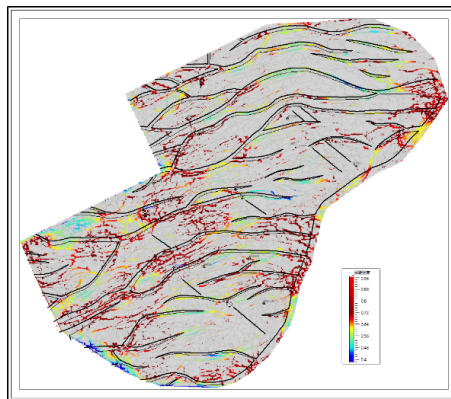


Figure 5. Crack intensity slice in HZ block
图 5. HZ 区块裂缝强度切片

3.3. 裂缝定量预测分析

1) 对比同一层裂缝模拟切片与蚂蚁体切片(图 6)可知, 裂缝模拟方法因综合考虑了应力场方向与岩石破裂准则, 抗噪性更强, 裂缝信息更为聚焦, 内部细节刻画更清晰, 且断层与裂缝发育区界限分明, 在成果切片上表现为深色断层区和浅色裂缝发育区。而蚂蚁体切片则以预测断层为主。

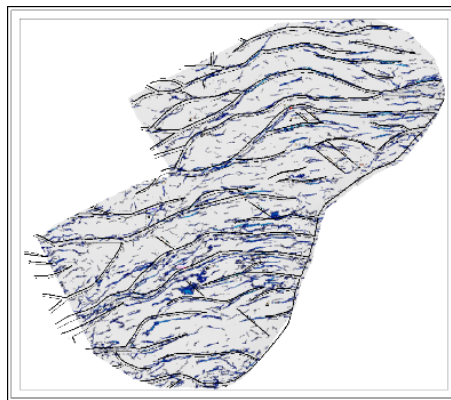


Figure 6. Ant body slices in the HZ block
图 6. HZ 区块蚂蚁体切片

2) 关于裂缝强度切片, 以 GY 凹陷 HZ 地区为例, 暖色调区为裂缝发育区, 断层附近发育大量微裂缝, 且断层组合复杂, 例如 H40C 井区(图 7); 冷色调区为裂缝不发育区, 平面上表现为断层单条存在或断裂组合简单, 例如 HY7 井区(图 8)。相对于蚂蚁体, 裂缝强度结果中新增构造复杂程度、裂缝发育强弱等地质特征, 信息更加丰富。

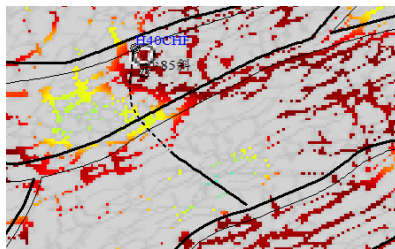


Figure 7. Local map of fracture intensity in the H40C well area
图 7. H40C 井区裂缝强度局部图

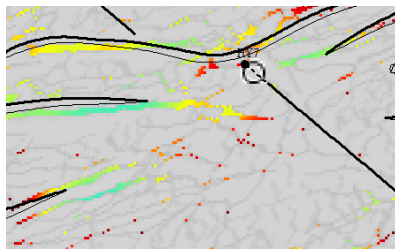


Figure 8. Local map of fracture intensity in the HY7 well area
图 8. HY7 井区裂缝强度局部图

3) 一般认为, 人工裂缝平行于地层最大主应力。因此, 水平井方向应垂直于水平最大主应力方向, 同时兼顾水平段长度要求, 以提高页岩油层稳定连续断块的利用率, 实际部署中采取了方位 130° 左右的布井方式。从预测结果来看, HZ 地区阜二段 IV 亚段裂缝方位与最大主应力方向相一致(图 9), 可为该区页岩油水平井部署及压裂改造提供有效指导。

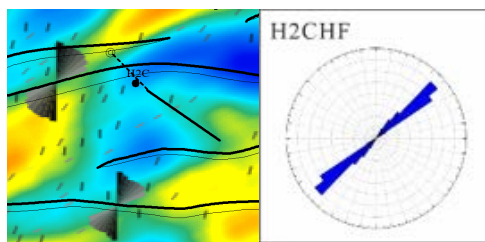


Figure 9. Fracture location map based on H2C earthquake prediction and imaging logging statistics
图 9. H2C 地震预测与成像测井统计裂缝方位图

3.4. 裂缝定量预测成果应用

1) 基于裂缝模拟结果, 开展优势属性融合, 凸显裂缝展布特征(图 10)。根据属性融合切片, 将有利区划分为 1、2、3 三个等级。等级 1, 颜色蓝色, 断裂不发育, 稳定, 保存好, 易高产, 例如 HY7 井区(图 11(a)); 等级 2, 淡粉色, 断裂不发育, 附近存在一定断裂活动影响, 推测存在压力、油气的输送, 页岩油有产能, 但原始地层压力影响, 自喷期产能略低, 例如 H40C 井区(图 11(b)); 等级 3, 深粉色, 底色断裂发育, 不适合水平井实施, 同时可以考虑上下常规储层是否存在构造、岩性圈闭, 形成纵向上常规、

非常规共同富集的复式油藏，例如 H108X 井区(图 11(c))。目前，HZ 地区以水平井 + 直斜井进行展开评价，2024 年实施的水平井 3 口，直斜井 1 口，常非兼探直斜井 1 口，已投产 3 口，1 口正压裂，1 口正扫塞。已投产的 3 口井日产油 75 t。后续将在该地区继续部署水平井 3 口，直斜井 1 口，2024 年 HZ 已控制储量 2043.51 万吨。

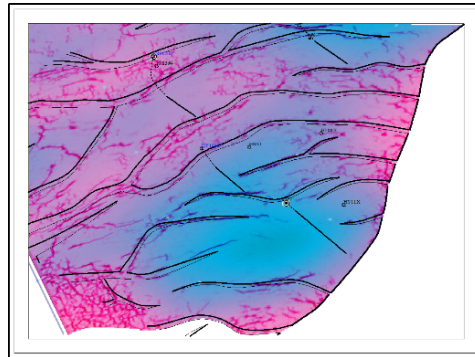
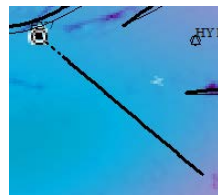
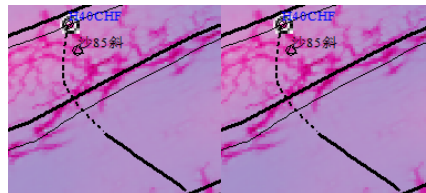


Figure 10. Fractal prediction attribute fusion map of HZ region

图 10. HZ 地区裂缝预测属性融合图



(a) HY7 井区

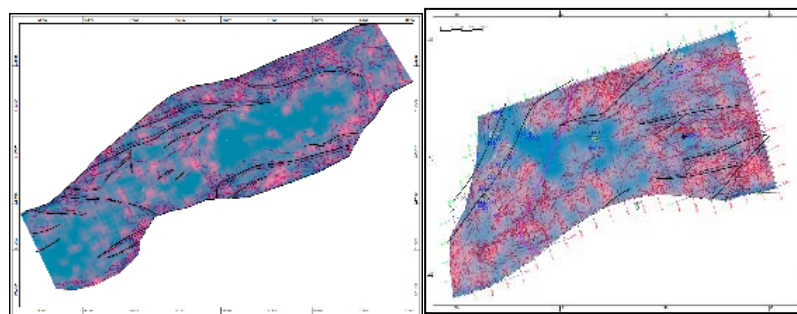


(b) H40C 井区

(c) H108X 井区

Figure 11. Local map of fracture prediction attribute fusion in HZ region

图 11. HZ 地区裂缝预测属性融合局部图



(a) GY 深凹带切片

(b) JHLG 次凹

Figure 12. Fused slice of simulated properties of GY deep concave zone and JHLG sub-concave crack

图 12. GY 深凹带与 JHLG 次凹裂缝模拟属性融合切片

2) 在 GY 深凹带 f4 段(图 12(a))、JHLG 次凹(图 12(b)), 将该项裂缝模拟和分级技术进行推广应用。运用这套方法进行了基于断裂影响的分级评价, 制定针对性定井措施, 推进效益开发。目前, 阜四段水平井和直斜井取得突破, 2024 年已实施 1 口水平井, 实现了深凹带 f4 段页岩油的勘探突破。后续将结合 f4 段 FC 地区构造发育情况, 采用水平井 + 大斜度井 + 直斜井的部署方式, 单层整体部署 6 组水平井及十余口直斜井, 建立立体开发井网, 积极推进区带评价。

4. 结论

1) 叠后地震数据作为石油工业中最常用的数据, 以往的技术方法只能用来定性地描述裂缝发育程度, 难以满足生产的要求。

2) 本文采用了一种基于张量方向场的裂缝模拟定量技术, 实现了利用叠后地震数据进行裂缝定量预测, 大大提高了裂缝预测的精度, 并且可以得到裂缝相对密度和裂缝方向。

3) 该技术应用于苏北盆地 HZ 地区阜宁组页岩地层裂缝模拟, 得到了裂缝相对密度和裂缝发育方向, 通过和实钻井表现的裂缝密度和裂缝发育方向对比, 裂缝模拟结果具有较高的可靠性。

4) 利用叠后地震资料进行裂缝模拟容易受到地震资料本身品质的影响, 如果地震资料信噪比、偏移成像效果、地震数据存在采集脚印等因素可能会对裂缝模拟带来不确定的影响, 如本研究中工区左下角和右上角地震资料品质信噪比较低, 裂缝模拟效果和裂缝密度结果可信度低, 实际应用过程中要注意区别对待。

参考文献

- [1] Loucks, R.G., Reed, R.M., Ruppel, S.C. and Hammes, U. (2012) Spectrum of Pore Types and Networks in Mudrocks and a Descriptive Classification for Matrix-Related Mudrock Pores. *AAPG Bulletin*, **96**, 1071-1098. <https://doi.org/10.1306/08171111061>
- [2] 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.
- [3] 陈彦虎, 胡俊, 蒋龙聪, 等. 利用常规测井曲线定量预测裂缝型孔隙度[J]. 特种油气藏, 2017, 24(6): 7-11.
- [4] 董少群, 曾联波, 等. 储层裂缝随机建模方法研究进展[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(3): 625-641.
- [5] 卢志强, 王力, 杨瑞召, 等. 基于相干的精细断裂刻画技术在顺北地区的应用[J]. 天然气勘探与开发, 2018, 41(3): 20-25.
- [6] 陈彦虎, 杨辉, 赵海山, 等. 基于叠后地震数据的裂缝定量预测技术[C]//中国石油学会石油物探专业委员会, 中国地球物理学会勘探地球物理委员会. 中国石油学会 2019 年物探技术研讨会论文集. 北京: 《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司, 2019: 1168-1170.