

# 深部煤层气地震-地质工程一体化导向技术 ——以鄂尔多斯东北缘佳县地区为例

马立民<sup>1,2</sup>, 丛 彭<sup>1</sup>, 张 明<sup>1</sup>, 姚艳斌<sup>2</sup>, 李珮杰<sup>1</sup>, 魏子琛<sup>1</sup>, 张雪琪<sup>1</sup>, 么志强<sup>1</sup>, 林伟强<sup>1</sup>

(1. 中国石油冀东油田分公司, 河北 唐山 063000; 2. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083)

**摘要:** 工厂化大井丛水平井是实现深部煤层气高效开发的关键手段, 然而, 深部煤储层微构造发育、非均质性强等特点导致井眼三维偏移距大、轨迹控制难度高, 极大限制了储层钻遇率。为解决此问题, 本研究以鄂尔多斯盆地东北缘佳县地区深8<sup>#</sup>煤层(埋深为1 950~2 550 m)为例, 考虑储层微构造、非均质性等特征及地震-地质资料条件, 提出了一种以地震-地质三维一体化建模与迭代更新、钻井轨迹预判与实时优化调整为核心的地震-地质工程一体化导向技术。该技术主要流程为: 开展储层系统高精度三维建模, 精细描述储层空间展布, 优化井位部署; 入靶前实时跟踪随钻测—录—定动态, 标志层逐层对比, 迭代更新三维模型, 优选合适井斜角实现精准着陆; 入靶后通过差异化轨迹控制策略、钻头定位、三维产状约束、近钻头方位伽马验判产状, 控制水平段精细轨迹。佳县地区先导试验区8口井实钻结果显示, 煤层钻遇率提升至98.3%。该技术的成功应用为深部煤层气规模效益开发提供借鉴。

**关键词:** 深部煤层气; 地震-地质工程一体化; 导向钻井; 三维建模

**中图分类号:** TE 38 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2025)01-0138-11

## Integrated seismic-geological engineering approach for deep coalbed methane development: A case study of the Jiaxian Block, northeastern margin of the Ordos Basin

MA Limin<sup>1,2</sup>, CONG Peng<sup>1</sup>, ZHANG Ming<sup>1</sup>, YAO Yanbin<sup>2</sup>, LI Peijie<sup>1</sup>, WEI Zichen<sup>1</sup>,  
ZHANG Xueqi<sup>1</sup>, YAO Zhiqiang<sup>1</sup>, LIN Weiqiang<sup>1</sup>

(1. PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan, Hebei 063000, China;

2. School of Energy Resource, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** Industrialized large-cluster horizontal wells have become a critical approach for the efficient development of deep coalbed methane (CBM) reservoirs. However, the inherent challenges posed by complex microstructures and strong heterogeneity in deep coal reservoirs result in significant three-dimensional wellbore displacement and difficulties in trajectory control, which severely limit the reservoir drilling encounter rates. To address these challenges, this study focuses on the No. 8 deep coal reservoir (burial depth of 1 950—2 550 m) in the Jiaxian

收稿日期: 2024-08-19 修回日期: 2024-11-21 DOI: 10.13247/j.cnki.jcumat.2024.0402

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年基金项目(42125205); 中国石油天然气股份有限公司攻关性应用性科技专项项目(2023ZZ18)

通信作者: 姚艳斌(1978—), 男, 河北省邯郸市人, 教授, 博士生导师, 工学博士, 从事非常规油气与碳封存方面的研究。

E-mail: yyb@cugb.edu.cn Tel: 13466390066

引用格式: 马立民, 丛 彭, 张 明, 等. 深部煤层气地震-地质工程一体化导向技术: 以鄂尔多斯东北缘佳县地区为例[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(1): 138-148.

MA Limin, CONG Peng, ZHANG Ming, et al. Integrated seismic-geological engineering approach for deep coalbed methane development: A case study of the Jiaxian Block, northeastern margin of the Ordos Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(1): 138-148.

Block, located in the northeastern margin of the Ordos Basin. A seismic-geological engineering integrated guidance technology is proposed, leveraging high-precision 3D seismic-geological modeling, trajectory prediction, and real-time optimization during drilling. The proposed workflow includes high-precision 3D modeling of the reservoir system to finely characterize its spatial distribution and optimize well placement strategies; real-time tracking and dynamic updates of measurement—logging—positioning data during drilling, enabling layer-by-layer comparison of marker beds, iterative 3D model refinement, and the selection of optimal wellbore inclination angles to ensure accurate target landing; and post-target-entry fine trajectory control in the horizontal section using differential trajectory strategies, drill bit positioning, three-dimensional attitude constraints, and near-bit gamma-ray orientation logging. The application of this integrated guidance technology in a pilot test of eight wells within the Jiaxian Block resulted in a significant improvement, with the drilling rate of coal seams increasing to 98.3%. These results demonstrate the potential of the seismic-geological engineering integrated guidance technology to address key challenges in the development of deep CBM reservoirs, offering a scalable and efficient solution for industrial applications.

**Key words:** deep coalbed methane; integrated seismic-geological engineering; guided drilling; 3D modeling

近年来,我国深部煤层气开发取得了重大突破,成功打破了传统煤层气增储、上产难的行业瓶颈<sup>[1]</sup>.水平井钻井被认为是实现深部煤层气高效开发的关键技术<sup>[2]</sup>.然而,由于我国深部煤层气勘探开发尚处于起步阶段,复杂地质条件带来的技术挑战亟需解决.尤其是在水平井地质导向技术领域,深部煤储层的微构造发育、非均质性强<sup>[3-4]</sup>等特点导致井眼三维偏移距大、轨迹控制难度高、煤层钻遇率低,严重限制了深部煤层气的高效开发<sup>[5-7]</sup>.

目前,国内外针对浅层煤层气、页岩气和致密砂岩气储层的水平井地质导向技术已取得了显著进展,逐步形成了适用于不同储层类型的高精度导向方法<sup>[8-9]</sup>.例如,基于邻井曲线和地层厚度信息的传统二维导向技术,通过曲线拟合和随钻测井技术实现轨迹调整,已在较为简单的地质条件下广泛应用<sup>[10-11]</sup>.然而,此方法主要适用于构造简单、水平段较短且钻速要求较低的储层条件,对于深部煤储层微构造复杂、非均质性强和地层倾角变化快等特性,传统方法的适用性明显不足.

为应对复杂储层条件下水平井导向技术的瓶颈,近年来多学科融合的一体化地质导向技术逐渐成为研究热点<sup>[12-15]</sup>.该技术通过整合地震、测井、录井及分析化验等多源数据,结合高精度三维地质建模与实时轨迹优化调整,显著提升了复杂储层的靶点预测精度和导向能力.例如,基于三维地震-地质建模的地震约束技术已成功应用于四川

盆地昭通深部页岩气等复杂储层开发,显著提高了储层钻遇率和轨迹精准控制能力,为深部复杂储层的高效开发提供了有力支撑.

鄂尔多斯盆地是我国深部煤层气勘探开发的重要区域.2022年以来,中石油冀东油田在盆地东北缘佳县地区石炭系本溪组深8<sup>#</sup>煤取得了煤层气产量突破<sup>[16]</sup>.该煤层在全区埋深1 950~2 550 m范围之间,具有稳定发育、厚度大(平均厚度为7.1 m)、含气量高等特点,满足采用工厂化大井丛水平井方法开发深部煤层气的基本地质要求.然而,佳县地区深8<sup>#</sup>煤储层微构造发育且非均质性较强,加之采集的三维地震资料品质偏低,多种负面因素叠加对实现水平井地质精准导向带来了极大挑战.

为此,基于佳县地区深8<sup>#</sup>煤储层的复杂地质特征和现有数据基础,本文提出一种以三维地震-地质建模和实时轨迹优化调整为核心的地震-地质工程一体化导向技术.该技术在佳县地区先导试验区进行了应用,显著提高了深部煤储层的钻遇率和轨迹控制精度,同时缩短了钻井周期,提升了开发效率.该技术的成功应用不仅为深部煤层气的规模化高效开发提供了技术保障,也为复杂储层水平井导向技术的发展提供了重要借鉴和启示.

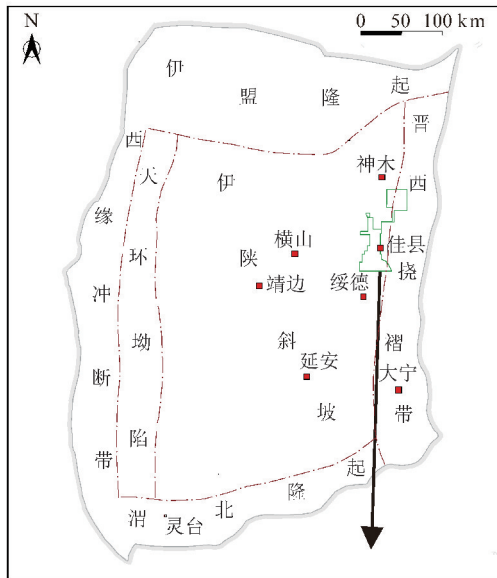
## 1 深部煤层气水平井钻探面临的挑战

### 1.1 储层钻遇率难以保障

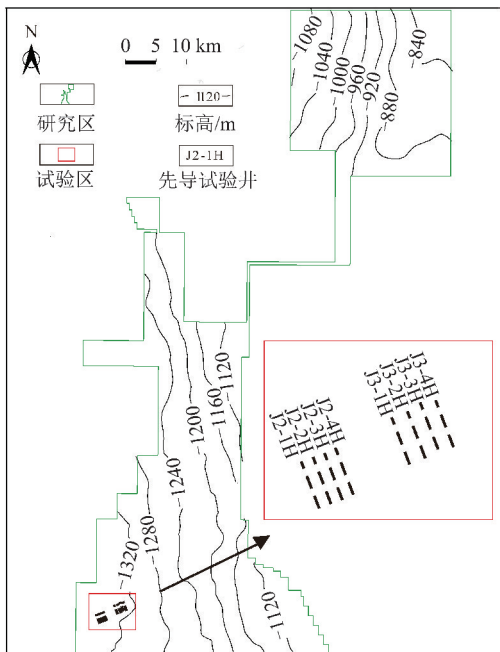
鄂尔多斯盆地与研究区构造及综合地层发育情况如图1所示.佳县地区位于鄂尔多斯盆地伊陕

斜坡东北部(图 1a),构造上为一宽缓斜坡区,地层倾角小于  $2^\circ$ ,断层不发育.整体表现为西倾单斜构造(图 1b),局部凹凸相间的微幅度构造发育,构造幅度介于  $2\sim 20\text{ m}$  之间,且小于  $5\text{ m}$  的微构造普造

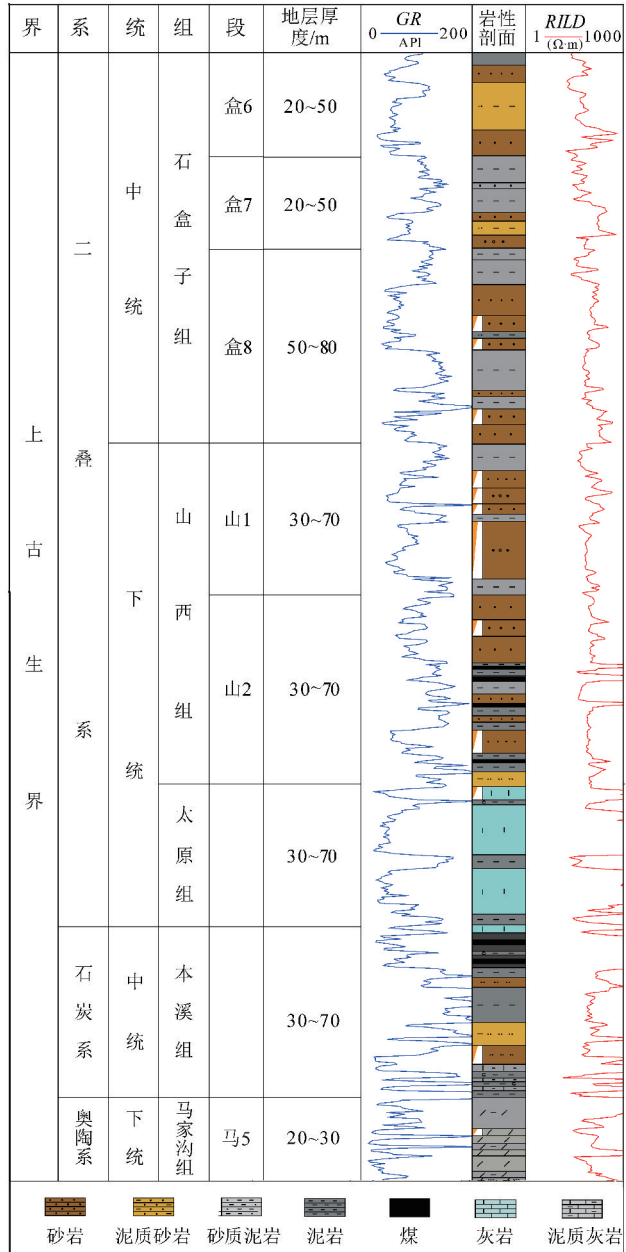
遍发育,地层倾角变化快,导致钻头出层风险高,储层钻遇率难以保障.此外,由于钻井轨迹频繁调整,井轨迹光滑程度差,增加了钻井周期,井壁更易垮塌,加大了地质导向和钻井施工难度.



(a)鄂尔多斯盆地构造纲要图



(b)佳县地区构造等高线图



(c)综合地层柱状图(改自文献[16])

图 1 鄂尔多斯盆地与研究区构造及综合地层柱状图

Fig. 1 Structuralmap of the Ordos Basin and Jiaxian Block, and comprehensive stratigraphic column

### 1.2 地质导向决策存在多解性

佳县地区本溪组深 8# 煤为瀉湖相煤,受海平面升降影响经历了多个短期沉积旋回,在煤层内部普遍发育泥质夹矸(图 1c),反映该时期受气候环境演化影响成煤,泥坪出现沉积间断,受控于局部古地形地貌差异,夹矸厚度和连续性均不固定.

此外,煤层直接顶底板岩性也与夹矸岩性相似,进一步增加了地质导向决策的多解性,给深部煤层优快钻井带来了困难.

### 1.3 地质导向决策及时准确性要求高

从国内现有深部煤层气开发区块来看,水平井产量效益远高于直井,深部煤层水平井水平段

长普遍在 1 000~1 500 m 之间,由于煤层性脆,可钻性强,机械钻进速度普遍在 20 m/h,日进尺达 200~400 m,对导向指令下达的及时性、准确性要求高。

### 1.4 地质导向轨迹设计复杂

出于地面平台受限及“井工厂”高度集约化需求,深部煤层水平井一般采用平台丛式水平井的方式布井,单平台双向部署 6~8 口井,单井水平段间距一般为 350~400 m(图 1b),导致部分井横向偏移距大,井轨迹呈复杂三维曲线形态,大大降低了钻井轨迹的调整余地,增加了地质导向难度。

## 2 地震-地质工程一体化导向技术

针对佳县地区深 8# 煤储层微构造发育、非均质性强等特征,考虑储层地震、地质资料条件,提出了一种以地震-地质三维一体化建模与迭代更新、钻井轨迹预判与实时优化调整为核心的“地震-地质工程一体化导向技术”。该技术工作流程为: 1)地震-地质导向模型建立与迭代,即建立煤储层三维模型,精细描述储层空间展布,优化井位部署; 2)钻井轨迹预判与实时调整优化,即入靶前实时跟踪随钻测—录—一定动态,标志层逐层对比,迭代更新三维模型,优选合适井斜角实现精准着陆; 3)水平段钻进阶段轨迹预判与调整,即入靶后通过差异化轨迹控制策略、钻头定位、三维产状约束、近钻头方位伽马验判产状,控制水平段精细轨迹(图 2)。

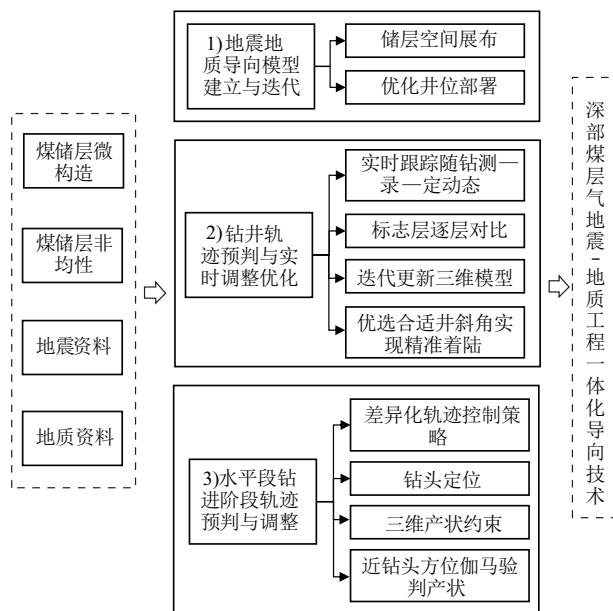


图 2 地震-地质工程一体化导向工作流程  
Fig. 2 Integrated oriented workflow diagram for earthquake geological engineering

### 2.1 地震-地质导向模型建立与迭代

#### 2.1.1 钻前井震联合构造-储层建模

基于佳县地区深 8# 煤地震、地质资料,首先依次建立初始地震速度模型、时深速度模型、地层速度模型,形成高精度的三维速度场<sup>[17]</sup>;然后在三维速度场基础上,通过定义地层的接触关系和断面的交切关系,建立构造模型;最后在构造模型基础上,以煤层测井解释成果为依据进行纵向约束,以高精度相控地质统计学反演约束横向分布,建立井震联合构造-储层模型(图 3)。

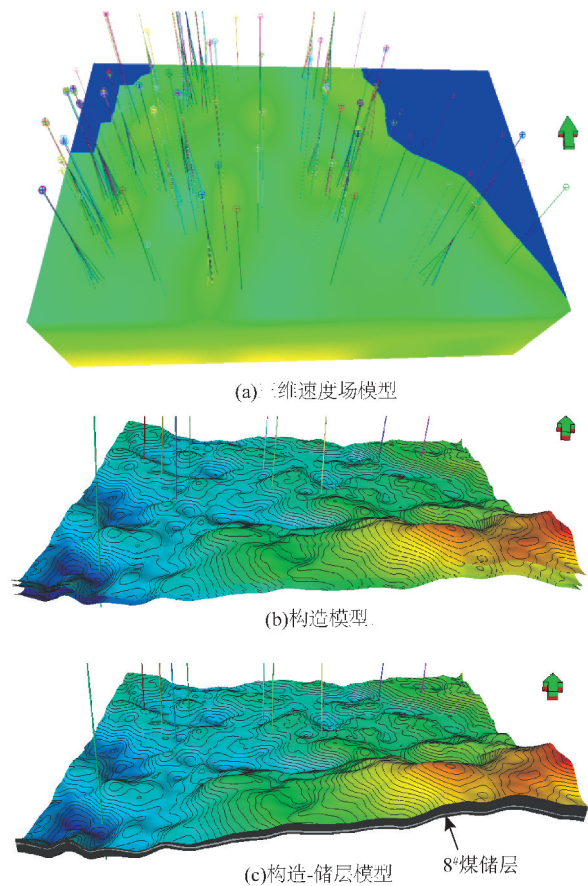


图 3 钻前井震联合构造-储层建模示意  
Fig. 3 Pre-drilling well seismic integrated structural-reservoir modeling diagram

#### 2.1.2 钻中模型迭代更新

在钻井过程中,通过逐层对比标志层,并结合井震数据校正速度模型,使模型逐步逼近地下真实构造;利用近钻头方位伽马随钻测井数据,实时判断地层产状,不断迭代更新三维模型。这种动态优化方法进一步提高了模型的精度,从而实现钻头前方地层变化的精确预测,为三维地质导向提供有力支持。

### 2.1.3 钻后模型更新

水平井完钻后,应利用新钻井获得的煤顶、夹矸等钻遇信息,以及反推得到的煤顶深度等数据,对地震-地质导向模型进行校正.校正后的模型能够生成覆盖井区多水平井的高精度三维模型(见图 4),为后续水平井钻探提供可靠指导.此外,基于该模型,可结合元素录井和气测等随钻数据,深入解释和评价钻遇储层的情况,并结合裂缝预测数据,为后续压裂改造的分段设计与簇点选择提供科学依据<sup>[18]</sup>.

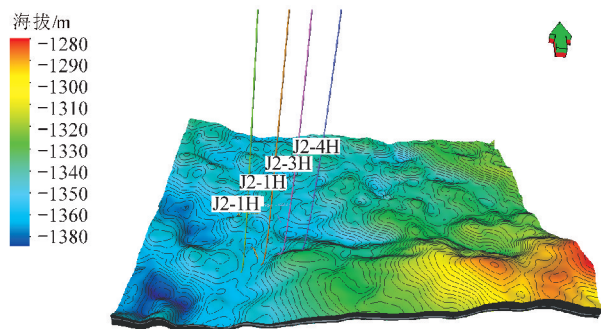


图 4 钻后储层三维模型

Fig. 4 3D Model of reservoir after drilling

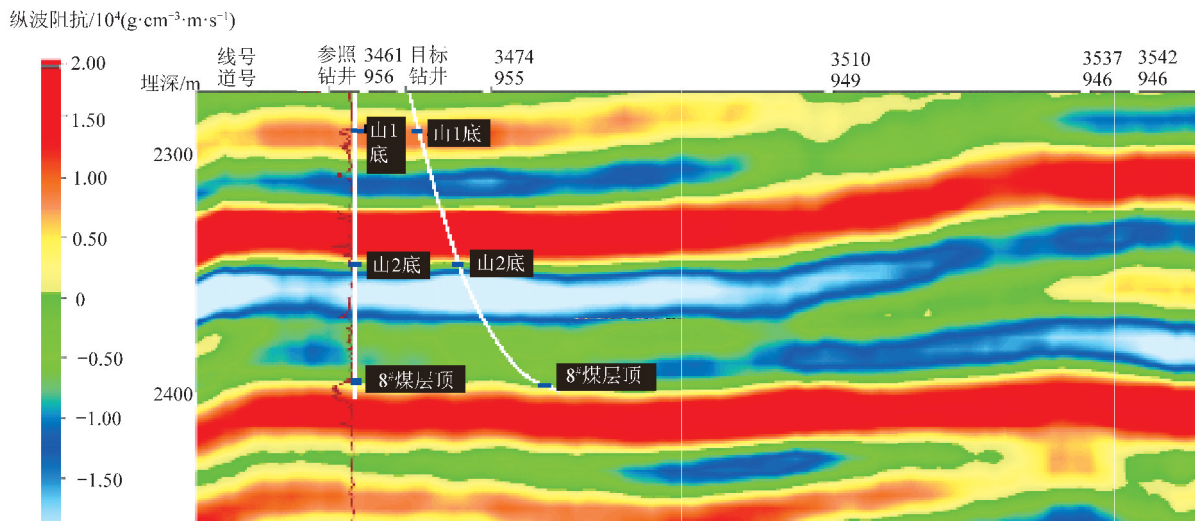


图 5 深度域反演模型标志层逐层对比预测距目的层厚度示意

Fig. 5 Schematic diagram of predicting the thickness of the target layer by comparing the marker layers of the deep domain inversion model layer by layer

### 2.2.3 逐层逼近与井斜匹配

根据钻头距目标层的厚度及位移,将选定的典型标志层作为关键调整节点,逐级控制深度并动态调整井斜角度,实现井斜与目标层产状的匹配(图 6).一般在井斜未达到  $75^\circ$  时,不进行大幅调整.当钻穿斜道段灰岩后,依据毛儿沟段灰岩的实钻厚度优化靶点,并在接近目标层顶煤前的最后标志层(庙沟段灰岩)时精确调整井斜,确保轨迹精准对接目标层.

## 2.2 钻井轨迹预判与实时调整优化

### 2.2.1 入靶阶段轨迹预判与调整

水平井成功高效入靶是确保后续水平段顺利实施的关键,也是水平井施工的核心环节<sup>[19]</sup>.在入靶阶段,轨迹预判与调整的重点包括:标志层的准确对比与目标层的精准预判、逐层逼近目标层以及井斜匹配的动态控制,确保井轨迹与目标层实现高效对接.

### 2.2.2 标志层对比与目的层预判

标志层的选取需结合区域地层沉积特征,以盒 8 段底部砂岩、山西组 5<sup>#</sup> 煤及太原组的 4 套灰岩(东大窑灰岩、斜道灰岩、毛儿沟灰岩、庙沟灰岩)为典型标志层.在标志层的控制下,采用“自上而下倒三角逐层逼近法”迭代更新速度模型,逐步接近地下真实构造.

目的层预判需结合岩性组合、地层厚度、测井及地震响应特征等多种资料,开展邻井对比以明确钻头距目标层的厚度.由于 8<sup>#</sup> 煤上覆太原组为海陆过渡相地层,其地层厚度变化大,重点需参考地震响应特征(图 5).

### 2.2.4 入靶探层井斜角的确定与控制

根据目标层的地层产状优选适合的井斜角.由于目标层厚度普遍较大(平均厚度为 7.1 m),探层井斜角一般与地层夹角保持  $5^\circ$  左右(图 7).若煤层为上倾,探层角度控制在  $85^\circ \sim 86^\circ$  之间;若煤层为下倾,探层角度控制在  $82^\circ \sim 84^\circ$  之间.入层后以 1 根钻杆增斜  $1^\circ$  的造斜率钻进,进入目标层约 3 m 后挑平钻进,以避免快速增斜和局部地层产状变化引起的顶层错钻现象.

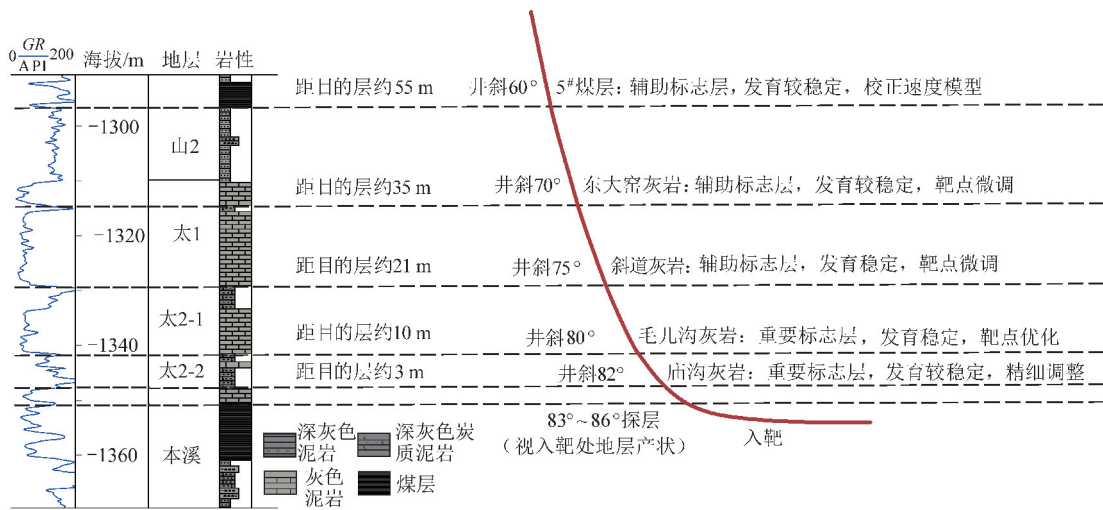


图 6 距目的层厚度与井斜匹配关系

Fig. 6 Matching relationship diagram between thickness of target layer and wellbore inclination

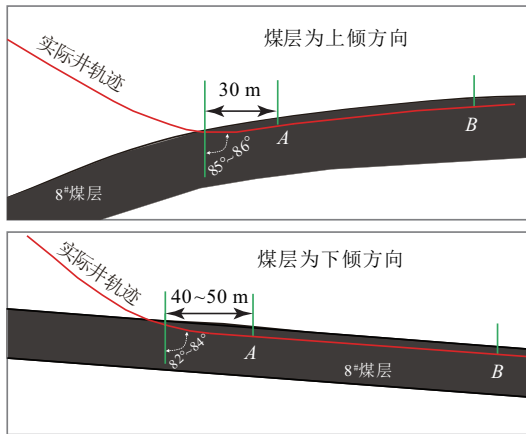


图 7 入靶探层角度优选(A 和 B 为水平段靶点)

Fig. 7 Optimal selection of target exploration angle

### 2.3 水平段钻进阶段轨迹预判与调整

水平段的轨迹控制直接影响井投产后的生产效果<sup>[20]</sup>. 提高水平段煤层钻遇率并保持轨迹平滑, 是地质导向的重点工作. 水平段钻进阶段的轨迹优化要点包括: 针对微构造发育特征制定差异化调整策略、逐段引导钻进并校验实际地层倾角, 以及钻头位置的精准判断与待钻轨迹的实时优化调整.

#### 2.3.1 针对微构造发育特征差异化制定轨迹控制策略

在入靶后, 依据实钻的煤层顶部深度数据, 及时校正目的层地震-地质导向模型. 针对水平段不同的微幅构造变化样式, 优化调整水平段的目标箱型靶体位置, 兼顾煤层钻遇率和轨迹平滑性, 为后期完井、固井及压裂施工提供技术支撑. 在产状变化较快、构造起伏较大的地段, 以煤层为靶体, 高部位靶体设置在煤层中部, 低部位靶体设置在

煤层上部, 确保轨迹平滑并最大化储层钻遇长度; 在产状较为平缓的区域, 靶体统一设置在煤层上部, 以提高煤层钻遇率(图 8).

产状变化	轨迹控制
正→负→正	以煤层为靶体 高部位靶体设置在煤层中部 低部位靶体设置在煤层顶部
产状平缓	瞄准煤层上部黄金靶体 确保水平段煤层钻遇率
负→正	瞄准煤层上部黄金靶体 确保水平段煤层钻遇率

图 8 根据微幅度构造发育特征差异化设计轨迹调整策略

Fig. 8 Design trajectory adjustment strategy based on differentiated developmental characteristics constructed by micro amplitude

#### 2.3.2 三维产状约束逐段引导钻进、实际地层倾角验判

依据地震-地质导向模型明确目标层的产状变化点, 并设置动态控制点逐段引导钻头钻进<sup>[21-22]</sup>. 通过近钻头方位伽马测井数据判断钻头与地层的交切关系, 以验证三维地震预测的准确性, 如图 9 所示. 当井斜与地层产状平行时, 上、下伽马曲线保持平行且伽马值基本不变; 当井斜小于地层产状时, 下伽马曲线先于上伽马曲线发生变化, 伽马成像显示钻头下切地层; 反之, 当井斜大于地层产状时, 上伽马曲线先于下伽马曲线变化, 伽马成像显示钻头上切地层, 如图 10 所示.

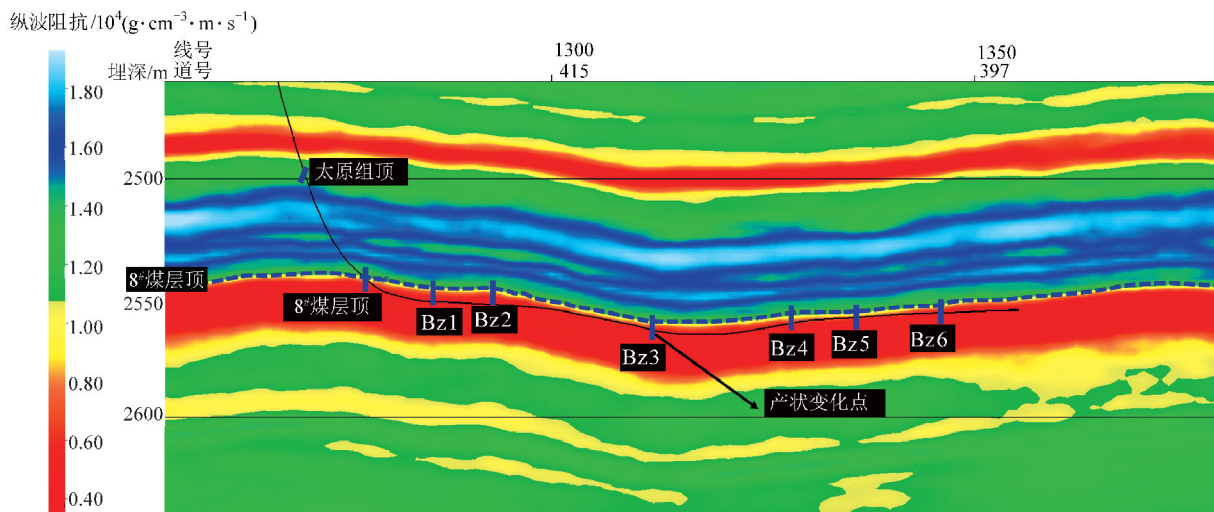


图 9 根据三维产状变化设置动态控制点逐段引导钻进

Fig. 9 Set dynamic control points based on changes in three-dimensional orientation to guide drilling segment by segment

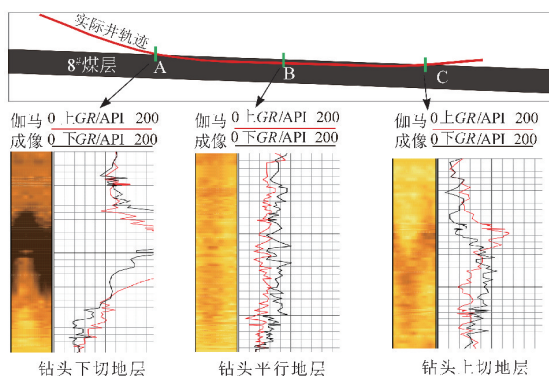


图 10 根据近钻头方位伽马测井资料验判产状

Fig. 10 Identification of occurrence based on gamma logging data near the drill bit orientation

### 2.3.3 钻头位置确定与待钻轨迹优化调整

准确判断钻头位置是优化待钻轨迹的基础。通过综合分析煤层小层划分、钻时、气测、元素录井及近钻头方位伽马数据,精确定位钻头在煤层中的具体位置。如果钻头位置与设计的待钻轨迹靶体位置一致,则沿既定轨迹钻进;若不符,则需结合小层数据构建控制点,反推煤层顶面,修正三维地震模型并重新优化轨迹设计,确保轨迹沿“黑金靶体”最大化钻遇,同时保持轨迹平滑性。本溪组 8# 煤层小层划分情况,如图 11 所示。

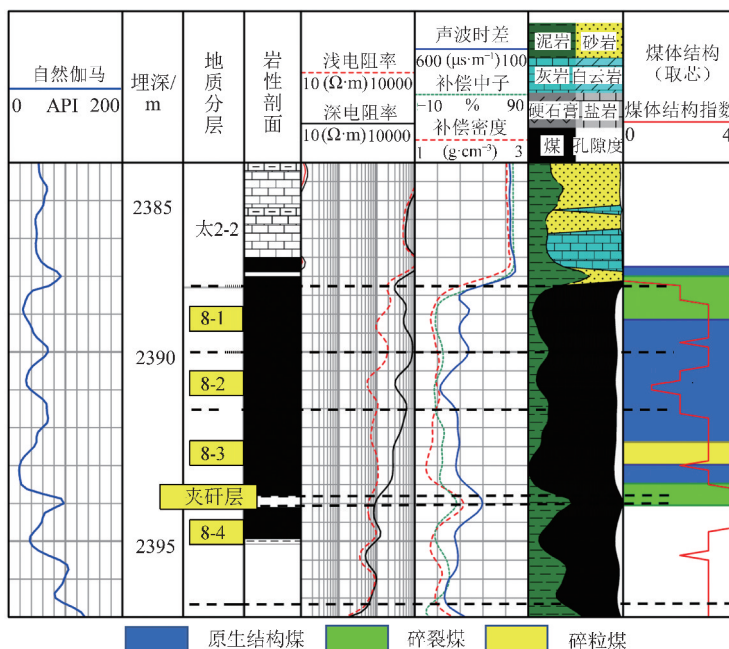


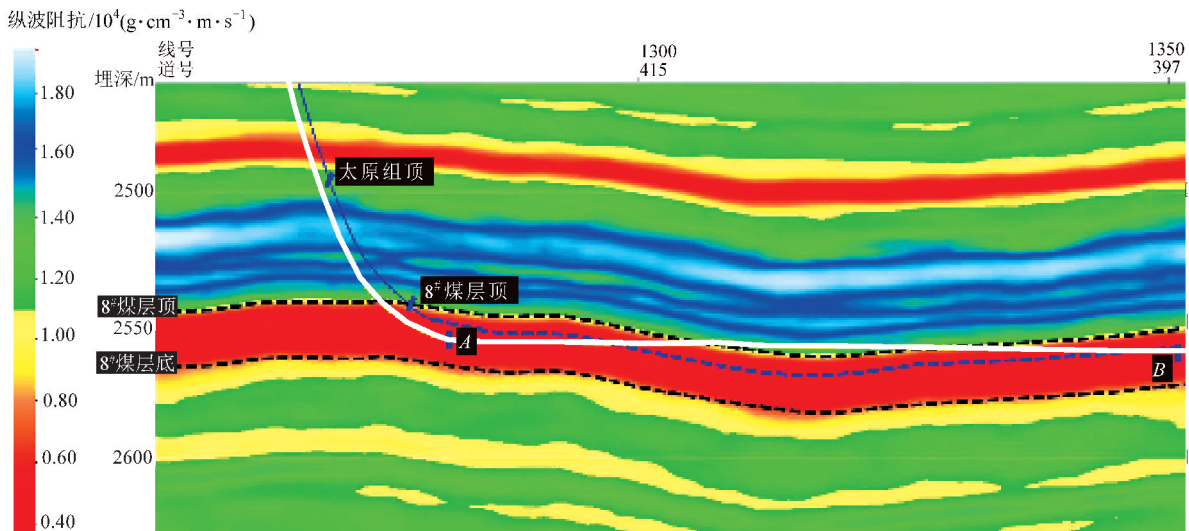
图 11 本溪组 8# 煤层小层划分

Fig. 11 Division of 8# coal and rock layers in Benxi formation

### 3 实践应用

#### 3.1 试验井区地质概况和工程参数

佳县地区深部煤层气先导试验区的8口井分布情况如图1b所示. 该区域煤层埋深为2 400~2 500 m, 煤层净厚度为8~10 m, 局部含夹矸<sup>[16]</sup>. 煤层顶板为厚层深灰色灰岩夹薄层泥岩、煤线, 底板为泥岩和碳质泥岩(图1c). 以佳县地区先导试验井组第4口井J2-4H井为例(图1b), 设计目的层为本溪组8<sup>#</sup>煤层, 靶点垂深为2 492.7 m, 靶前距为590 m, 横向偏移距为500 m, 水平段长1 500 m, 方位角为339°, 完井深度为4 434 m.



注: 白色线为水平井设计轨迹; 蓝色线为优化后的水平井待钻轨迹.

图12 过J2-4H井轨迹剖面

Fig. 12 Cross-section along well J2-4H trajectory

#### 3.3 入靶阶段轨迹预判与调整

根据井口返出的岩屑、钻时及随钻伽马数据, 分析得出J2-4H井在2 634 m处钻穿太原组东大窑灰岩底后, 预测目的层顶提前12 m着陆. 综合地震与随钻数据优化轨迹, 确保在各级控制节点实现井斜匹配. 由于着陆地层倾角下倾2.5°, 优选探层角度为82.0°(角差为5.5°), 最终该井在井深2 800 m、垂深2 481.9 m处实现着陆, 比原设计提前了8.8 m, 着陆井斜角度为82.0°, 实现了高效精准着陆.

#### 3.4 水平段钻进阶段轨迹预判与调整

在水平段钻进过程中, J2-4H井在井深2 908 m处伽马值升至150 API, 结合小层特征判断钻至层内夹矸层. 此时, 三维地震数据显示钻头距顶面4 m, 误差仅为1 m, 数据可靠性较强. 随后继续按轨迹钻进, 在井深3 344 m处伽马值再次升至150

#### 3.2 钻前优化轨迹

通过2口完钻水平井和2口定向井数据, 重构了地震-地质导向模型, 生成过井轨迹剖面, 如图12所示. 该模型为J2-4H井钻前轨迹设计优化提供了重要参考价值. 剖面显示, 设计井的着陆段地层下倾2.0°~3.0°, 水平段中部达到低凹的最低部位, 之后地层上倾1.0°~1.5°, 与初始靶点设计存在较大差异. 更新后的轨迹设计适当增加了靶前位移, 将水平段A靶点上提3 m, 避免了入层井斜较小时可能出现的底层错钻现象. 同时, 新设计综合考虑了地层产状与每30 m造斜率, 大幅降低了施工难度, 提高了轨迹精度.

API, 显示轨迹贴近层顶. 综合岩性、近钻头方位伽马值及气测数据, 判断钻头位于煤层中部.

然而, 此时的三维地震预测未能完全反映地下构造实际, 通过小层数据构建控制点, 反推煤层顶面, 修正三维地震模型并优化待钻轨迹, 引导钻头始终沿“箱型靶体”钻进. 最终, 该井煤层段钻遇长度达到1 634 m, 钻遇率为100%.

#### 3.5 钻探效果与生产情况

佳县地区深部煤层气先导试验水平井钻遇及生产情况统计如表1所示. 结果显示, 通过深部煤层气地震-地质工程一体化导向技术的有效应用, 佳县地区8口先导试验水平井的平均水平段长为1 525 m, 煤层段长为1 499 m, 钻遇率达98.3%. 完井后, 采用“高排量+高强度+复杂缝网+多尺度充填”的水平井分段压裂工艺技术对先导试验井进行储层改造. 以J2-4H井第10段压裂为例, 施工过程中表现

出典型的分阶段压裂特征,如图 13 所示。

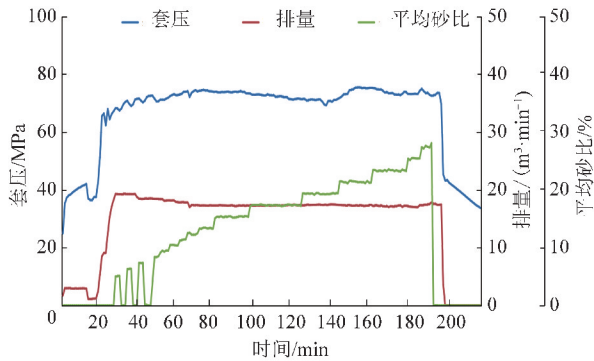


图 13 J2-4H 井第 10 段压裂施工曲线  
Fig. 13 Fracturing construction curve of the 10th section of J2-4H well

第 1 阶段:注入 150 m<sup>3</sup> 前置液,施工套压剧烈波动,表明煤岩割理裂缝发育,逐级激活煤岩破裂。

第 2 阶段:低于 12% 砂比的压裂液注入过程

中,施工套压缓慢上升,表明近井微裂缝逐渐开启并充填。

第 3 阶段:当近井微裂缝充填完毕,主裂缝开始延伸,施工套压下降。

第 4 阶段:重复第 2,3 阶段的过程,逐步构建分支缝网,形成复杂的裂缝系统以充分改造储层。

J2-4H 井排采曲线如图 14 所示。由该图可见,投产后,J2-4H 井产水单相流阶段持续时间短,返排仅 2 d 见气,返排率为 0.17%。气水两相流阶段日产液量最高达 515.6 m<sup>3</sup>,日产气量最高为 10.13 万 m<sup>3</sup>。当前,井口压力稳定在 6~7 MPa,日产气量维持在 6~7 万 m<sup>3</sup>,平均压降速率仅为 0.013 MPa/d,展现出较强的稳产能力。

截至目前,已有 6 口井投产,测试日产气峰值均超过 10 万 m<sup>3</sup>,控压生产下单井日产气量稳定在 5.0~7.0 万 m<sup>3</sup>,充分展现了深部煤层气开发的巨大潜力。

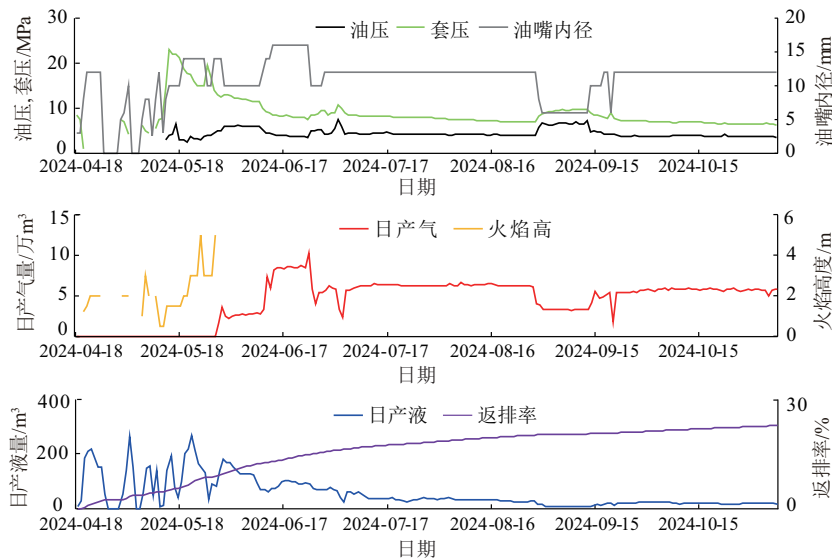


图 14 J2-4H 井排采曲线  
Fig. 14 Production curve of J2-4H well

表 1 佳县地区深部煤层气先导试验水平井钻遇及生产情况统计  
Table 1 Statistical of drilling encounters and production status of horizontal wells for deep coalbed methane pilot test in Jiaxian area

序号	井号	设计水平段长度/m	实钻水平段长度/m	钻遇煤层长度/m	煤层钻遇率/%	高峰日产气/万 m <sup>3</sup>	目前套压/MPa	目前日产气/万 m <sup>3</sup>
1	J2-1H	1 500	1 574	1 574	100.0	11.20	8.41	5.44
2	J2-2H	1 500	1 432	1 307	91.3	10.10	9.21	6.94
3	J2-3H	1 500	1 553	1 484	95.6	10.80	7.51	5.56
4	J2-4H	1 500	1 634	1 634	100.0	10.30	8.01	6.22
5	J3-1H	1 500	1 609	1 603	99.6	10.90	10.11	6.66
6	J3-2H	1 500	1 550	1 550	100.0		正排液	
7	J3-3H	1 500	1 464	1 462	99.9	11.20	11.50	6.42
8	J3-4H	1 500	1 380	1 376	99.7		正排液	
	平均		1 525	1 499	98.3	10.73	9.05	6.20

## 4 结 论

1) 本文提出的地震-地质工程一体化导向技术有效结合了三维地质建模与实时轨迹优化策略, 实现了佳县地区深 8<sup>#</sup> 煤储层微构造发育、非均质性强复杂区域的地质精准导向。

2) 通过精确的井斜控制和迭代建模, 8 口先导试验井的水平段平均长度达到 1 525 m, 煤层平均钻遇率提升至 98.3%, 较传统技术显著优化。

3) 地震-地质工程一体化导向技术适应深部煤储层复杂地质条件, 具有较强推广价值, 为深部煤层气高效开发提供了可靠路径。

### 参考文献:

- [1] 傅雪海, 康俊强, 陈义林, 等. 煤层气有关术语辨析[J/OL]. 中国矿业大学学报, 1-8(2024-06-20)[2024-07-15]. <https://doi.org/10.13247/j.cnki.jcumt.20240106>.
- FU Xuehai, KANG Junqiang, CHEN Yilin, et al. Terminology analysis of coalbed methane [J/OL]. Journal of China University of Mining & Technology, 1-8(2024-06-20)[2024-07-15]. <https://doi.org/10.13247/j.cnki.jcumt.20240106>.
- [2] YANG F, WANG K J, WEN H, et al. Extreme massive hydraulic fracturing in deep coalbed methane horizontal wells: A case study of the Linxing Block, eastern Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(2): 440-452.
- [3] LI S, QIN Y, TANG D Z, et al. A comprehensive review of deep coalbed methane and recent developments in China [J]. International Journal of Coal Geology, 2023, 279: 104369.
- [4] YAO Y B, WANG F, LIU D M, et al. Quantitative characterization of the evolution of in-situ adsorption/free gas in deep coal seams: Insights from NMR fluid detection and geological time simulations [J]. International Journal of Coal Geology, 2024, 285: 104474.
- [5] 徐凤银, 闫霞, 李曙光, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部(层)煤层气勘探开发理论技术难点与对策[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 115-130.
- XU Fengyin, YAN Xia, LI Shuguang, et al. Theoretical and technological difficulties and countermeasures of deep CBM exploration and development in the eastern edge of Ordos Basin [J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 115-130.
- [6] 聂志宏, 徐凤银, 时小松, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气开发先导试验效果与启示[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(2): 1-12.
- NIE Zhihong, XU Fengyin, SHI Xiaosong, et al. Results and implications of pilot experiments for deep coalbed methane development in the eastern margin of the Ordos Basin [J]. Coalfield Geology and Exploration, 2024, 52(2): 1-12.
- [7] 江同文, 熊先钺, 金亦秋. 深部煤层气地质特征与开发对策[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1918-1930.
- JIANG Tongwen, XIONG Xianyue, JIN Yiqiu. Geological characteristics and development strategies of deep coalbed methane [J]. Acta Petroleum Sinica, 2023, 44(11): 1918-1930.
- [8] 王春伟, 杜焕福, 董佑桓, 等. 泌阳凹陷页岩油水平井随钻定测录导一体化模式探索[J]. 断块油气田, 2024, 31(3): 424-431.
- WANG Chunwei, DU Huanfu, DONG Youhuan, et al. Exploration of integrated mode of logging and recording while drilling for shale oil horizontal wells in Biyang depression [J]. Block Oil and Gas Field, 2024, 31(3): 424-431.
- [9] ZHANG S D, HU H, ZHANG Y, et al. Geo-steering technology for horizontal wells in deep karst Dengying reservoirs of the Gaoshiti gas field, central Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2020, 7(3): 234-245.
- [10] 吴宗国, 梁兴, 董健毅, 等. 三维地质导向在地质工程一体化实践中的应用[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(1): 89-98.
- WU Zongguo, LIANG Xing, DONG Jianyi, et al. Application of 3D geological guidance in the practice of geological engineering integration [J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(1): 89-98.
- [11] 费世祥, 杜玉斌, 王一军, 等. 致密砂岩气藏水平井多学科综合导向新技术: 以鄂尔多斯盆地为例[J]. 天然气工业, 2019, 39(12): 58-65.
- FEI Shixiang, DU Yubin, WANG Yijun, et al. Multi-disciplinary comprehensive guidance new technology for horizontal wells in tight sandstone gas reservoirs: Taking the Ordos Basin as an example [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(12): 58-65.
- [12] 杨志会, 赵海波, 黄勇, 等. 地震信息约束的三维建模技术及其在松辽盆地古龙页岩油地质工程一体化中的应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2022, 41(3): 103-111.
- YANG Zhihui, ZHAO Haibo, HUANG Yong, et al. Three dimensional modeling technology constrained by seismic information and its application in the integrated geological engineering of Gulong shale oil in Songliao Basin [J]. Daqing Petroleum Geology and Development, 2022, 41(3): 103-111.

- [13] 胡文瑞. 地质工程一体化是实现复杂油气藏效益勘探开发的必由之路[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(1): 1-5.  
HU Wenrui. Integration of geological engineering is the only way to achieve beneficial exploration and development of complex oil and gas reservoirs[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(1): 1-5.
- [14] 梁兴, 朱斗星, 韩冰, 等. 地震地质工程一体化技术及其在山地页岩气勘探开发中的应用[J]. 天然气工业, 2022, 42(增1): 8-15.  
LIANG Xing, ZHU Douxing, HAN Bing, et al. Integrated seismic geological engineering technology and its application in mountain shale gas exploration and development [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42 (Sup 1): 8-15.
- [15] 申鹏磊, 白建平, 李贵山, 等. 深部煤层气水平井测-录一体化地质导向技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2491-2499.  
SHEN Penglei, BAI Jianping, LI Guishan, et al. Integrated geo-steering technology of logging and orientation in deep coalbed methane horizontal well [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45 (7): 2491-2499.
- [16] 李国永, 姚艳斌, 王辉, 等. 鄂尔多斯盆地神木-佳县区块深部煤层气地质特征及勘探开发潜力[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(2): 70-80.  
LI Guoyong, YAO Yanbin, WANG Hui, et al. Deep coalbed methane resources in the Shenmu-Jiaxian Block, Ordos Basin, China: Geological characteristics and potential for exploration and exploitation [J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(2): 70-80.
- [17] 蔡左花, 庞河清. 变速成图技术在川西新场地区深层海相地层的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(10): 172-173.  
CAI Zuohua, PANG Heqing. Application of variable speed mapping technology in deep marine strata of Xinchang area in western Sichuan [J]. China Petroleum and Chemical Industry Standards and Quality, 2022, 42(10): 172-173.
- [18] 朱斗星, 蒋立伟, 牛卫涛, 等. 页岩气地震地质工程一体化技术的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(增1): 249-255.  
ZHU Douxing, JIANG Liwei, NIU Weitao, et al. Application of integrated technology for shale gas seismic geological engineering [J]. Petroleum Geophysical Exploration, 2018, 53(Sup 1): 249-255.
- [19] 裴素安. 地质导向技术在冀东油田的应用[J]. 天然气勘探与开发, 2006, 29(4): 57-59.  
PEI Su'an. Application of geological guidance technology in Jidong oil field [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2006, 29(4): 57-59.
- [20] 窦松江, 赵平起. 水平井随钻地质导向方法的研究与应用[J]. 海洋石油, 2009, 29(4): 77-82.  
DOU Songjiang, ZHAO Pingqi. Research and application of geological guidance method while drilling horizontal wells [J]. Offshore Oil, 2009, 29 (4): 77-82.
- [21] 梁兴, 徐进宾, 刘成, 等. 昭通国家级页岩气示范区水平井地质工程一体化导向技术应用[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(2): 226-232.  
LIANG Xing, XU Jinbin, LIU Cheng, et al. Application of integrated geological engineering guidance technology for horizontal wells in Zhaotong National Shale Gas Demonstration Zone [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(2): 226-232.
- [22] 郑建雄, 陈希, 姜忠诚, 等. 复杂山地构造对页岩气水平井地震导向的影响规律[J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 105-109.  
ZHENG Jianxiong, CHEN Xi, JIANG Zhongcheng, et al. The influence of complex mountainous structures on seismic guidance of shale gas horizontal wells [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41 (1): 105-109.

(责任编辑 沈春妮 全腾)