



## 基于五维地震数据的深层煤层气微尺度裂缝预测技术研究及应用

张雷 徐凤银 童姜楠 张枫 王峰 侯伟 常益行 侯淦译 裴向兵 曹振义 陈彤 李雪峰 周科 李永洲 甄怀宾 曾文婷

### 引用本文:

张雷, 徐凤银, 童姜楠, 等. 基于五维地震数据的深层煤层气微尺度裂缝预测技术研究及应用[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(3): 187–199.

ZHANG Lei, XU Fengyin, TONG Jiangnan. Research and application of micro-scale fracture prediction technology for deep coalbed methane based on five-dimensional seismic data[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(3): 187–199.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0020>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 沁水盆地横岭区块深部煤层气地震相控反演及有利区预测

Seismic facies controlled inversion of deep coalbed methane in Hengling block of Qinshui Basin and favorable area prediction  
煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 181–191 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0482>

#### 基于多参数融合的煤层气富集区预测方法

Prediction method of coalbed methane enrichment area based on multi parameter fusion  
煤炭科学技术. 2024, 52(S2): 114–120 <https://doi.org/10.12438/cst.2022-1624>

#### 深部煤储层孔裂隙结构对煤层气赋存的影响

Influence of deep coal pore and fracture structure on occurrence of coalbed methane: a case study of Daning-Jixian Block in eastern margin of Ordos Basin  
煤炭科学技术. 2024, 52(8): 106–123 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1334>

#### 基于各向异性高分辨地震处理的煤层顶板含水性风险评价

Evaluation of coal seam roof water-bearing risk area via anisotropic high-resolution seismic processing  
煤炭科学技术. 2024, 52(S1): 192–200 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0376>

#### 屯兰区块煤层气井压裂特征多尺度分析

Multi-scale analysis of fracturing characteristics of coalbed methane wells in Tunlan Block  
煤炭科学技术. 2024, 52(3): 148–158 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0433>

#### 滇东恩洪区块地应力分布及深部煤层气临界深度预测

Distribution of in-situ stress and prediction of critical depth for deep coalbed methane in Enhong Block of eastern Yunnan region  
煤炭科学技术. 2020, 48(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/03f7fe63-9426-422b-8eb7-c0e5d7e3e4d5>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

张 雷,徐凤银,童姜楠,等. 基于三维地震数据的深层煤层气微尺度裂缝预测技术研究及应用[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(3): 187-199.

ZHANG Lei, XU Fengyin, TONG Jiangnan, *et al.* Research and application of micro-scale fracture prediction technology for deep coalbed methane based on five-dimensional seismic data[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(3): 187-199.

## 基于三维地震数据的深层煤层气微尺度裂缝预测 技术研究及应用

张 雷<sup>1,2</sup>,徐凤银<sup>1,3,4</sup>,童姜楠<sup>1,2</sup>,张 枫<sup>5</sup>,王 峰<sup>1,2</sup>,侯 伟<sup>1,2</sup>,常益行<sup>2</sup>,侯淞译<sup>2</sup>,裴向兵<sup>2</sup>,曹振义<sup>2</sup>,  
陈 彤<sup>1,2</sup>,李雪峰<sup>2</sup>,周 科<sup>2</sup>,李永洲<sup>1,2</sup>,甄怀宾<sup>1,2</sup>,曾文婷<sup>2</sup>

(1. 中联煤层气国家工程研究中心有限责任公司, 北京 100095; 2. 中石油煤层气有限责任公司, 北京 100028; 3. 成都理工大学 能源学院(页岩气现代产业学院), 四川 成都 610059; 4. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 四川 成都 610059; 5. 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司, 河北 涿州 072750)

**摘 要:**鄂尔多斯盆地东缘大吉区块深层煤层气规模开发采用水平井+大规模体积压裂的过程中, 在采用相似压裂工艺以及技术参数的条件下, 部分井出现了压裂窜扰现象, 极大地影响了压裂改造和产气效果。前期通过三维地震精细解释发现区块断层不发育, 推测局部微尺度裂缝发育可能是水平井压裂发生窜扰的重要因素。在深层煤层气领域, 以研究区深层8号煤为目的层, 依托研究区“两宽一高”高品质三维地震资料, 通过OVT(Offset Vector Tile)域处理获得了包含时间、空间(三维坐标)、偏移距(或炮检距)和方位角的三维地震数据, 首次采用方位统计法开展了微尺度裂缝发育程度、方位和发育期次等方面的研究。结果表明: 研究区微尺度裂缝整体较为发育, 发育5个规模较大的裂缝带, 南部相比北部微尺度裂缝发育程度更高; 裂缝发育受控于区域2期构造活动, 呈现出2组不同的平面展布方向, 其中燕山期构造活动形成近东西向与北西向裂缝, 喜山期构造活动形成近南北向与北东向裂缝。结合区域不同时期构造应力场、野外露头、成像测井、阵列声波测井等成果资料, 验证了本次裂缝发育程度和方向研究成果的可靠性。应用上述微裂缝预测成果指导了后期研究区水平井压裂方案的优化和实施, 窜扰比例明显下降, 窜扰比例从2023年的14.58%大幅下降为5.23%, 同时经统计2023年投产井平均日产气量为 $6.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 2024年投产井平均日产气量为 $7.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 表明压窜影响显著降低, 开发效果持续向好。该预测方法可为相同地质条件区块深层煤层气微尺度裂缝预测提供重要借鉴。

**关键词:** 大吉区块; 深层8号煤; 煤层气; 微尺度裂缝预测; OVT; 各向异性

中图分类号: TD713

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)03-0187-13

### Research and application of micro-scale fracture prediction technology for deep coalbed methane based on five-dimensional seismic data

ZHANG Lei<sup>1,2</sup>, XU Fengyin<sup>1,3,4</sup>, TONG Jiangnan<sup>1,2</sup>, ZHANG Feng<sup>5</sup>, WANG Feng<sup>1,2</sup>, HOU Wei<sup>1,2</sup>, CHANG Yihang<sup>2</sup>,  
HOU Songyi<sup>2</sup>, PEI Xiangbing<sup>2</sup>, CAO Zhenyi<sup>2</sup>, CHEN Tong<sup>1,2</sup>, LI Xuefeng<sup>2</sup>,  
ZHOU Ke<sup>2</sup>, LI Yongzhou<sup>1,2</sup>, ZHEN Huaibin<sup>1,2</sup>, ZENG Wenting<sup>2</sup>

(1. National Engineering Research of Coalbed Methane Development & Utilization, Beijing 100095, China; 2. PetroChina Coalbed Methane Company Limited, Beijing 100028, China; 3. College of Energy (College of Modern Shale Gas Industry), Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 4. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 5. Research Insti-

收稿日期: 2025-01-16

策划编辑: 常 琛

责任编辑: 钱小静

DOI: 10.12438/cst.2025-0020

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42272156); 中国石油天然气股份有限公司“十四五”攻关性应用性资助项目(2023ZZ18-02)

作者简介: 张 雷(1982—), 男, 内蒙古巴彦淖尔人, 正高级工程师, 博士。E-mail: zhanglei2010@petrochina.com.cn

通讯作者: 童姜楠(1990—), 男, 陕西西安人, 高级工程师, 硕士。E-mail: tongjiangnan@petrochina.com.cn

*tute of PetroChina Oriental Geophysical Company, Zhuozhou 072750, China)*

**Abstract:** During the large-scale development of deep coalbed methane in the Daji block on the eastern edge of Ordos Basin, using horizontal wells combined with large-scale volume fracturing, some wells experienced fracturing interference under similar fracturing techniques and technical parameters, significantly affecting the fracturing transformation and gas production outcomes. Through precise 3D seismic interpretation in the early stage, it was found that faults were not developed in the block, suggesting that the development of local micro-scale fractures might be a significant factor causing fracturing interference in horizontal wells. Focusing on the deep No. 8 coal seam in the study area, we rely on high-quality 3D seismic data characterized by “two wide and one high” features. Through OVT (Offset Vector Tile) domain processing, we obtained five-dimensional seismic data encompassing time, space (3D coordinates), offset (or source-receiver distance), and azimuth. For the first time, we employed azimuthal statistics to investigate the development degree, orientation, and developmental stages of micro-scale fractures. The research findings indicate that micro-scale fractures are generally well-developed in the study area, with five major fracture zones observed, and the degree of micro-scale fracture development is higher in the southern part compared to the northern part. The development of fractures is controlled by two phases of regional tectonic activity, exhibiting two distinct planar distribution directions. Specifically, fractures oriented in the near EW and NW directions were formed during the Yanshanian tectonic activity, while fractures oriented in the near SN and NE directions were formed during the Himalayan tectonic activity. By integrating regional tectonic stress fields from different periods, field outcrops, imaging logging, and array sonic logging data, we verified the reliability of our research findings on the degree and direction of fracture development. Applying these micro-fracture prediction results guided the optimization and implementation of the horizontal well fracturing plan in the study area in later stages, leading to a significant reduction in the interference ratio from 14.58% in 2023 to 5.23%. Meanwhile, statistics show that the average daily gas production for wells put into production in 2023 was  $6.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ , and for wells put into production in 2024, it was  $7.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ , indicating a significant reduction in fracturing interference and a continuous improvement in development effectiveness. This prediction method can provide valuable insights for predicting micro-scale fractures in deep coalbed methane blocks with similar geological conditions.

**Key words:** Daji Block; deep-seated No. 8 coal; coalbed methane; microscale fracture prediction; OVT; anisotropism

## 0 引 言

鄂尔多斯盆地东缘是我国煤层气开发的两大热点地区之一, 2022 年鄂尔多斯盆地东缘大吉区块 2 000 m 以深煤层气试采获得重大突破, 其中吉深 6-7 平 01 井初期日产达  $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 揭开了深层煤岩气规模勘探开发的序幕<sup>[1-2]</sup>。后续开发采用水平井+大规模体积压裂为主体工艺的实施过程中, 在采用相似压裂工艺以及技术参数的条件下, 部分井出现了压裂窜扰现象, 极大地影响了压裂改造和产气效果。前期通过三维地震精细解释发现区块断层不发育, 结合页岩气的开发实践认识<sup>[3-5]</sup>, 推测局部微尺度裂缝发育可能是水平井压裂发生窜扰的重要因素。因此, 笔者拟通过系统开展深层煤层气微尺度裂缝预测工作来指导和优化压裂方案, 从而避免窜扰影响, 以期达到提高开发井成功率的目的。

从裂缝发育的规模来看, MAC BETH 等<sup>[6]</sup>将天然裂缝分成 3 类: 大尺度裂缝 (尺度大于  $\lambda/4$ ,  $\lambda$  为波长)、中尺度天然裂缝 (尺度为  $\lambda/4 \sim \lambda/100$ ) 和小尺度天然裂缝及微裂缝 (尺度远小于  $\lambda/100$ )。目前应用地震资料预测识别各类裂缝的技术方法主要有三大类: 叠后三维地震属性预测技术、多波多分量预测技术以及纵波方位各向异性预测技术<sup>[7]</sup>。利用叠后地震属性, 即利用地震数据体的一阶导数-倾角、二阶导数-曲率以及地震波相邻道相似性-相干体等几何属

性实现地层裂缝刻画<sup>[8]</sup>, 但叠后地震属性只能进行大尺度裂缝的描述<sup>[9]</sup>; 多波多分量预测技术主要利用裂缝储层中的横波分裂现象实现裂缝参数的预测, 但高昂的采集处理成本、纯横波勘探激发较难等问题极大地限制了其推广应用<sup>[10-11]</sup>; 纵波方位各向异性裂缝预测技术主要利用裂缝诱导的纵波速度、振幅、频率等属性在观测方位角域的变化实现裂缝密度、方位、填充物等参数预测。整体来讲, 基于“两宽一高”采集的纵波资料预测裂缝有其独特的优势, 特别是五维地震数据较常规叠后地震数据增加了方位和偏移距维度, 蕴含着更加丰富的储层微尺度裂缝等各向异性信息<sup>[12-13]</sup>, 为各向异性精细表征微尺度裂缝提供了数据基础。

近年来, 基于五维地震数据的微尺度裂缝信息提取得到越来越多的关注, 并在砂岩、页岩、碳酸盐岩等裂缝预测中得到广泛应用<sup>[12-16]</sup>。特别是水力裂缝与天然裂隙相互作用方面, 国内外学者进行了多方面的研究, 指出储层岩体内的天然裂缝是水力压裂形成复杂的缝网结构的基础<sup>[17]</sup>, 裂缝发育强度直接影响压裂裂缝延伸。根据裂缝发育程度, 结合构造、曲率等因素优化压裂射孔方案和压裂施工参数。裂缝发育区通过增加段长, 适当降低压裂规模, 避免压窜; 反之, 缩减段长, 适当加大压裂规模。差异化的水平井压裂工艺对降低压裂成本、减少压裂风险、提高单井产量起到了非常重要



的作用<sup>[18]</sup>。鉴于目前部分深层煤层气水平井在压裂过程出现了窜扰现象,因此天然裂缝预测在深层煤层气水平井压裂工艺优化过程中具有十分重要的作用。

笔者依托区块“两宽一高”高品质三维地震资料,通过 OVT(Offset Vector Tile)域处理首次获得了包含时间、空间(三维坐标)、偏移距(或炮检距)和方位角的五维地震数据,利用该数据首次采用方位统计法开展了研究区深层 8 号煤微尺度裂缝发育程度、方位和发育期次等方面的研究,并结合区块不同时期构造应力场、野外露头、成像测井、阵列声波测井

等成果资料,验证了该方法具有较高的可靠性,研究成果为研究区深层煤层气水平井压裂工艺优化、确保开发井成功率提供了重要支撑。

## 1 研究区概况

### 1.1 构造特征

研究区构造上位于鄂尔多斯盆地东缘的晋西挠褶带南缘与伊陕斜坡东南部,构造位置属于西部缓坡带,断层不发育,主体构造平缓,地层倾角一般小于  $2^{\circ}$ (图 1)。目前勘探开发的深层煤层气主力目的层为太原组 8 号煤,埋深在 2 000 ~ 2 400 m。

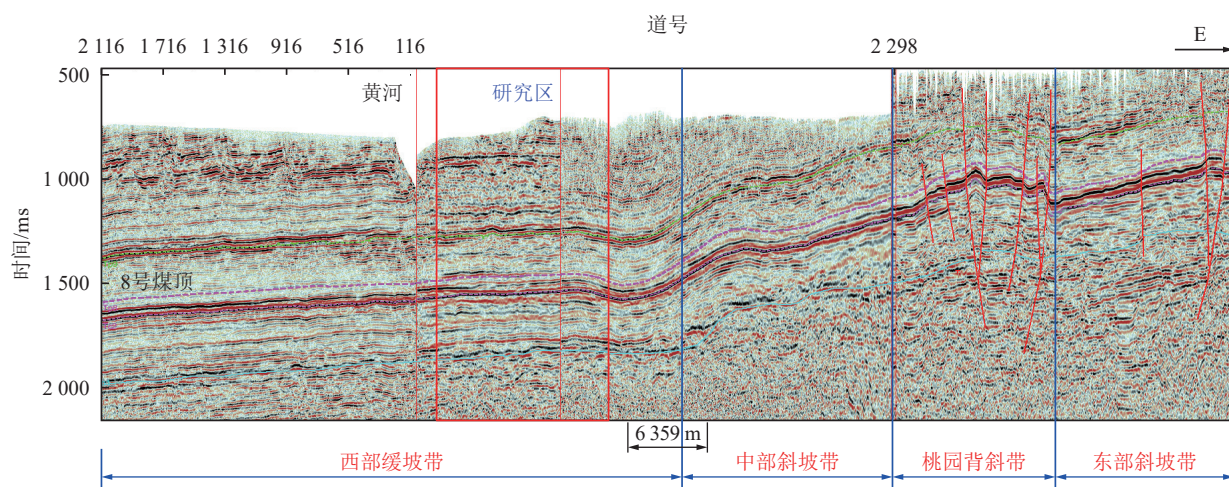


图 1 大吉区块过研究区东西向地震剖面

Fig.1 East-west seismic profile across the study area in the Daji block

### 1.2 储层特征

深层 8 号煤层位于太原组底部,为瀉湖-潮坪沼泽沉积,分布范围广,厚度为 5 ~ 12 m,平均为 7 m,煤层中部发育 1 ~ 2 层泥质夹层,局部有分叉变薄现象(图 2a)。8 号煤顶板为太原组厚层灰岩,厚度为 5 ~ 14 m,底板为厚层泥岩,厚度为 4 ~ 15 m,封盖性好。测井曲线上 8 号煤层表现为低伽马、低密度、低速度的特征。地震合成记录上(图 2b),由于 8 号煤与顶底板之间波阻抗差异较大,而煤层内与泥岩之间波阻抗差异较小,内部反射层较稀少,因此 8 号煤层可形成较好的强波峰连续反射波,地震剖面上(图 1)表现为同相轴横向连续性非常好的波峰反射,易于追踪及定位。

### 1.3 规模开发存在的问题

大吉区块深层煤层气开发已进入规模化生产阶段,采用水平井结合大规模体积压裂技术过程中发现显著区域差异性现象。研究区南部部分水平井实施相似压裂工艺参数时频繁出现压裂窜扰,而北部区域在相同工程条件下则保持良好压裂独立性。压

裂窜扰是指压裂过程中,压裂液和支撑剂在高压下注入地层,新形成的裂缝或激活的天然裂缝意外延伸到邻近井的生产区域,裂缝扩展超出设计范围,与已有井筒(在钻井、已完钻未压裂井、生产井或注水井等)、天然裂缝系统或断层发生连通<sup>[19]</sup>。压裂窜扰引发的工程问题主要表现为以下方面<sup>[20-21]</sup>: ① 诱发支撑剂无效运移与压裂液漏失,造成目标层位改造体积(SRV)显著降低,据统计窜扰工况下储层采收率降幅可达 15% ~ 23%; ② 形成层间窜流通路,破坏原始储层封隔性,导致非目标层位流体侵入生产井筒,典型表现为返排液矿化度异常波动及气油比骤升; ③ 诱发微地震事件丛集,监测数据显示窜扰区域微地震活动性较正常压裂区域增强 2 ~ 3 个数量级,显著提高井筒完整性失效风险; ④ 加剧地层压力扰动传播,相邻井井底压力监测数据常呈现 0.5 ~ 2.0 MPa 的异常波动,导致多井协同开发方案失效; ⑤ 增加环境风险系数,窜扰裂缝可能沟通浅部含水层。总的来说在深层煤层气开发过程中,压裂窜扰的发生极大的影响了水平井的改造和产气效果。三维地震资



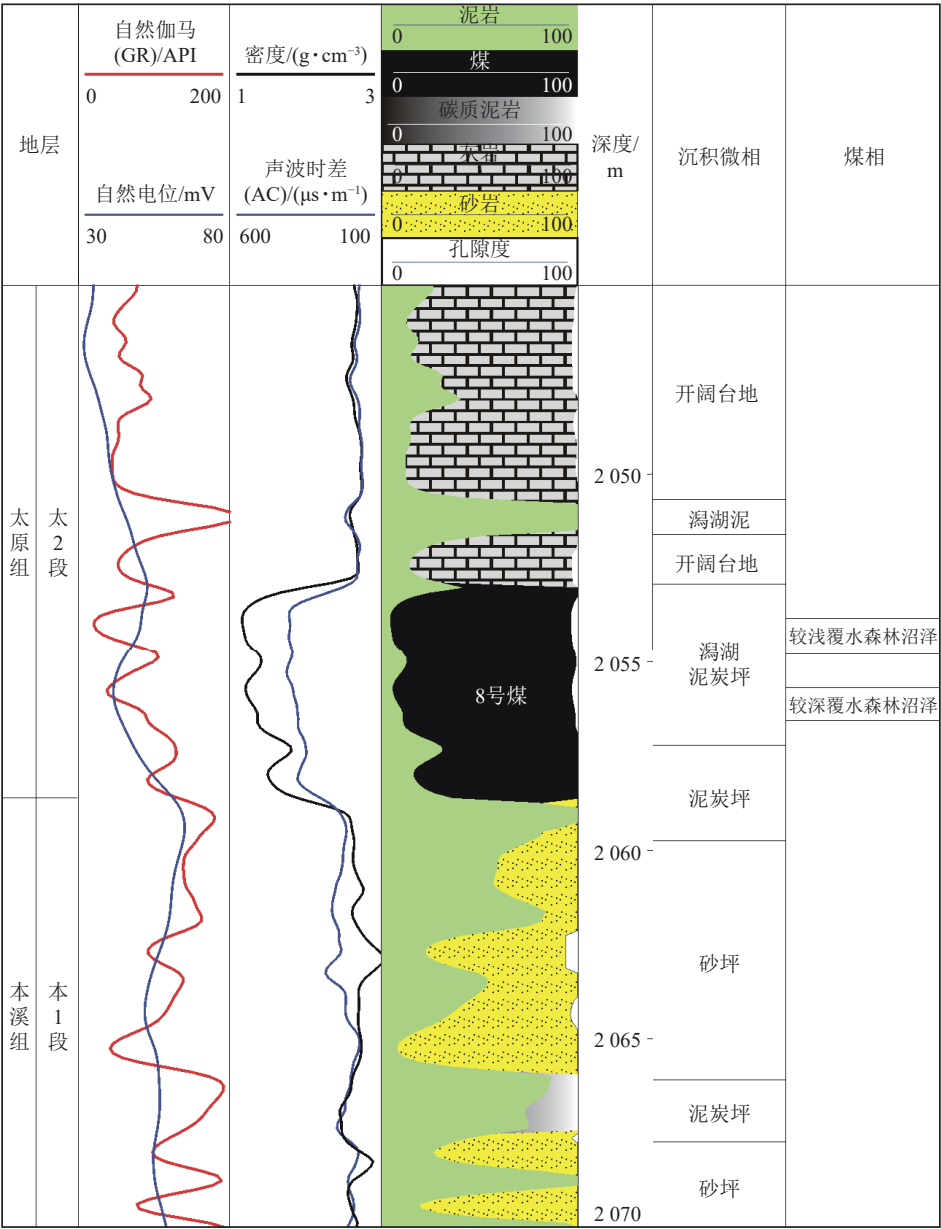
料分析表明区块内断层构造不发育,参照页岩气开发经验,推断微尺度裂缝系统差异是导致区域压裂效果分异的关键地质因素。研究认为南部局部发育的天然裂缝系统可能在压裂缝网扩展中发挥了主导作用。为此建议系统开展深层煤储层微裂缝定量表征研究,建立地质-工程一体化压裂优化设计方法,通过考虑更多地质因素提高压裂方案科学性,进而提升开发井成功率,减少压裂窜扰事件的发生。

2 五维地震数据裂缝预测方法

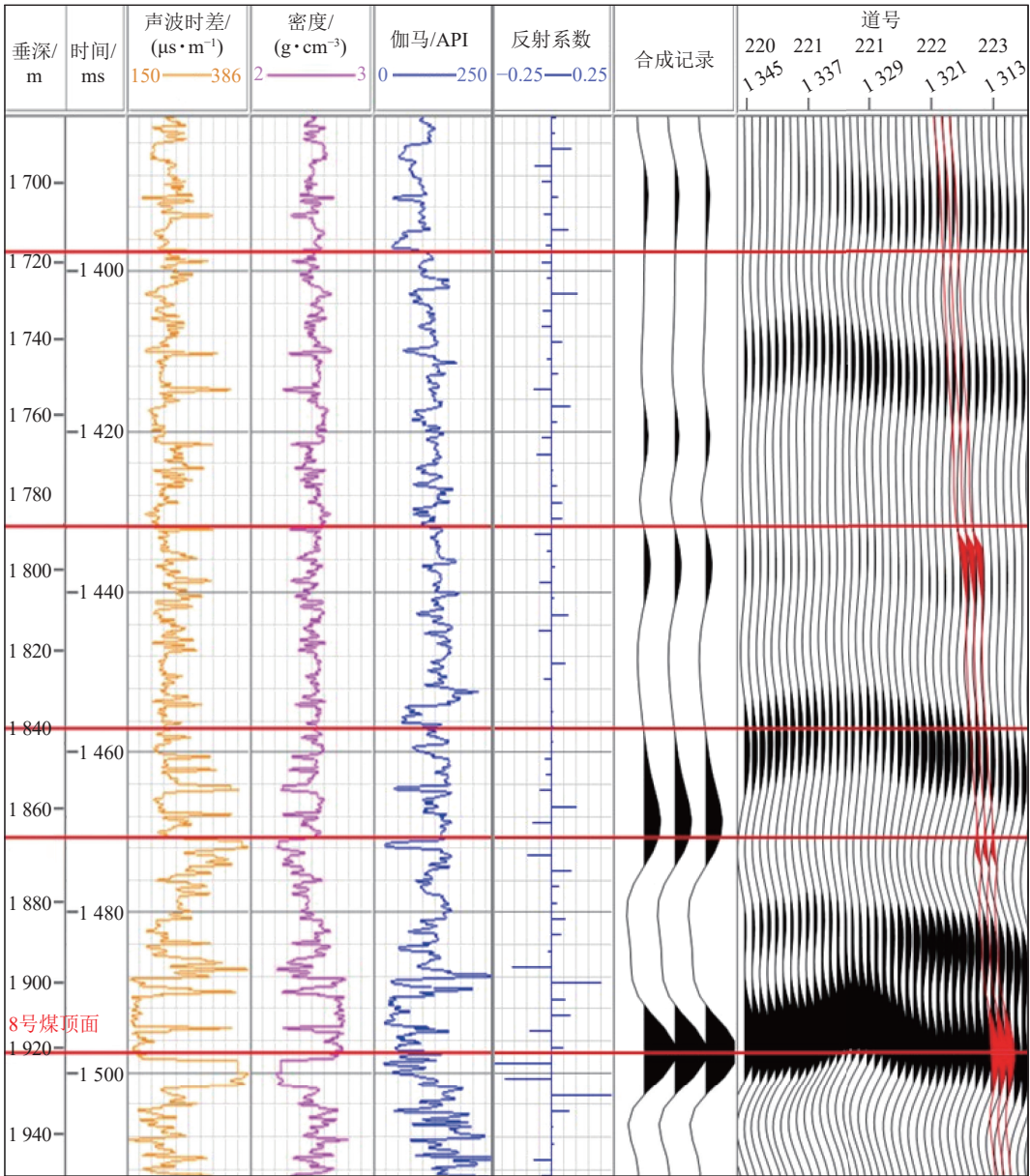
2.1 五维地震裂缝预测原理

五维地震数据是一种集成了时间、空间(三维坐标)、偏移距(或炮检距)和方位角等多个维度的地震

观测数据,它通过宽方位地震观测系统采集,能够全面反映地震波在地下介质中的传播特性。相较于传统地震数据,五维地震数据提供了更高的信息量和更丰富的地质细节,不仅揭示了地下构造的形态和分布,还提供了关于地下介质物理性质的关键信息<sup>[7-8]</sup>。基于方位各向异性原理,即地下介质在不同方位上的物理性质差异,五维地震数据能够捕捉到地震波在不同方位上的传播特性变化,这些变化与地下介质中的裂缝发育密切相关。通过分析地震波在不同方位上的速度、振幅等参数的变化,可以识别出地下介质中的裂缝特征,进而预测微裂缝的分布。利用各向异性敏感因子、AVO 梯度、弹性模量椭圆拟合等方法,从五维地震数据中提取裂缝相关特征



(a) DJ17-1向5井8号煤沉积综合柱状图



(b) DJ17-1向5井井震联合标定

图 2 研究区 DJ17-1 向 5 井 8 号煤沉积综合柱状图及井震联合标定

Fig.2 Comprehensive histogram of sedimentation of No. 8 coal seam in Well DJ17-1 in the study area and joint calibration diagram of well and seismic data

信息,并结合地质、测井等资料,可以验证和优化微裂缝的预测结果<sup>[22]</sup>。在油气勘探等领域,五维地震数据的方位各向异性分析已成为裂缝预测和流体识别的重要手段,为油气勘探和开发提供了科学依据。

利用纵波五维地震数据信息进行裂缝检测是裂缝性储层描述中的重要工作,国内外学者都做了大量的研究,目前五维地震数据各向异性信息进行微尺度裂缝检测的主要方法为基于椭圆拟合的各向异性强度预测法<sup>[23-27]</sup>。SENA<sup>[28]</sup>指出,在方位各向异性介质中,纵波速度随着方位角的变化呈周期性变化,其变化关系具有椭圆的特征。WINKLER<sup>[29]</sup>通

过实验室观察和推导,得出纵波时差在裂缝介质中随方位角变化而周期性变化的结论。STRPHEN<sup>[30]</sup>应用纵波的振幅随方位角和炮检距的变化对裂缝进行了描述。郝守玲等<sup>[31]</sup>针对裂缝对纵波的各向异性特征进行模拟试验,对于 OVT 道集,发现振幅、旅行时或速度等随方位角的变化可以用椭圆方程近似表达为

$$F(\varphi) = A + B\cos 2\varphi \tag{1}$$

式中:  $\varphi$  为观测方位与裂缝的夹角, ( $^{\circ}$ );  $A$  为各向同性振幅、旅行时或速度;  $B$  为振幅、旅行时或速度随

反射角的变化量;当  $\varphi=0^\circ$  时,  $F(0^\circ)=A+B$ , 代表最大响应值, 即为裂缝方向;当  $\varphi=90^\circ$  时,  $F(90^\circ)=A-B$ , 代表最小响应值, 即为垂直裂缝方向。

椭圆拟合法各向异性强度预测, 需要对地震道集进行局部偏移距和方位角的叠加, 对叠加后每道局部偏移距-方位角的道集来提取振幅(即 AVAZ)或其他信息(如频率信息, FVAZ), 然后进行椭圆拟合, 计算长轴、短轴, 根据式(1)得出各向异性强度。虽然椭圆拟合法是微尺度裂缝预测的主要技术, 其方法原理对于只发育一个方向微尺度裂缝的情况是可行的, 但当有多个方位的微尺度裂缝同时发育时, 应用椭圆拟合法就会得到弱各向异性甚至无各向异性的计算结果, 具有较大的局限性。

方位统计法各向异性强度也是基于 AVAZ 的原理, 但与椭圆拟合不同, 基于方位统计的各向异性强度是直接在 OVT 处理数据计算振幅、走时等属性的方差, 不需要进行人为的偏移距-方位角叠加, 而是在 OVT 处理资料中直接来统计振幅或双程旅行时的方差, 该方差为一标量, 方差的大小指示了该点的各向异性强度的强弱, 以偏移距-方位角域数据规则化为基础的方位统计法具有描述多组裂缝的能力, 方位统计法各向异性表征技术统计过程与偏移距无关, 统计结果是唯一的, 克服了椭圆拟合法计算结果受偏移距影响的缺陷。方位统计法计算的各向异性强度属性预测微尺度裂缝的精度明显优于常规属性<sup>[30-32]</sup>。其数学表达式如下:

$$\beta \approx \frac{\pi}{2N} \sum_{i=1}^N \frac{|F(i) - \overline{F(i)}|}{\overline{F(i)}} \quad (2)$$

$$\overline{F(i)} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M F_{i,j} \quad (3)$$

式(2)为计算方差的离散公式, 其中,  $\beta$  为方差;  $N$  为方位角离散样点个数;  $F(i)$  和  $\overline{F(i)}$  为方位及平均值;  $M$  为炮检距离散个数。  $M$ 、 $N$  由炮检距-方位角域内插值确定。

综上所述, 为了更为可靠的预测深层煤层气微尺度裂缝发育情况, 本文采用方位统计法开展基于五维地震数据的深层煤层气微尺度裂缝预测研究工作。

## 2.2 五维地震数据裂缝预测技术流程

充分结合研究区地震、地质特点, 本文基于“两宽一高”高品质三维地震资料, 通过 OVT 域处理获得了包含时间、空间(三维坐标)、偏移距(或炮检距)和方位角的五维地震数据, 运用方位统计法开展

微尺度裂缝发育程度、方位和发育期次等方面的研究, 采用图 3 的技术思路和流程开展研究。



图 3 五维地震数据裂缝预测技术流程

Fig.3 Flowchart of fracture prediction technology using five-dimensional seismic data

1) 首先收集研究区“两宽一高”高品质的, 经过 OVT 域处理获得的包含时间、空间(三维坐标)、偏移距(或炮检距)和方位角的五维地震数据(叠前螺旋道集数据);

2) 其次对叠前螺旋道集数据开展偏移距-方位角域规则化;

3) 之后进行方位各向异性分析, 以明确基于此数据开展裂缝检测的可行性;

4) 之后计算振幅方位各向异性体, 运用方位统计法自适应统计振幅各向异性强度及方向;

5) 最后分析振幅各向异性强度差异及方向, 预测并表征裂缝的发育情况。

## 3 微尺度裂缝预测结果

### 3.1 研究区地震资料基础

研究区 2021 年开展了“两宽一高”三维地震资料采集, 面元  $20 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ , 覆盖次数为 210 次, 扫描频率为  $4 \sim 80 \text{ Hz}$ , 纵横比达到了 0.71, 地震资料频带宽度达  $5 \sim 82 \text{ Hz}$ <sup>[33]</sup>, 特别是“两宽一高”采集的地震数据经过特定的数据容差划分, 可以获得含有特定偏移距和方位角信息的数据片, 这种数据片就是 OVT<sup>[34]</sup>, 进而通过 OVT 域处理得到了包含时间、空间(三维坐标)、偏移距(或炮检距)和方位角等五维地震数据。

本次研究区 OVT 地震资料处理包括 OVT 数据抽取、OVT 数据规则化、OVT 偏移和 OVT 道集处理 4 个步骤, 处理后地震资料的信噪比明显提高, 为微尺度裂缝预测提供了靠实的资料基础。(图 4)。



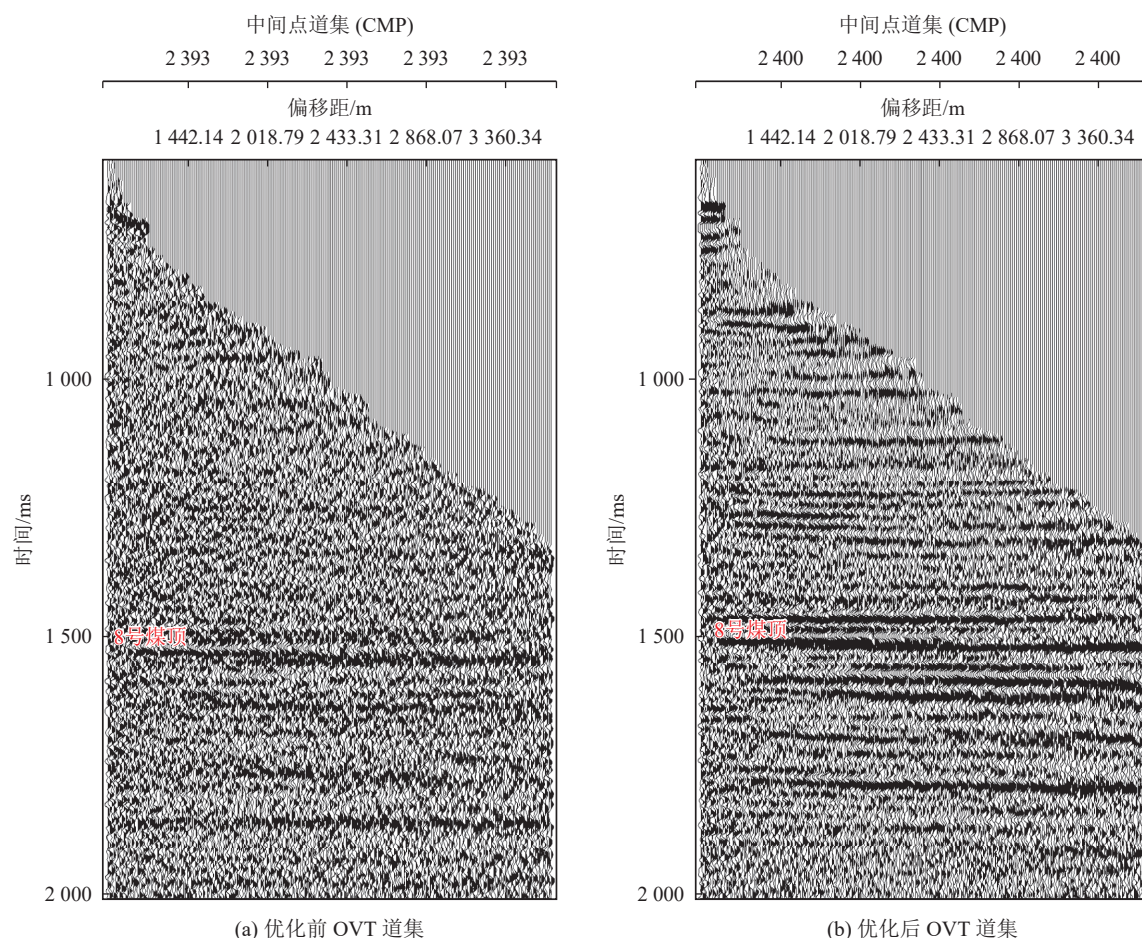


图 4 研究区 OVT 道集优化前后对比

Fig.4 Comparison of OVT trace set optimization before and after in the study area

### 3.2 裂缝预测可行性分析

为了分析裂缝预测可行性,本文基于 OVT 道集上信噪比较高的中-远偏移距时间地震资料,按照偏移距 1 250 m、方位角 $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ ,偏移距 1 750 m、方位角 $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ ,偏移距 2 250 m、方位角 $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ ,偏移距 2 750 m、方位角 $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ ,偏移距 3 250 m、方位角 $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 共 5 组数据进行叠加并组合,形成分偏移距、分方位角的地震时间剖面(图 5a),并统计了分偏移距、分方位角地震时间剖面上 8 号煤顶面的振幅信息(图 5b)。如图 5 所示,相同偏移距、不同方位角时,8 号煤顶面振幅在振幅随着方位角的变化,同时在相同方位角、不同偏移距时,8 号煤顶面振幅表现出振幅随偏移距的增大而减小趋势,因此我们认为研究区 OVT 道集资料具有方位各向异性特征,具备基于五维地震数据开展方位各向异性微尺度裂缝检测的可行性。

### 3.3 裂缝发育程度

本次方位统计法计算得到的方位各向异性强度揭示研究区微尺度裂缝带整体较为发育(图 6a)。为

了进一步精细描述微尺度裂缝带发育程度,通过方位统计法得到的各向异性强度与微尺度裂缝发育程度初步建立了量化的对应关系(图 6a),即各向异性强度 1.0 ~ 2.0(图 6a 中细条状颜色表现为黄-红色)为微尺度裂缝发育带,各向异性强度 0.5 ~ 1.0(图 6a 中细条状颜色表现为蓝色)为微尺度裂缝较发育带,各向异性强度小于 0.5(图 6a 中白色区域)为微尺度裂缝不发育带。总体来看,研究区共发育 5 个规模较大的裂缝发育区带,其中北部发育 1 区、2 区、3 区微裂缝区带,南部发育 4 区、5 区微裂缝区带,南部微裂缝区带发育程度高于北部。

方位统计法微尺度裂缝预测结果与叠后曲率属性预测的褶皱发育区平面展布特征一致性较好(图 6a)。在地震勘探领域,通过处理地震数据获得的叠后曲率属性,能够反映地层在三维空间中的弯曲形态。根据构造力学原理,地层弯曲程度越大,意味着其承受的张应力也越大,而张应力是促使地层裂缝发育的关键因素;当张应力超过地层破裂强度时,将引发地层破裂,形成裂缝<sup>[35-36]</sup>。因此,利用叠

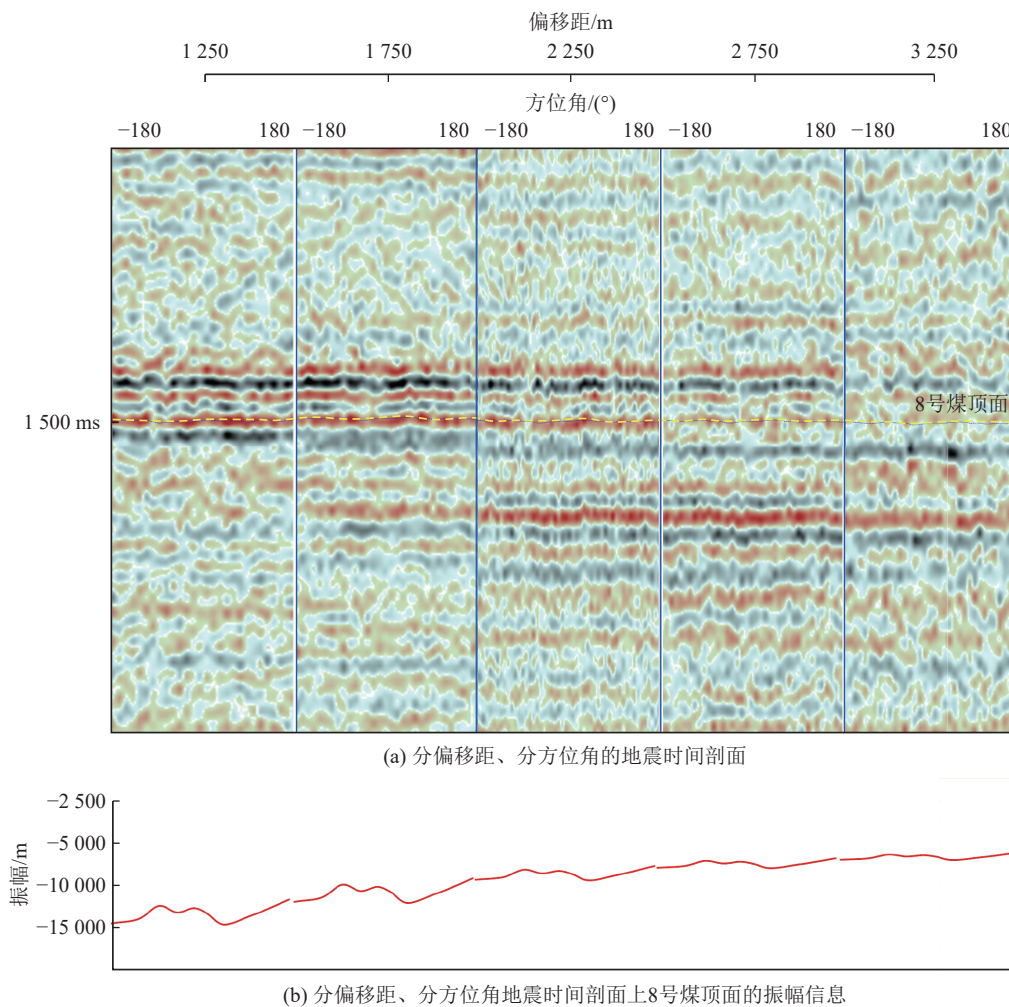


图 5 研究区共偏移距道集剖面

Fig.5 Section of the total offset trace gather in the study area

后曲率属性,可以计算出地层在不同位置的弯曲程度,进而推断出所受张应力的大小,最终预测裂缝的发育程度。研究区叠后曲率属性(图 6a 中红、蓝色粗条状为叠后曲率)在南部与北部表现出较多的高曲率数值响应,反映褶皱较为发育,褶皱的发育情况控制了微裂缝发育。本次研究中,方位统计法预测微裂缝发育情况与曲率属性所揭示的褶皱发育情况吻合度较高,验证了方位统计法在裂缝发育程度预测中的可靠性。同时,在无褶皱发育的区域,方位统计法各向异性强度比曲率属性对微尺度裂缝的响应更敏感,能预测到更多的微尺度裂缝,表明方位统计法的预测精度上有更大的优势。

方位统计法微尺度裂缝预测结果与测井裂缝解释、岩心裂缝解释的微尺度裂缝发育程度具有较好的吻合性。研究区有大量的阵列声波测井资料,阵列声波测井是在完钻井井筒内通过测量快慢横波的差异表征各向异性。三维地震的激发点位于完钻井外,由地震震源向四周纵向传播的震动,通过地震纵

波传播表现出随方位的变化来表征各向异性。本质上,三维地震数据各向异性和测井各向异性都是地层非均质的反映,因此三维地震数据检测的各向异性和横波测井获得的各向异性具有一致性,故可以用横波测井资料对方位统计法预测的各向异性进行对比验证。从对比结果来看,方位统计法与测井各向异性强度的趋势一致。举例来看,测井资料显示 D3-4 井及 D16 井的微尺度裂缝发育, D3-3 井的微尺度裂缝不发育(图 6b),与方位统计法预测微尺度裂缝发育程度一致。岩心作为直接从地下岩层中获取的岩石样本,保留了岩石的原始结构和特征,能够真实反映地下裂缝的发育情况, D3-4 井、DP20 井 8 号煤岩心描述裂隙较发育, DP19 井 8 号煤岩心描述煤体结构好、裂隙不发育,与方位统计法预测微尺度裂缝发育程度一致(图 6c)。

采用方位统计法开展微尺度裂缝发育强度预测的研究结果,与研究区叠后地震属性、阵列声波测井以及岩心描述等能够反映裂缝发育情况的成果资料



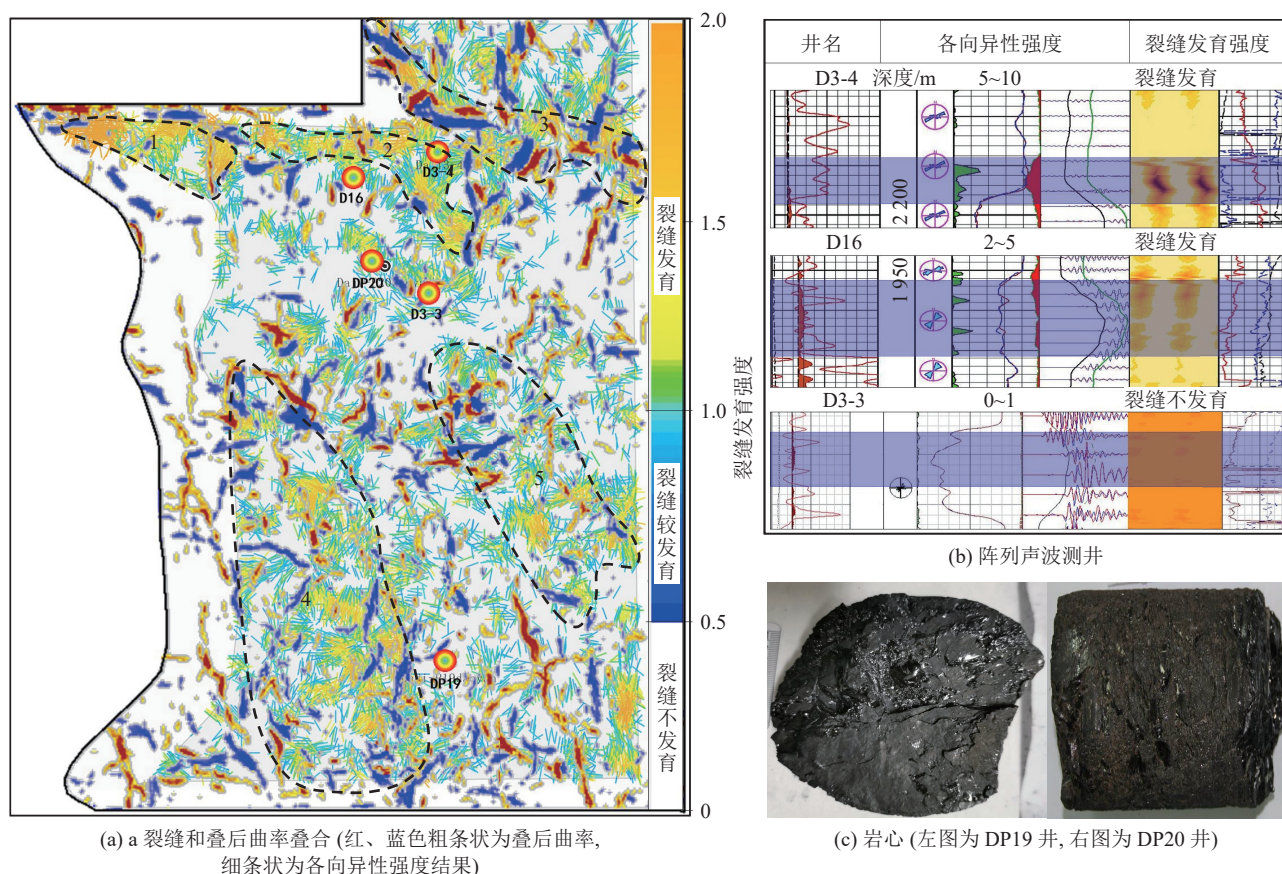


图 6 方位统计法各向异性强度综合分析

Fig.6 Comprehensive analysis diagram of anisotropy intensity using the azimuth statistics method

较为吻合,证明了该方法预测裂缝发育程度具有较高的可靠性。

### 3.4 裂缝方向

前期研究表明,古构造应力与裂缝形成有以下几点认识<sup>[36-39]</sup>:①利用共轭节理的夹角平分线方向,直纵弯褶皱轴面的方向等均可指示最大主压应力方向;②古构造应力决定了地层中裂隙、断裂的产生和发育情况;③对于煤层来讲,古构造应力控制了割理的样式。因此,根据最大主应力方向判断原则:共轭剪切裂缝的锐角即为构造应力场的方向,2套共轭裂缝系统的应力场方向分别为 NWW-SEE 向和 NEE-SSW 向,分别对应和受控于燕山期构造运动和喜山期构造运动(图 7),与盆地东缘整体构造演化认识较为一致,应该说方位统计法对于裂缝方向的预测也是相对可靠的。

研究区方位统计法预测微尺度裂缝发育方向主要为 NW 向占比 46.57%、EW 向占比 20.53%、SN 向占比 11.95%、NE 向占比 20.94%。主要裂缝发育方向与研究区叠后曲率属性表征反映的主要微小褶皱走向 NW 向一致,与野外露头节理裂隙观测<sup>[40]</sup>的 3 组优势方位——近 NW-SE 向(图 8a)、近 EW 向(图 8b)、

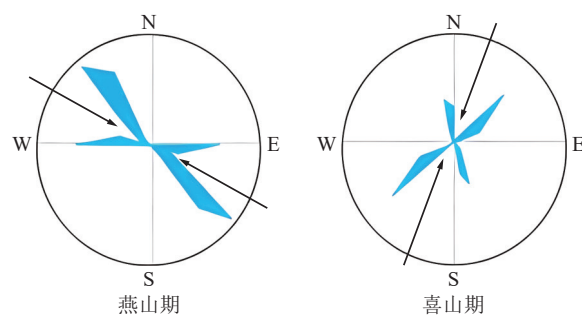


图 7 燕山、喜山期构造缝与最大主应力优势方位系

Fig.7 Diagram illustrating the structural fractures and the dominant orientation of the maximum principal stress during Yanshan and Himalayan periods

近 NEE(图 8c)向基本一致,符合区域构造运动特点。根据野外裂缝系统的交切关系和裂缝方位的配套组合,可将研究区发育的裂缝划分为 2 套共轭裂缝系统,分别为近 EW 向与 NW 向、近 SN 向与 NE 向。

## 4 应用效果

以研究区 JS13-6 井台为例,以叠前裂缝预测成果为主,参考叠后地震属性、构造特征等,明确了该井台裂缝发育情况。结果显示,JS13-6 井台处于南



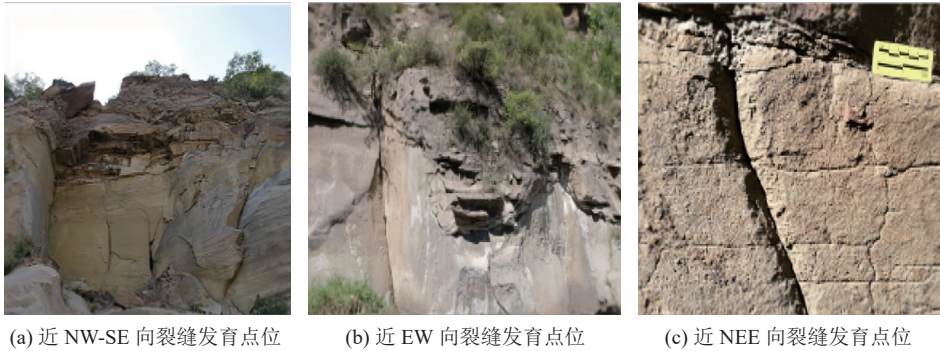


图 8 晋西挠褶带成家庄柳林太原组砂岩野外露头

Fig.8 Field outcrop of Chengjiazhuang and Liulin Taiyuan Formation sandstone in the Jinxi fold belt

部 4 区微裂缝区带, 整体裂缝发育。为提高开发井效果, 根据煤层资源丰度, 结合 JS13-6 井台构造变

形程度(图 9b)、曲率变化(图 9c), 特别是井台水平段天然裂隙发育程度(图 9d), 建立了依据储层地质

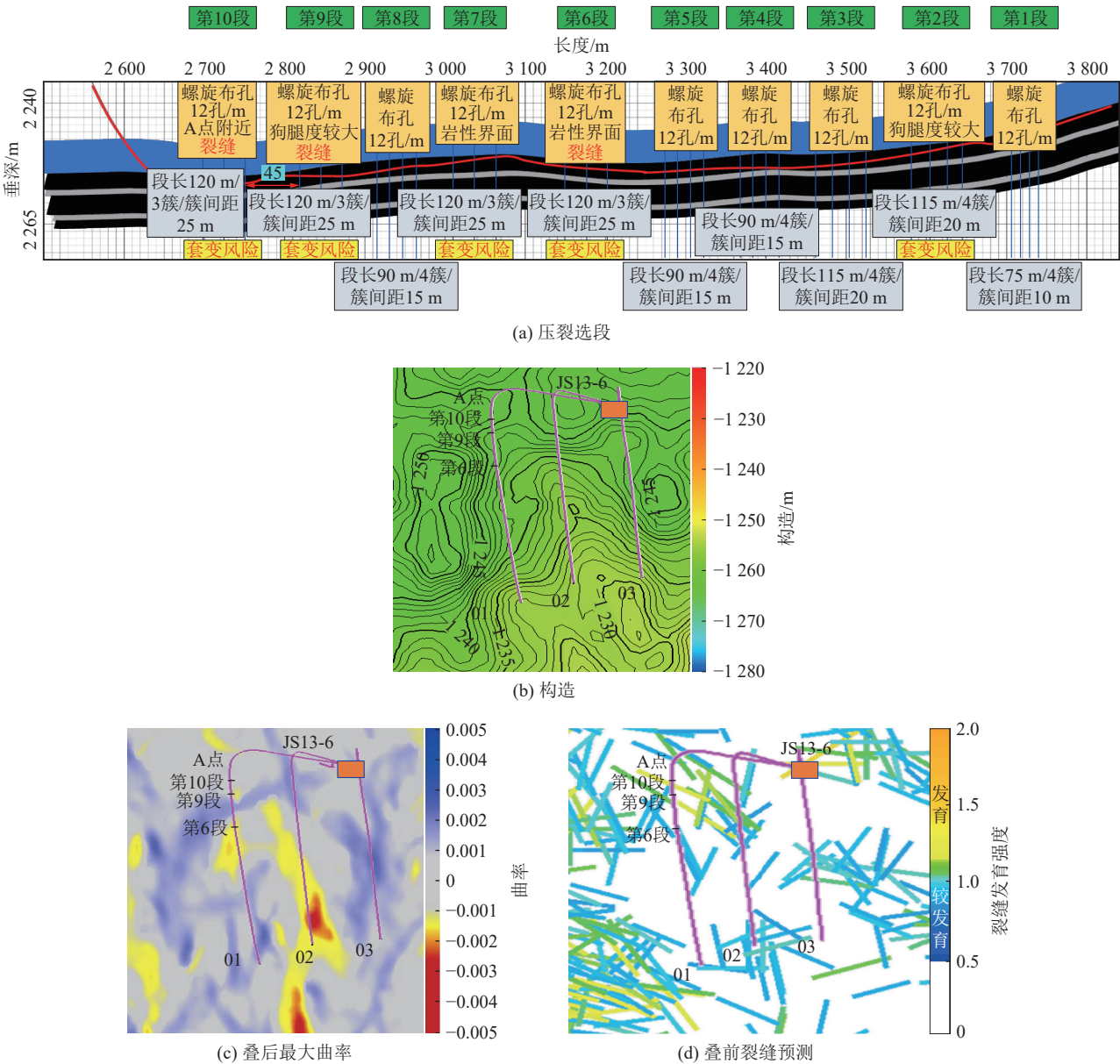


图 9 JS13-6 井台 1 井压裂选段

Fig.9 Comprehensive analysis diagram of cluster selection for fracturing section of Well JS13-6 in wellbay 1

条件的差异化压裂选段方案,即依据裂缝发育程度,确定压裂段长(裂缝发育、增加段长,反之,缩减段长);同时在射孔时避免在微裂缝发育区射孔压裂,导致窜扰发生。以 1 井为例(图 9a),在裂缝较为发育的第 6、9、10 段,增加段长为 115~120 m,其余段保持 90 m,射孔位置避开裂缝发育带。后期 3 口井产量均取得良好效果,其中 1 井最高日产气量达到  $9.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,2 井达到  $9.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,3 井达  $8.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

煤层气水平井单井台一般部署 3~5 口井,井距为 300~400 m,采用拉链压裂的作业模式进行整体压裂。借鉴页岩气压窜动态监测方法,采用同井台井间压力监测的手段进行压窜程度判断,即在压井某一段压裂施工过程中对同井台其余未在施工井进行持续的井口压力监测,监测井若发生明显的施工压力上涨则判断为较高压窜程度。2023 年和 2024 年对正在进行先导试验和 10 亿  $\text{m}^3$  开发项目进行产能建设的大吉 3-7 向 2 储量区共计进行 469 段、2 814 次的同井台井间持续的井口压力监测,其中 2023 年监测 144 段、864 次,发生窜扰的比例达 14.58%,窜扰距离基本在一个井距范围内,偶有跨井窜扰现象,窜扰方向以北东  $70^\circ \sim 100^\circ$  为主;2024 年应用裂缝预测成果,针对天然裂缝发育区采用射孔段避射、施工排量优化、缝网暂堵工艺强化等方式控制压裂窜扰,通过地质工程一体化结合,2024 年监测 325 段、1 950 次,窜扰比例仅为 5.23%,窜扰距离控制在一个井距范围,未有跨井窜扰现象,窜扰方向以北东  $70^\circ \sim 100^\circ$  为主,单窜扰比例较 2023 年降低 9.35%,窜扰比例明显下降。同时压窜影响还表现为压裂井与对生产井的干扰和产量影响,经统计 2023 年投产井平均日产气量为  $6.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,2024 年投产井平均日产气量为  $7.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,表明压窜影响显著降低(图 10),开发效果持续向好。

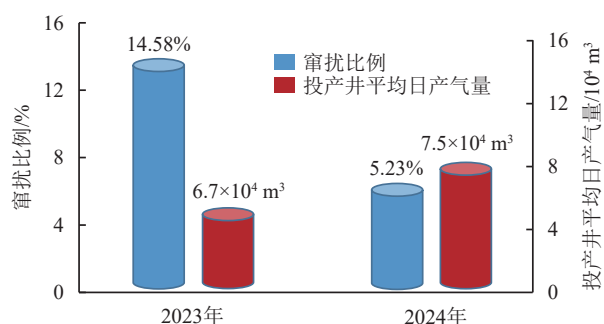


图 10 裂缝预测成果运用前后压窜比例及投产井平均日产气量统计

Fig.10 Statistics on the proportion of pressure breakthroughs and the average daily gas production of production wells before and after the application of fracture prediction results

## 5 结 论

1) 在大吉区块深层煤层气开发区块,基于“两宽一高”高品质三维地震资料,通过 OVT 域处理获得了的包含时间、空间(三维坐标)、偏移距(或炮检距)和方位角的多维地震数据,利用该数据采用方位统计法开展了微尺度裂缝发育程度、方位和发育期次等方面的研究,取得了预期成果。

2) 研究区微尺度裂缝整体较为发育,发育 5 个规模较大的裂缝带,南部相比北部微尺度裂缝发育程度更高。裂缝发育受控于区域两期构造活动,呈现出 2 组不同的平面展布方向,其中燕山期构造活动形成近 EW 向与 NW 向裂缝,喜山期构造活动形成近 SN 向与 NE 向裂缝。结合区域不同时期构造应力场、野外露头、成像测井、阵列声波测井等成果资料验证了本次裂缝发育程度和方向的研究成果具有较高的可靠性。

3) 应用上述微裂缝预测成果指导了后期研究区水平井压裂方案的优化和实施,窜扰比例明显下降,窜扰比例从 2023 年的 14.58% 大幅下降为 5.23%,同时经统计 2023 年投产井平均日产气量为  $6.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,2024 年投产井平均日产气量为  $7.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,表明压窜影响显著降低,开发效果持续向好。该预测方法可为相同地质条件区块深层煤层气微尺度裂缝预测提供重要借鉴。

## 参考文献(References):

- [1] 张雷,边利恒,侯伟,等.深部煤储层孔隙结构特征及其勘探意义:以鄂尔多斯盆地东缘大宁—吉县区块为例[J].石油学报,2023,44(11):1867-1878.  
ZHANG Lei, BIAN Liheng, HOU Wei, et al. Pore structure characteristics of deep coal reservoirs and their exploration significance: a case study of the Daning-Jixian block on the eastern edge of the Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1867-1878.
- [2] 李曙光,王红娜,徐博瑞,等.大宁—吉县区块深层煤层气井酸化压裂产气效果影响因素分析[J].煤田地质与勘探,2022,50(3):165-172.  
LI Shuguang, WANG Hongna, XU Borui, et al. Influencing factors on gas production effect of acid fractured CBM Wells in deep coal seam of Daning-Jixian Block[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 165-172.
- [3] 邹才能,赵群,丛连铸,等.中国页岩气开发进展、潜力及前景[J].天然气工业,2021,41(1):1-14.  
ZOU Caineng, ZHAO Qun, CONG Lianzhu, et al. Development progress, potential and prospect of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 1-14.
- [4] 刘德华,肖佳林,关富佳.页岩气开发技术现状及研究方向[J].石油天然气学报,2011,33(1):119-123,169.

- LIU Dehua, XIAO Jialin, GUAN Fujia. Current situation and research direction of shale gas development[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2011, 33(1): 119–123, 169.
- [5] 董大忠, 邹才能, 杨桦, 等. 中国页岩气勘探开发进展与发展前景[J]. *石油学报*, 2012, 33(S1): 107–114.
- DONG Dazhong, ZOU Caineng, YANG Hua, et al. Progress and prospects of shale gas exploration and development in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(S1): 107–114.
- [6] MACBETH C, LI X Y. AVD: An emerging new marine technology for reservoir characterization: Acquisition and application[J]. *Geophysics*, 1999, 64(4): 1153–1159.
- [7] 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 Xingyao, MA Zhengqian, XIANG Wei, 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.
- [8] 印兴耀, 马正乾, 宗兆云, 等. 地震岩石物理驱动的裂缝预测技术研究现状与进展( II ): 五维地震裂缝预测技术[J]. *石油物探*, 2022, 61(3): 373–391.
- YIN Xingyao, MA Zhengqian, ZONG Zhaoyun, et al. Review of fracture prediction driven by the seismic rock physics theory( II ): Fracture prediction from five-dimensional seismic data[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2022, 61(3): 373–391.
- [9] 刘俊州, 韩磊, 时磊, 等. 致密砂岩储层多尺度裂缝地震预测技术: 以川西 XC 地区为例[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(3): 747–754.
- LIU Junzhou, HAN Lei, SHI Lei, et al. Seismic prediction of tight sandstone reservoir fractures in XC area western Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(3): 747–754.
- [10] 徐丽萍, 杨勤勇. 多波多分量地震技术发展展望[J]. *勘探地球物理进展*, 2002, 25(3): 47–52.
- XU Liping, YANG Qinyong. Development and prospect of multi wave and multi component seismic technology[J]. *Advances in Exploration Geophysics*, 2002, 25(3): 47–52.
- [11] 王光杰, 陈东, 赵爱华, 等. 多波多分量地震探测技术[J]. *地球物理学进展*, 2000, 15(1): 54–60.
- WANG Guangjie, CHEN Dong, ZHAO Aihua, et al. Multi-component seismic exploration[J]. *Progress in Geophysics*, 2000, 15(1): 54–60.
- [12] 杨柳, 沈亚, 管俊亚, 等. 多维数据裂缝检测技术探索及应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2016, 51(S1): 58–63.
- YANG Liu, SHEN Ya, GUAN Junya, et al. Fracture detection based on multi-dimension data[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2016, 51(S1): 58–63.
- [13] 周路, 周江辉, 代瑞雪, 等. OVT 域五维地震属性在双鱼石地区栖霞组裂缝预测中的应用[J]. *地学前缘*, 2023, 30(1): 213–228.
- ZHOU Lu, ZHOU Jianghui, DAI Ruixue, et al. Application of 5-dimensional seismic attributes in OVT domain in fracture prediction of Qixia Formation in shuangyushia area[J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(1): 213–228.
- [14] 陈志刚, 李丰, 王霞, 等. 叠前各向异性强度属性在乍得 Bongor 盆地 P 潜山 裂缝性储层预测中的应用[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(11): 4625–4634.
- CHEN Zhigang, LI Feng, WANG Xia, et al. Application of prestack anisotropic intensity attribute in prediction of P Buried hill fractured reservoir in Bongor Basin, Chad[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(11): 4625–4634.
- [15] XU X Y, WANG W F, LI X S, et al. Sequence control factors and hydrocarbon accumulation pattern of Es3 in Kenxi slope zone of Bohai Bay basin[J]. *Journal of Coastal Research*, 2019, 94: 91–95.
- [16] 戴俊生, 冯阵东, 刘海磊, 等. 几种储层裂缝评价方法的适用条件分析[J]. *地球物理学进展*, 2011, 26(4): 1234–1242.
- DAI Junsheng, FENG Zhendong, LIU Hailei, et al. Analysis for the applicable conditions of several methods of reservoir fracture evaluation[J]. *Progress in Geophysics*, 2011, 26(4): 1234–1242.
- [17] 曾勇, 屈永华, 宋金宝. 煤层裂隙系统及其对煤层气产出的影响[J]. *江苏地质*, 2000, 24(2): 91–94.
- ZENG Yong, QU Yonghua, SONG Jingbao. The coal seam system of fissures and their influence on the occurrence of coal Seams[J]. *Jiangsu Geology*, 2000, 24(2): 91–94.
- [18] 徐凤银, 甄怀宾, 李曙光, 等. 深部煤层气储层改造技术迭代升级历史与发展方向: 以鄂尔多斯盆地东缘大吉区块为例[J/OL]. *煤炭科学技术*, 2025: 1–27[2025–01–23]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2402.TD.20250123.1055.002>.
- XU Fengyin, ZHEN Huaibin, LI Shuguang, et al. History and development direction of iterative upgrading of deep coalbed methane reservoir reconstruction technology: Taking Daji Block in the eastern edge of the Ordos Basin as an example [J/OL]. *Journal of Coal Science and Technology*, 2025: 1–27[2025–01–23]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2402.TD.20250123.1055.002>.
- [19] 巢海燕, 李泽, 甄怀宾, 等. 大宁—吉县区块深部煤层气水平井压裂干扰行为及其机理[J/OL]. *煤炭科学技术*, 2024: 1–16 [2024–12–06]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2402.TD.20241206.1017.00>.
- CHAO Haiyan, LI Ze, ZHEN Huaibin, et al. Interference behavior and mechanism of deep coalbed methane horizontal well fracturing in Daning-Jixian block [J/OL]. *Journal of Coal Science and Technology*, 2024: 1–16 [2024–12–06]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2402.TD.20241206.1017.00>.
- [20] 王文东, 喻文锋, 高攀, 等. 页岩气井间压裂窜扰机理及影响规律[J]. *天然气工业*, 2024, 44(1): 128–138.
- WANG Wendong, YU Wenfeng, GAO Pan, et al. Mechanism and influence law of inter-well fracturing interference in shale gas wells[J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(1): 128–138.
- [21] 段贵府, 牟建业, 闫晓伦, 等. 川南深层页岩气水平井压裂窜扰主控因素及诱导机制[J]. *中国石油勘探*, 2024, 29(3): 146–158.
- DUAN Guifu, MOU Jianye, YAN Xiaolun, et al. Key controlling factors and inducement mechanism of fracture-driven interactions(FDIs) between deep shale gas horizontal wells in southern Sichuan Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2024, 29(3): 146–158.



- [22] 王霞,李丰,张延庆,等. 五维地震数据规则化及其在裂缝表征中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(4): 844–852.  
WANG Xia, LI Feng, ZHANG Yanqing, et al. 5D seismic data regularization and application in fracture characterization[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(4): 844–852.
- [23] 魏欣伟,薛姣,罗霞. 基于 OVT 域地震数据的叠前 AVOA 裂缝密度反演[J]. 石油物探, 2021, 60(5): 816–825.  
WEI Xinwei, XUE Jiao, LUO Xia. Fracture density estimation using an amplitude-versus-offset-and-azimuth inversion based on prestack seismic data in the offset vector tile domain[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2021, 60(5): 816–825.
- [24] 苑书金,于常青. 各向异性介质中的弹性阻抗及其反演[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 520–523.  
YUAN Shujin, YU Changqing. Elastic impedance and seismic inversion in anisotropic media[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(2): 520–523.
- [25] 李爱山,印兴耀,张繁昌,等. VTI 介质中的弹性阻抗与参数提取[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(6): 1878–1885.  
LI Aishan, YIN Xingyao, ZHANG Fanchang, et al. Elastic impedance in VTI media and parameter extraction[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(6): 1878–1885.
- [26] 陈怀震,印兴耀,张金强,等. 基于方位各向异性弹性阻抗的裂缝岩石物理参数反演方法研究[J]. 地球物理学报, 2014, 57(10): 3431–3441.  
CHEN Huaizhen, YIN Xingyao, ZHANG Jinqiang, et al. Seismic inversion for fracture rock physics parameters using azimuthally anisotropic elastic impedance[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(10): 3431–3441.
- [27] 罗辑,吴国忱,宗兆云,等. 基于方位弹性阻抗反演的裂缝型储层流体检测方法[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(6): 1154–1165.  
LUO Ji, WU Guochen, ZONG Zhaoyun, et al. Fluid identification in fractured reservoirs based on azimuthal elastic impedance inversion[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015, 50(6): 1154–1165.
- [28] SENA A G. Seismic traveltime equations for azimuthally anisotropic and isotropic media; Estimation of interval elastic properties[J]. Geophysics, 1991, 56(12): 2090–2101.
- [29] WINKLER K W. Laboratory observations of azimuthal velocity variations caused by borehole stress concentrations[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 1994. Society of Exploration Geophysicists, 1994: 1133–1135.
- [30] SENGUPTA M K. Sensitivity analysis of amplitude versus offset (AVO) method[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 1987. Society of Exploration Geophysicists, 1987: 1679.
- [31] 郝守玲,赵群. 裂缝介质对 P 波方位各向异性特征的影响: 物理模型研究[J]. 勘探地球物理进展, 2004, 27(3): 6.  
HAO Shouling, ZHAO Qun. The effect of fractured medium on P wave azimuthal anisotropy: A Physical model study[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2004, 27(3): 189–194.
- [32] 王霞,张延庆,李丰,等. 方位统计法各向异性表征技术研究[C]//中国石油学会(CPS), 国际勘探地球物理学家学会(SEG). CPS/SEG 北京 2018 国际地球物理会议暨展览电子论文集. 北京: 中国学术期刊(光盘版)电子杂志社, 2018: 154–157.
- [33] 童姜楠,孙雄伟,王峰,等. 智能相控波形指示反演技术及其在煤系地层薄砂岩预测中的应用[J]. 石油物探, 2025, 64(1): 129–137.  
TONG Jiangnan, SUN Xiongwei, WANG Feng, et al. Intelligent phased waveform indication inversion technology and its application in predicting thin sandstone in coal-bearing strata[J]. Petroleum Geophysical Prospecting, 2025, 64(1): 129–137.
- [34] 印兴耀,张洪学,宗兆云. OVT 数据域五维地震资料解释技术研究现状与进展[J]. 石油物探, 2018, 57(2): 155–178.  
YIN Xingyao, ZHANG Hongxue, ZONG Zhaoyun. Research status and progress of 5D seismic data interpretation in OVT domain[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(2): 155–178.
- [35] 周健,陈勉,金衍,等. 压裂中天然裂缝剪切破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S1): 2637–2641.  
ZHOU Jian, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Mechanism study of shearing slippage damage of natural fracture in hydraulic fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 2637–2641.
- [36] 侯振坤,杨春和,王磊,等. 大尺寸真三轴页岩水平井水力压裂物理模拟试验与裂缝延伸规律分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 407–414.  
HOU Zhenkun, YANG Chunhe, WANG Lei, et al. Physical simulation experiment and fracture extension law analysis of hydraulic fracturing in large-scale true triaxial shale horizontal wells[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 407–414.
- [37] 黄沛铭. 库车坳陷博孜-大北区带超深致密砂岩储层裂缝特征与定量预测[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.  
HUANG Peiming. Fracture characteristics and quantitative prediction of ultra-deep tight sandstone reservoirs in the Bozi-Dabei zone of the Kuqa Depression[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [38] 孟庆修. 塔北隆起三道桥古潜山白云岩储层裂缝分布规律与主控因素研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2023.  
MENG Qingxiu. Study on the distribution pattern and main controlling factors of fractures in dolomite reservoirs of the Sandaoqiao Buried Hill in the Tabei Uplift[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2023.
- [39] 李雨桐,杨西燕,范存辉. 富有机质页岩天然裂缝表征研究进展[J]. 石油地质与工程, 2023, 37(1): 32–38.  
LI Yutong, YANG Xiyan, FAN Cunhui. Progress in characterization of natural fractures in organic-rich shale[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2023, 37(1): 32–38.
- [40] 杨秀春,屈争辉,姜波,等. 山西大宁—吉县地区中生代构造特征及其演化[J]. 中国煤炭地质, 2013, 25(5): 1–6.  
YANG Xiuchun, QU Zhenghui, JIANG Bo, et al. Mesozoic-Cenozoic structural features and their evolution in Daning-Jixian area, Shanxi[J]. Coal Geology of China, 2013, 25(5): 1–6.