

引用格式: 林伟强, 丛彭, 王红, 等. 深层煤层气水平井地质导向技术应用与探讨: 以鄂尔多斯盆地神木气田X区块为例[J]. 油气藏评价与开发, 2025, 15(2): 300-309.
LIN Weiqiang, CONG Peng, WANG Hong, et al. Application and discussion of geological guidance technology for deep coalbed methane horizontal wells: A case study of block X in Shenmu gas field, Ordos Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(2): 300-309.
DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025.02.015

深层煤层气水平井地质导向技术应用与探讨

——以鄂尔多斯盆地神木气田X区块为例

林伟强¹, 丛彭², 王红¹, 魏子琛¹, 杨云天¹, 么志强², 曲丽丽³, 马立民², 王方鲁²

(1. 中国石油冀东油田公司西部勘探开发项目部, 陕西榆林 719000; 2. 中国石油冀东油田公司勘探开发研究院, 河北唐山 063004; 3. 中国石油冀东油田公司南堡油田作业区, 河北唐山 063200)

摘要: 鄂尔多斯盆地深层煤层气资源量丰富, 神木气田X区块是冀东油田在该盆地的重点勘探开发区块, 其深层本溪组8号煤层是该区块的重要建产资源, 主要通过水平井钻探和大规模压裂改造的方式进行生产。本溪组8号煤层局部构造多变, 煤层脆、软, 钻速快, 易坍塌, 水平段轨迹控制难度大, 储层钻遇率难以得到有效保障。因此, 如何提高煤层气水平井的储层钻遇率并实现快速钻井、完井, 成为该领域勘探开发所面临的关键技术难题。基于此开展地质、地震、测井、录井、钻井等多学科技术研究, 形成以精细地震构造解释为前提、以近钻头方位伽马成像分析为核心的深层煤层气水平井地质导向技术, 包括煤层构造精细刻画、煤层特征预测、着陆井轨迹控制、煤层综合判定、水平段地质导向和钻井工程参数控制等多项关键技术。通过这些技术的有效整合与合理运用, 实现了水平井的精准着陆和实时水平轨迹的精细调整。在该区块探评井和先导试验井的地质导向实践中, 水平井地质导向技术已展现出显著效果, 煤层钻遇率由首口风险探井的70.4%提升至目前的平均值94.0%, 此外, 该技术还实现了工程井眼轨迹的光滑顺畅, 确保了下套管和固井施工的顺利实施, 缩短了钻井、完井周期。深层煤层气水平井的高效钻井、完井为后续大规模压裂改造和效益开发生产打下了坚实的资源基础, 对鄂尔多斯盆地其他区块深层煤层气地质导向具有较好的借鉴意义。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 神木气田; 深层煤层气; 8号煤层; 水平井; 地质导向
中图分类号: TE142 **文献标识码:** A

Application and discussion of geological guidance technology for deep coalbed methane horizontal wells: A case study of block X in Shenmu gas field, Ordos Basin

LIN Weiqiang¹, CONG Peng², WANG Hong¹, WEI Zichen¹, YANG Yuntian¹, YAO Zhiqiang², QU Lili³, MA Limin², WANG Fanglu²

(1. Western Exploration and Development Project Department, PetroChina Jidong Oilfield Company, Yulin, Shaanxi 719000, China; 2. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan, Hebei 063004, China; 3. Nanpu Oilfield Operation Area, China Petroleum Jidong Oilfield Company, Tangshan, Hebei 063200, China)

Abstract: The Ordos Basin is rich in deep coalbed methane resources, with block X of the Shenmu gas field being a key exploration and development area for the Jidong Oilfield in the basin. The deep Benxi Formation the 8th coal seam is an important production resource in this block, mainly produced through horizontal well drilling and large-scale fracturing operations. The Benxi Formation the 8th coal seam is characterized by complex local structures, brittle and soft coal layers, fast drilling rates, and a tendency for collapse, making trajectory control of the horizontal section difficult and posing a challenge to achieving a high rate of reservoir drilling encounter. Therefore, improving the high drilling encounter rate of coalbed methane horizontal wells and achieving rapid drilling and completion have become key technical challenges in the exploration and development of this domain. To address these challenges, multidisciplinary technical research, including geology, seismic analysis, logging, mud logging, and drilling, were conducted. This research led to the development of a deep coalbed methane horizontal well geological guidance technology, which included fine seismic structural interpretation as the foundation and near-bit orientation gamma imaging analysis as the core. This technology involved several key aspects: precise coal seam structural characterization, coal seam feature prediction, landing trajectory control, overall coal seam determination, geological guidance for the horizontal section, and

收稿日期: 2024-06-05。

第一作者简介: 林伟强(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事开发地质研究工作。地址: 陕西省榆林市榆阳区金沙路五雷沟村3号商业楼冀东油田西部勘探开发项目部, 邮政编码: 719000。E-mail: 769016781@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金项目“陆相混合沉积不同岩性组合的差异成岩演化与孔隙发育机理”(42172154)。

control of drilling engineering parameters. Through the effective integration and proper application of these technologies, precise well landing and fine-tuning of the horizontal trajectory in real time were achieved. In geological guidance practices in the exploration and pilot test wells of this block, the horizontal well geological guidance technology demonstrated significant results, increasing the coal seam drilling encounter rate from 70.4% in the initial risk exploration well to the current average of 94%. Additionally, this technology ensured smooth and seamless wellbore trajectory, facilitating the successful implementation of casing and cementing operations and shortening the drilling and completion cycle. The efficient drilling and completion of deep coalbed methane horizontal wells have laid a solid resource foundation for subsequent large-scale fracturing and economic production, providing valuable insights for geological guidance in deep coalbed methane exploration in other blocks of the Ordos Basin.

Keywords: Ordos Basin; Shenmu gas field; deep coalbed methane; the 8th coal seam; horizontal well; geological guidance

鄂尔多斯盆地深层煤层气资源量丰富^[1-2],是冀东油田西部探区继致密砂岩气之后的又一重要建产资源。神木气田X区块上古生界发育多套煤层,尤其是本溪组8号煤层全区发育,厚度大、含气性好,具有较大的勘探开发潜力^[3]。目前,本溪组8号煤层勘探开发已经进入探评井快速推进的阶段,主要通过水平钻井及完钻后大规模压裂改造投产的方式实施^[4-10]。8号煤层发育相对稳定,但局部构造多变,且煤层脆、软,钻速快,易坍塌。煤层气水平井的高储层钻遇率和快速完井,是实现煤层气高效勘探和效益建产的基础和前提^[11-12]。

常规砂岩气藏水平井钻进时通常采用随钻测井(LWD)为导向工具,现场以录井地质师进行综合地质分析导向为主,这种导向方式钻井周期长、导向精度和有效储层钻遇率无法得到保障。与常规砂岩气藏相比,煤层钻速快、坍塌周期短、下套管固井施工难度大,常规导向方式对于煤层不再适用,亟须研究更适合煤层的地质导向方式^[13]。针对神木气田X区块深层煤层气水平井部署和钻井、完井等方面存在的地质和工程难点,从煤层顶面构造精细刻画、煤层特征预测、着陆井轨迹控制、煤层综合判定、水平段地质导向和钻井工程参数控制等几方面开展研究,形成了一套较为成熟的综合地质导向技术,提高了煤层钻遇率,取得了良好的地质导向效果,为实现地质储量的有效控制和满足大规模压裂改造投产的要求奠定了基础。

1 区域地质背景

神木气田X区块位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东北部,整体为平缓的大型斜坡区,构造相对稳定,断层不发育,有利于深层煤层气的保存。该区块发育上古生界山西组山二段1—5号煤层,太原组6—7号煤层,本溪组8—9号煤层,其中,本溪组8号煤层厚度大、发育稳定,是进行勘探开发的最主要目的层系。

8号煤层埋深介于1 800~2 550 m,平均为2 245 m,地层压力系数介于0.91~1.10,属于正常压力系统。净煤厚度介于4.0~11.0 m,平均为7.1 m。煤层结构简单,以无夹矸和中部发育1层夹矸为主,夹矸单层厚度介于0.5~1.2 m。煤层宏观煤岩类型以光亮煤为主,煤体结构

以原生结构煤为主。煤层镜质体反射率(R_o)介于1.45%~2.00%,煤层处于中阶,为焦煤-瘦煤,有利于生气。煤层为特低孔、特低渗储层,割理、裂缝发育,有利于气体的产出,平均孔隙度为7.71%,平均渗透率为 $1.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。煤层整体含气性较好,含气量介于20.6~23.5 m³/t,平均为21.9 m³/t,储层含气性纵向来看,顶部优于底部。神木气田X区块面积约为1 090 km²,根据体积法初步估算,8号煤层储量超过 $2 300 \times 10^8 \text{ m}^3$,平均储量丰度约为 $2.1 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,具有较大的勘探开发潜力。

2 水平井地质导向技术

神木气田X区块本溪组8号煤层分布范围广、厚度大、含气性好,直井开发无法充分释放潜能,水平井可以大幅提升煤层气地下储量的开发控制范围,增大后期压裂改造的规模和强度,达到提升单井日产和单井最终可采量的目的,是深层煤层气领域实现少井高效开发最理想的方式。在煤层的范围、厚度和含气性等地质条件已经确定的情况下,煤层钻遇率的高低就成了煤层气水平井开发成败的决定性影响因素。

为了提高神木气田X区块深层煤层气水平井的煤层钻遇率,利用地质、地震、测井、录井和钻井工程等学科综合知识^[14-23],形成了一套完整的适用于神木气田X区块深层煤层气的地质导向技术流程(图1)。

2.1 煤层构造精细刻画

煤层是烃源岩,含气性高,储层发育确定,因此,煤层构造精细刻画就成了水平井部署和地质导向的重中之重。目前,神木气田X区块主要通过三维地震资料和邻井实钻情况来刻画和校正煤层顶面的构造趋势,井控程度低的部分区域,对于三维地震资料的依赖程度就更高。通过三维地震剖面、反演剖面和邻井钻遇信息开展综合分析,预测水平井的煤层入层点、煤层厚度、水平段煤层顶面构造趋势,以此依据设计钻井轨迹;在实钻中根据入层深度、水平段钻头穿行位置和深度等信息不断校正煤层顶面构造,并与设计的构造趋势进行对比,验证三维地震资料预测的准确性。

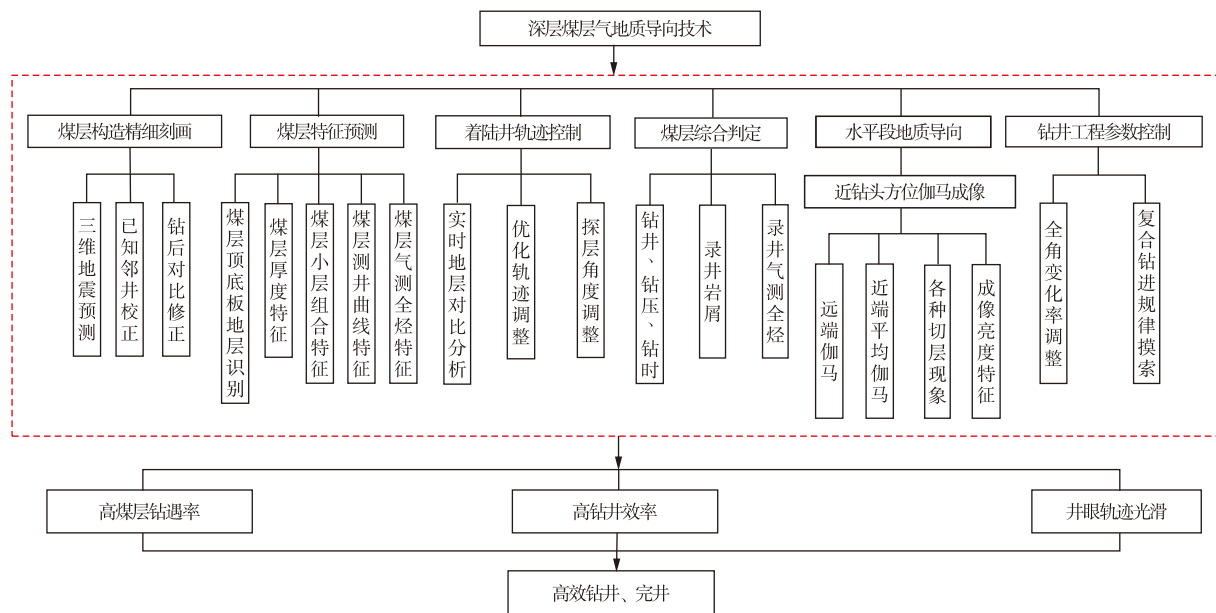


图1 鄂尔多斯盆地神木气田X区块深层煤层气地质导向技术流程

Fig.1 Workflow of geological guidance technology for deep coalbed methane in block X of Shenmu gas field in Ordos Basin

从实钻显示来看,采用井震结合的技术手段预测神木气田X区块整体构造变化趋势较为准确,对深层煤层气的部署和地质导向起了较好的指导作用,但受黄土塬地区地震速度的精准拾取难度大和地震纵向分辨率有限等因素影响,还存在部分井煤层入层深度与地震预测误差较大、局部实钻地层产状与地震构造趋势预测不符、局部实钻地层倾角和变化点与地震预测偏差较大等问题。需要进一步提升地震数据处理和解释的精度,在不同区域优选匹配性较好的地震数据体,并根据实钻资料重新修正地震解释结果,提

升匹配度和统一度,进一步提升构造预测精度。

2.2 煤层特征预测

在水平井着陆前,要对邻井的8号煤层进行特征差异分析,包括煤层顶底板地层组合、煤层厚度、煤层小层组合、煤层测井曲线和气测全烃等特征,以此作为参考,指导水平井的着陆和水平段钻井轨迹的调整。

图2为神木气田X区块XX井的综合柱状图,参考该邻井,8号煤层厚度较厚,可分为8-1号、8-2号、8-3号、

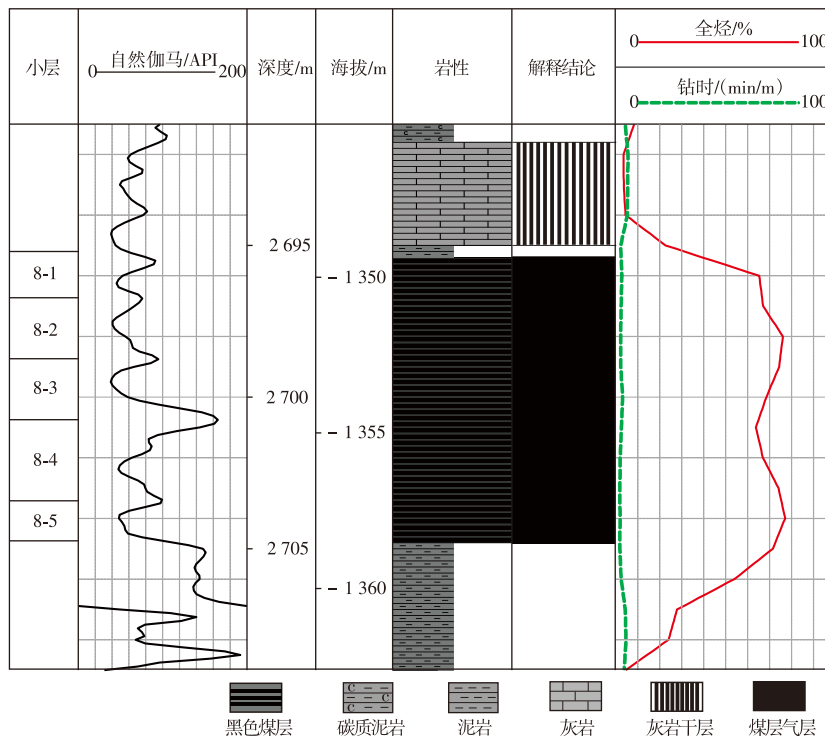


图2 鄂尔多斯盆地神木气田X区块XX井综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive bar chart of well XX in block X of Shenmu gas field in Ordos Basin

8-4号、8-5号5套煤层小层。8-3号和8-4号之间有1套比较明显的夹矸(高伽马值约为140 API,泥质含量高),这套夹矸可以作为明显的标志层。8-1号、8-2号、8-3号为煤层的上半部分,煤体结构更完整,气测全烃值更高,含气性更好;8-4号、8-5号煤层的下半部分,煤体结构比较碎,气测全烃值和含气性均差于上半部分。该井8号煤层顶板整体为灰岩(上覆约0.5 m泥岩),底板为厚泥岩。这些特征均可以为水平井的着陆和导向提供指导,如果水平段方向还有更多邻井,还要综合考虑各邻井的煤层特征。

据统计,神木气田X区块不同区域8号煤层的小层分层数各有不同,一般会根据伽马值的特征分成3~5套煤层小层,根据这几套小层伽马值特征判断钻头在煤层中的纵向位置,指导井轨迹的调整。需要注意在着陆和水平段钻进过程中,当邻井较少或位移距离较远时,不排除水平井的煤层厚度、顶底板组合特征和煤层小层组合特征发生变化,要及时分析,不能只是单一的参考邻井资料,以免做出错误的导向判断。

2.3 着陆井轨迹控制

在水平井钻进的造斜段和稳斜段,开展实时地层对比分析。通过卡准石盒子组8段“骆驼脖子砂岩”、山西组底部5号煤层,太原组顶部东大窑段灰岩等明显标志层(图3),特别是距离8号煤层最近的东大窑段灰岩(可根据高钻时初步判断,待岩屑返出后通过滴酸与碳酸盐实验进一步验证钻遇岩性),实时预测井底到煤层的垂向距离,对比钻井工程设计提前优化井轨迹,避免目的层深度较预计深度提前或滞后过多,确保合适的角度顺利着陆。要尽量使实钻井轨迹在预测目的层深度“线上运行”,达到“即使牺牲一定水平进尺,也要尽量避免发生煤层提前过多入层、入靶角度过小从而钻穿煤层”的目的。通常以井斜85°左右进行稳斜探测,在实钻中要根据地震预测的地层产状,适当向上或向下调整探层角度^[24-25]。

2.4 煤层综合判定

神木气田X区块8号煤层的储盖组合分为3类:顶底泥岩型、顶灰底泥型、顶砂底泥型,其中绝大部分区域为顶底泥岩型和顶灰底泥型,泥岩和灰岩的封盖能力强,储盖条件有利。在水平段钻进过程中,会触顶、触底、钻遇夹矸甚至顶出或底出,需要对钻遇的岩性做出判断,从而及时作出调整,使钻头重新入煤层穿行。钻进煤层与泥岩、砂岩、灰岩等岩性存在着比较明显的差异,可以从以下几方面进行区分和判断。

1) 钻压、钻时方面:煤岩较软,钻压小,钻时快,钻时约为1~2 min/m;泥岩、砂岩的钻压和钻时居中,钻时约为

5 min/m;灰岩较硬,钻压和钻时最大,钻时约为10 min/m。在钻进过程中,通过钻压、钻时可以实时区分煤层和其他岩性,但有时钻井设备性能也会影响钻压钻时,进而对岩性判断造成一定干扰。

2) 岩屑可直观区分煤岩与其他岩性:煤岩一般为黑色,构造高部位和煤层顶部亮度较强;8号煤层附近的泥岩一般为深灰色,砂岩一般为浅灰色,灰岩为深灰色或褐灰色,滴酸强烈冒泡。

3) 气测全烃是判定煤层与其他岩性含气性的最直观体现。神木气田X区块8号煤层的气测全烃值高,普遍在70%以上,最高可达99.99%。构造高部位的煤层全烃值通常高于构造低部位的煤层全烃值,煤层上部的全烃值通常高于煤层下部的全烃值。夹矸一般为碳质泥岩,含气性的高低与泥质含量的多少有关,泥质含量少时,含气性好,全烃值相对较高;泥质含量多时,含气性差,全烃值相对较低。顶板泥岩、灰岩,底板泥岩基本不含气,全烃值通常为基值;顶板砂岩分布范围较小,含气性目前尚不明确。

岩屑特征和气测全烃值是岩性最直观、最精准的判断依据,当钻压、钻时无法对井底岩性做出精确判断时,可以先循环,待井底岩屑返出确定岩性后,再进行下一步导向作业。

2.5 水平段地质导向

探到8号煤层顶后,按照地震预测的地层倾角,调至合适的井斜角度进行水平段钻进。要注意个别区域会在8号煤层顶部发育煤线,在稳斜探层过程中要确保钻穿煤线后再挑平。在水平段钻进过程中,参考已知邻井和三维地震剖面刻画的构造趋势,并结合导向仪器判断钻头在煤层中的具体位置,不断更新构造趋势,调整钻头位置,使钻头尽量在煤层的上部穿行(上部煤层的煤体结构更好、含气性更高、对后期压裂改造更有利)。

2.5.1 近钻头方位伽马成像工具

目前,神木气田X区块一般采用斯伦贝谢公司的近钻头方位伽马成像工具,成像工具可以录取远端伽马、近端平均伽马、上伽马和下伽马等多项伽马数据。

远端伽马,即常规测量工具LWD,测量零长较长,一般介于16~20 m(图4a),无法通过伽马值实时判断井底的岩性;近端平均伽马,可以理解为8个方位伽马平均值(图4b)。近钻头直径一般为173 mm,在水平段钻进时,上伽马值与下伽马值可以区分上下深度相差约173 mm岩石伽马的变化趋势。近端平均伽马测量零长小于1 m(通常约为0.8 m),可以测量距离井底小于1 m处的岩石伽马值(图4a),根据伽马值实时判断近井底

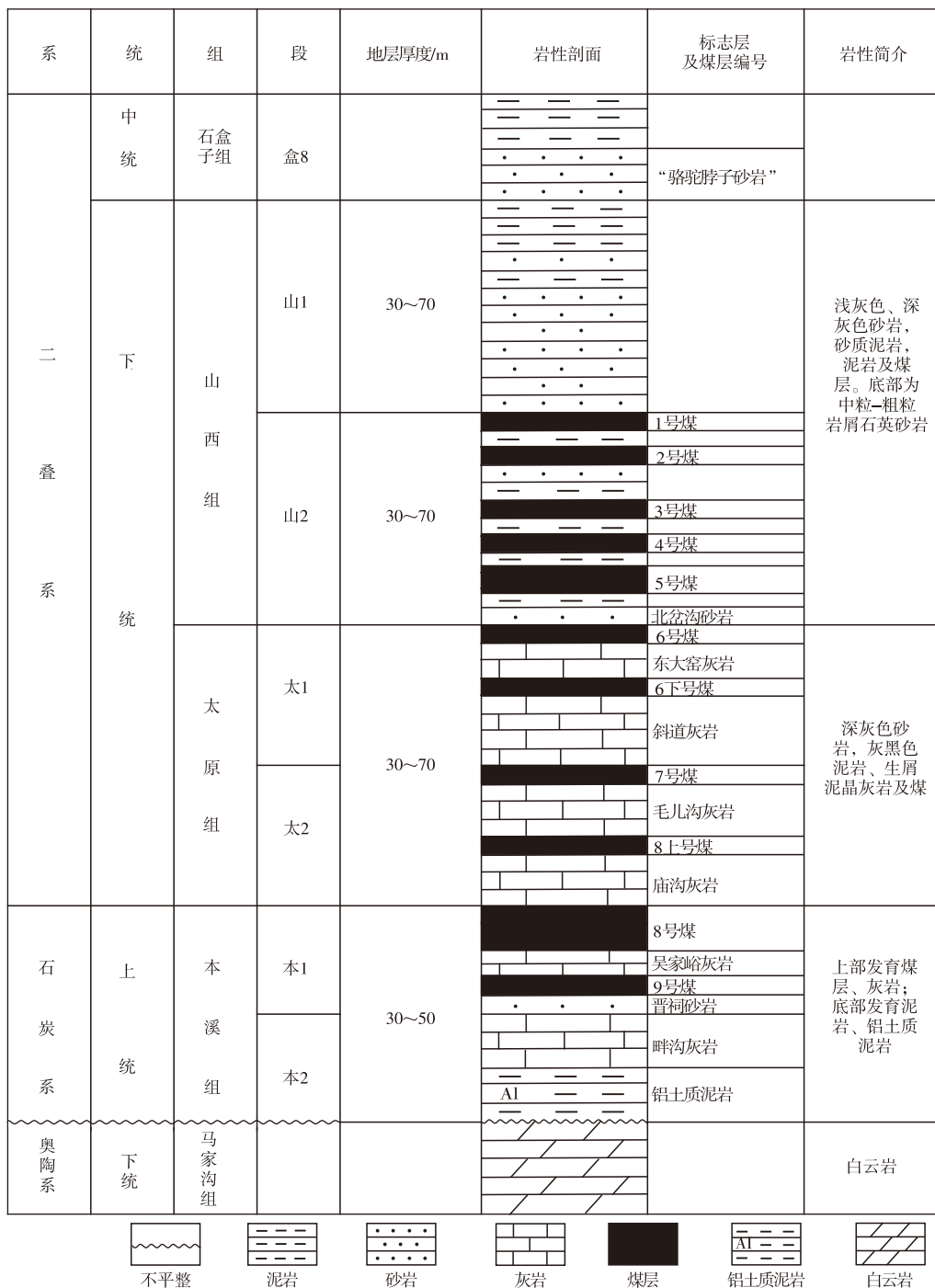


图3 鄂尔多斯盆地神木气田X区块上古生界沉积地层特征

Fig.3 Characteristics of Upper Paleozoic sedimentary strata in block X of Shenmu gas field in Ordos Basin

的岩性。

据统计,神木气田X区块8号煤层的伽马值通常介于20~100 API,较纯的煤层伽马值一般小于60 API,局部存在较高伽马值的煤层(100~120 API);而泥岩的伽马值通常介于100~200 API,比煤层大很多,通过近钻头的近端平均伽马值,可以轻易分辨煤层和泥岩。夹矸即碳质泥岩,其伽马值在纯煤层与纯泥岩之间,泥质含量少时,伽马值较小;泥质含量多时,伽马值较大。灰岩的伽马值也很小,通常小于60 API,与煤层相近,通过伽马值

无法直接分辨二者,但可通过钻压钻时轻易分辨灰岩与煤层。上述伽马值的范围在神木气田X区块不同区域、不同井又略有差异,在地质导向时,根据每口水平井的实际伽马值对岩性进行具体区分和判别。

2.5.2 切层判断方法

近钻头方位伽马成像工具的导向思路总结为“平均伽马看趋势,上下伽马谁先动谁切”,通常分为快速上切、快速下切、缓慢上切、缓慢下切和切层未成等几种情况。

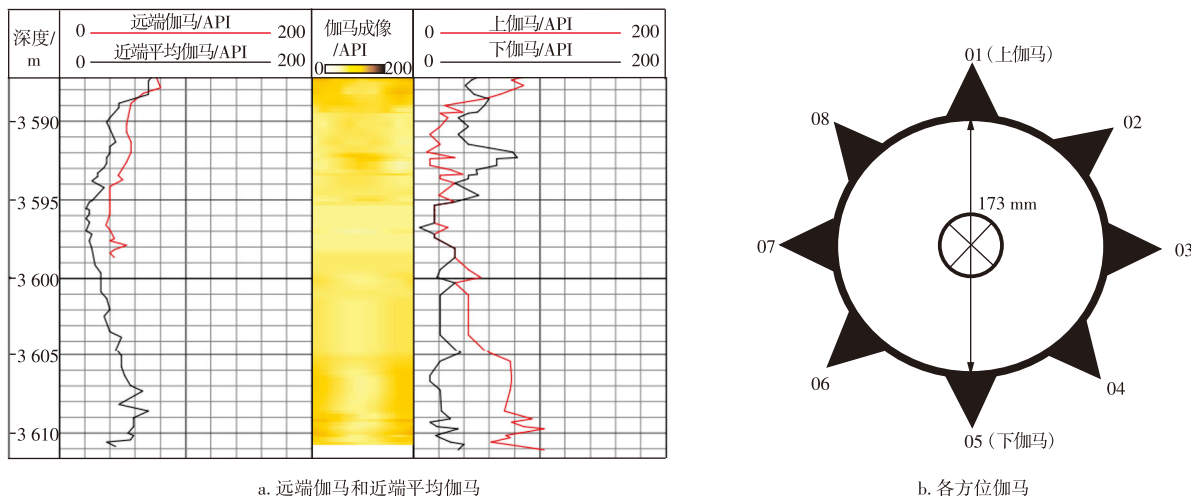


图4 近钻头方位伽马成像导向工具示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the near-bit orientation gamma imaging guidance tool

快速上切与快速下切(图5):快速上切时,上伽马先变化,下伽马迅速跟上以相同趋势变化,近端平均伽马亦以相同趋势变化,后上下伽马2条曲线进行交汇,至此便完成了1个完整的快速上切过程,钻头从目前的煤层快速向上切入了上部的煤层;快速下切的道理同样如此,下

切的结果是钻头从目前的煤层快速向下切入了下部的煤层。这种快速上切与快速下切现象,表明目前的井底井斜与实际地层产状的角差较大,要分析目前钻头在煤层中的位置,判断是否有顶出或底出风险,及时进行降斜或增斜。

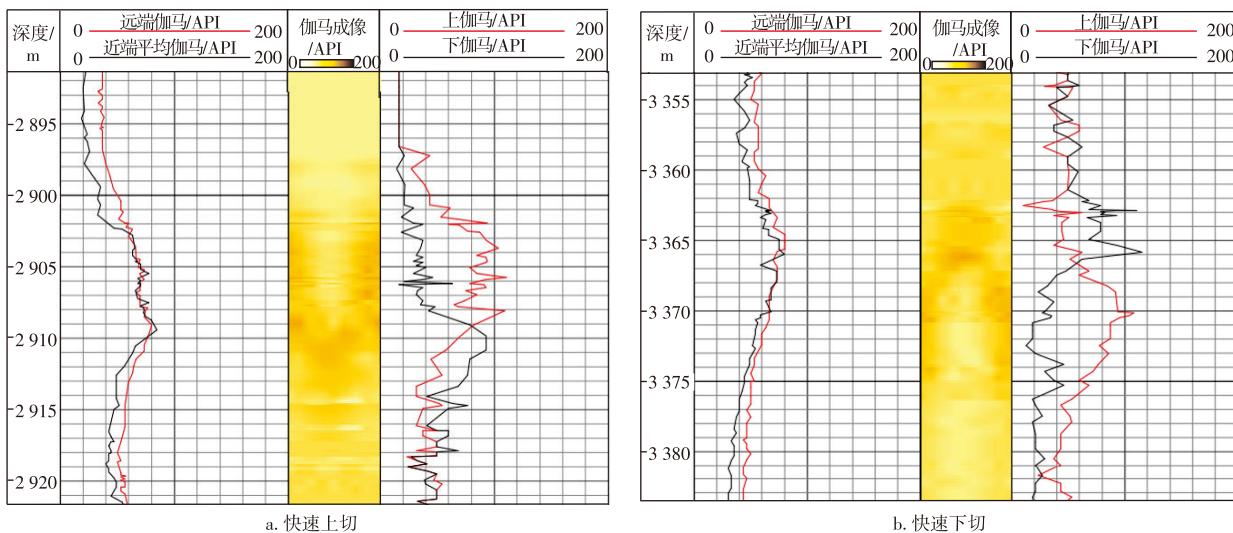


图5 近钻头方位伽马成像快速上切与快速下切示意图

Fig. 5 Schematic diagram of rapid up-cutting and down-cutting using near-bit orientation gamma imaging

缓慢上切与缓慢下切:缓慢上切时,上伽马先变化,下伽马在钻进一定进尺之后才缓慢跟上以相同趋势变化,近端平均伽马亦缓慢以相同趋势变化,后上下伽马2条曲线进行交汇,至此便完成了1个完整的缓慢上切过程,钻头从目前的煤层缓慢向上切入了上部的煤层(图6a)。缓慢下切的道理同样如此,钻头从目前的煤层缓慢向下切入了下部的煤层。这种缓慢上切与缓慢下切现象,表明目前的井底井斜与实际地层产状的角差较小,根据目前钻头在煤层中的位置分析,判断是否进行降斜或增斜。

切层未成:下切未成时,下伽马先变化,上伽马跟上变化的趋势与幅度较小,虽然近端平均伽马亦有相同变化趋势,但上下伽马曲线始终未交汇,这种现象是下切未成(图6b);上切未成的道理同样如此,钻头仍然在原煤层中钻进。切层未成现象表明目前的井底井斜与实际地层产状基本一致,上伽马(或下伽马)切至了高伽马值分界面,但下伽马(或上伽马)只是蹭到了这个分界面,整个钻头并没有完全切过这套分界面,慢慢地又回到了原煤层。切层未成现象也是在钻进过程中对地质导向的不利干扰,但对于地层产状的预测反而是相对明显的有利标志。

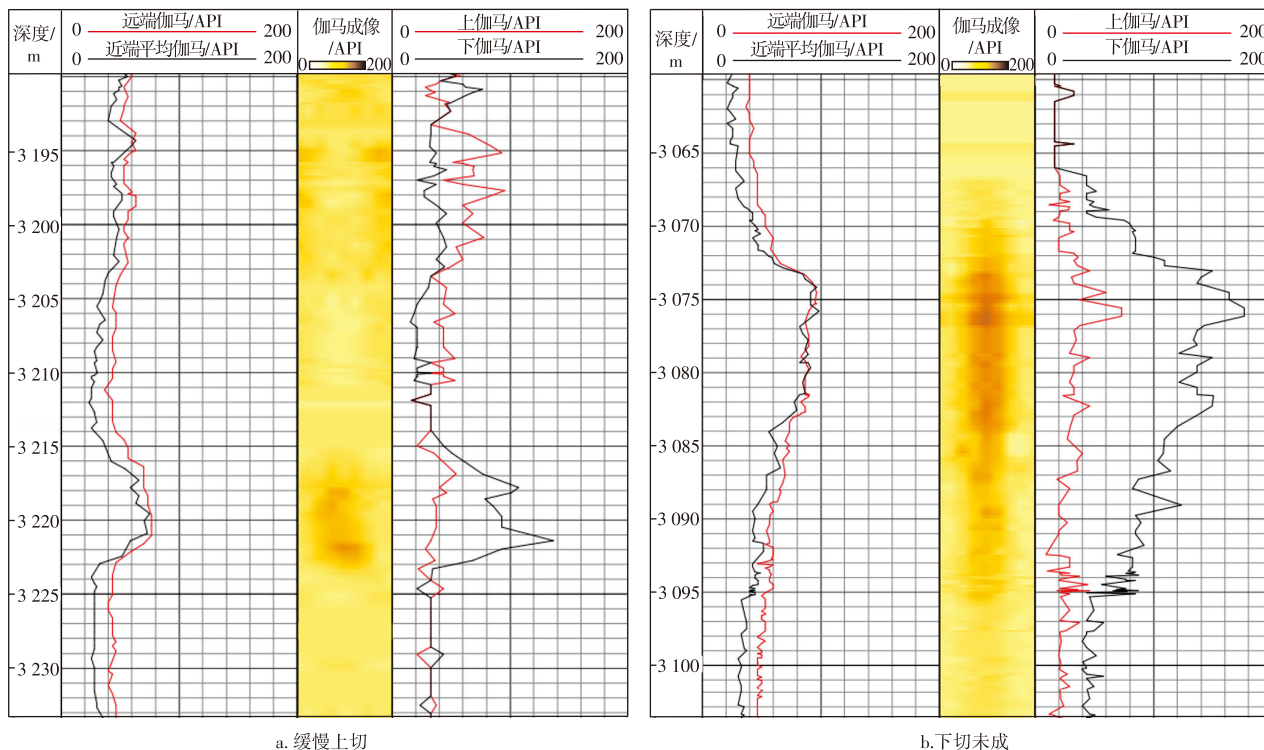


图6 近钻头方位伽马成像缓慢上切与下切未成示意图

Fig. 6 Schematic diagram of slow up-cutting and unsuccessful down-cutting using near-bit orientation gamma imaging

2.5.3 成像亮度特征

在煤层钻进时,伽马值越小,表明煤层越纯,成像亮度越强(图7a);当伽马值明显增大时,成像亮度会随之显著变暗(图7b),表明井底岩石的泥质含量加重,钻遇

了夹矸甚至出层钻遇泥岩。当上下伽马值的大小和变化趋势基本一致时,钻头不一定是在煤层中沿地层产状平行钻进,可能存在局部煤层的横向和纵向均质性相对较强,上下伽马变化不大,钻头仍有可能在煤层中向上或向下穿行,这种现象会对地质导向判断产生一定的干扰。

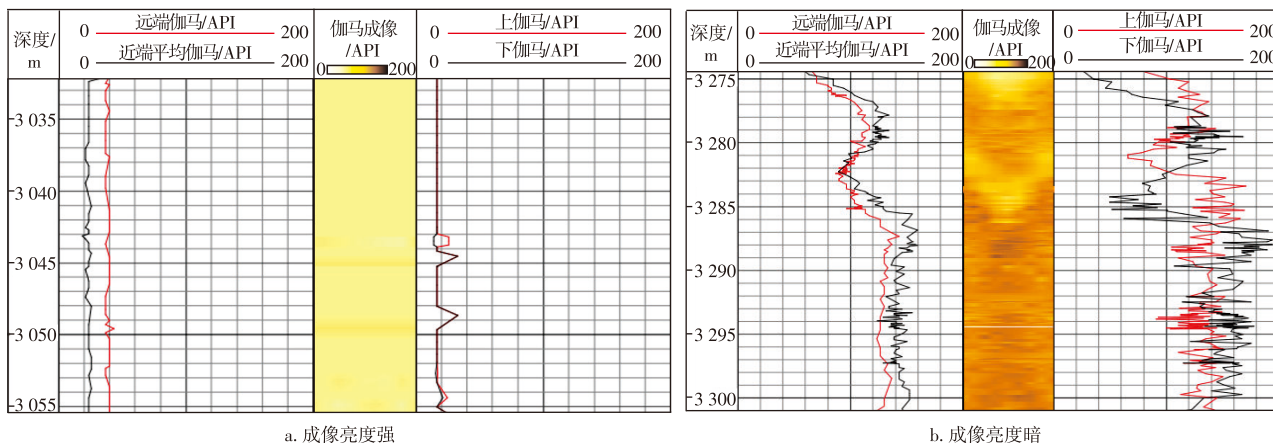


图7 近钻头方位伽马成像亮度显示示意图

Fig. 7 Schematic diagram of brightness display using near-bit orientation gamma imaging

2.6 钻井工程参数控制

煤岩脆、软,容易坍塌,下套管及固井难度大,容易出现下套管不到位从而丢失水平段的工程难题。在进行地质导向时,着陆段与水平段均要严格遵守全角变化率(狗腿度)的标准:造斜段全角变化率 $\leq 6(^{\circ})/30\text{m}$,稳斜段全

角变化率 $\leq 3(^{\circ})/30\text{m}$,探层段全角变化率 $\leq 5(^{\circ})/30\text{m}$,水平段全角变化率 $\leq 3(^{\circ})/30\text{m}$ 。尤其是在水平段调整井轨迹时,在满足地质要求的前提下,尽量以狗腿度调整井斜,通常以 $< 1.5(^{\circ})/30\text{m}$ 进行,为保证井轨迹的光滑性,最多连续调整3~5个单根,并在稳斜1~2根后再进行重新调整,这样可以通过一趟钻钻井技术节约的时间,为后

续下套管、固井打好基础。

复合钻进要比定向钻进的速度更快,而且复合钻进的井眼更光滑,因此,可以摸索钻头在煤层、泥岩、砂岩和灰岩等不同岩性中的复合钻进井斜变化规律,以达到复合钻进替代定向钻进从而实现井斜调整的目的,提升钻进效率。大多数水平段钻进时,钻头在煤层中复合钻进有降斜的趋势,如果后期地质目的是要降斜,就可以通过复合钻进实现,不必再通过定向钻进去调整井斜。

2.7 地质导向应用实例

SM-X-H7井是该区块的一口煤层气先导试验井,邻井8号煤层厚度较厚(约9 m),气测全烃值较高介于85.00%~99.99%,井位部署潜力较大。但该井水平段部署区域构造高低起伏多变,局部最大倾角为3°左右,对于水平井的高煤层钻遇率和顺利钻井、完井是个较大的挑战(图8)。

邻井8号煤层发育4套煤层小层,伽马值介于30~70 API,中部发育1套厚度约0.5 m的夹矸(伽马值介于70~135 API),可以作为明显的标志层。运用上述综合地质导向技术,现场驻井实时决策,确保了该井快速完钻,实钻煤层水平段1 634 m,煤层钻遇率达到了100%,平均气测全烃值为93.5%,钻遇效果十分理想。在实钻过程中,共钻遇5次夹矸(标志层),及时做出井斜调整,使钻头及时穿入夹矸上部的煤层小层,最终确保该井绝大部分轨迹穿行于煤层的上半部分。同时,充分考虑了狗腿度调整幅度控制和复合钻进趋势的影响,使得该井的井眼比较光滑,确保了后续下套管和固井工程的顺利完井(图8)。

通过该井实钻井轨迹与三维地震反演对于煤层顶底的刻画对比分析,三维地震对于整体构造趋势的预测是比较准确的,但在该井钻进的中部和尾部,预测符合率较差,最终依靠近钻头方位伽马工具的实时导向作用,避免了顶出或底出的现象(图8)。

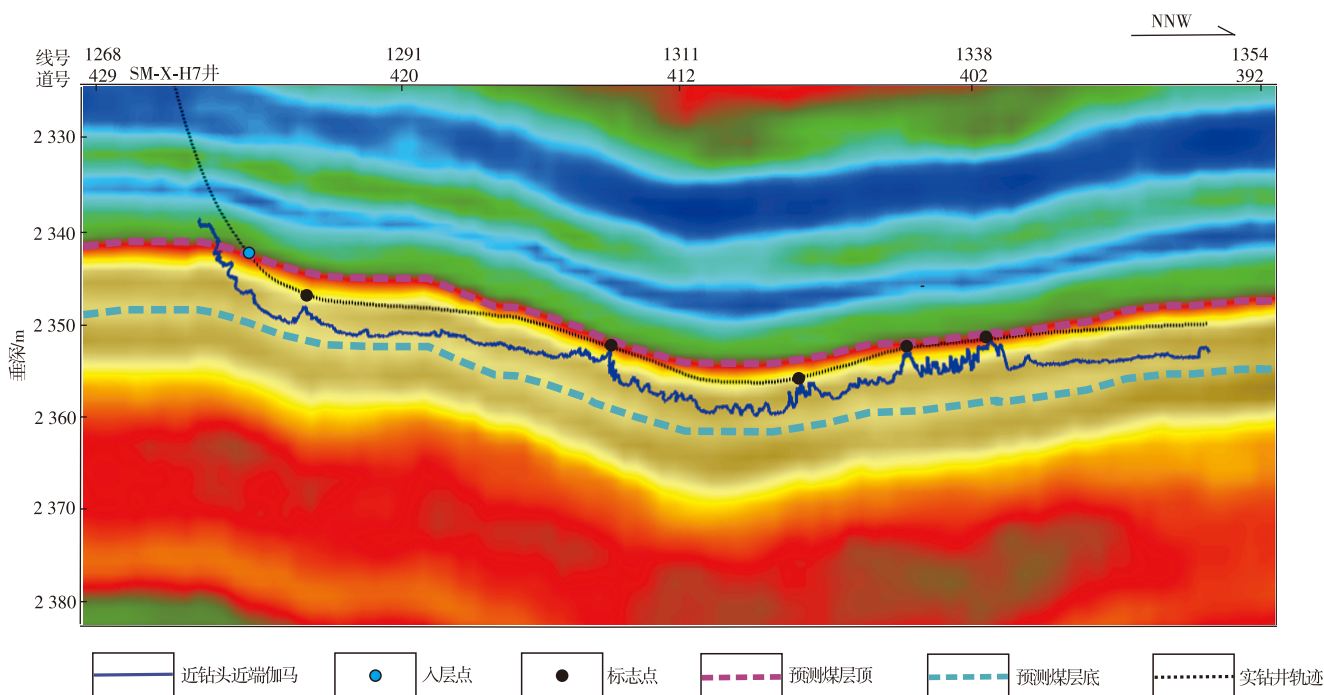


图8 鄂尔多斯盆地神木气田X区块SM-X-H7井实钻轨迹示意图

Fig. 8 Schematic diagram of actual drilled trajectory of well SM-X-H7 in block X of Shenmu gas field in Ordos Basin

3 实施进展

神木气田X区块自2022年下半年开始进行深层煤层气领域的风险勘探,至今已实施了多口风险勘探、预探、先导试验和评价等井位,全部采用水平井井型。实施的3口探井已投产,并取得了良好的生产效果。

3.1 钻遇情况

截至2024年5月底,神木气田X区块已完钻14口本

溪组8号煤层水平井,其中风险探井1口,预探井2口,先导试验井8口,评价井3口。14口井平均水平段长1 432.6 m,平均煤层长1 346.6 m,平均煤层钻遇率为94.0%,钻遇率较高。14口井平均气测全烃为81.0%,体现出该区块8号煤层含气性较好的特点(表1)。

3.2 生产情况

截至2024年5月底,神木气田X区块已投产3口本溪组8号煤层水平井,分别为风险探井SM-X-H1井和预探井SM-X-H2井、SM-X-H3井(表2)。3口井目前日产

表1 神木气田X区块深层煤层气水平井钻遇情况统计

Table 1 Statistical summary of drilling encounters for deep coalbed methane horizontal wells in block X of Shenmu gas field

井型	层位	井别	井号	水平段长度/m	煤层长度/m	煤层钻遇率/%	平均气测全烃/%
水平井	本溪组8号煤层	风险探井	SM-X-H1	2 211	1 556	70.4	65.1
		预探井	SM-X-H2	1 273	1 251	98.3	75.1
			SM-X-H3	1 264	1 216	96.2	88.6
		先导试验井	SM-X-H4	1 574	1 574	100.0	79.3
			SM-X-H5	1 482	1 307	88.2	72.2
			SM-X-H6	1 043	974	93.4	89.9
			SM-X-H7	1 634	1 634	100.0	93.5
			SM-X-H8	1 609	1 603	99.6	70.6
			SM-X-H9	1 550	1 550	100.0	75.8
			SM-X-H10	1 514	1 462	96.6	89.9
		评价井	SM-X-H11	1 430	1 376	96.2	85.1
			SM-X-H12	1 243	1 144	92.0	90.5
			SM-X-H13	1 253	1 253	100.0	68.6
				SM-X-H14	977	952	97.4
		平均		1 433	1 347	94.0	81.0

表2 神木气田X区块深层煤层气水平井生产情况统计

Table 2 Statistical summary of production performance of deep coalbed methane horizontal wells in block X of Shenmu gas field

井号	投产时间	镜质体反射率/%	煤层长度/m	试产气量/ 10^4 m^3	目前套压/MPa	目前产气量/ 10^4 m^3	目前产水量/ m^3	累产气量/ 10^4 m^3
SM-X-H1	2022-11	1.8	1 556	8.16	1.72	2.22	3.5	1 879.55
SM-X-H2	2023-04	1.8	1 251	12.47	5.42	6.17	8.3	2 452.29
SM-X-H3	2023-10	1.6	1 216	6.67	5.06	8.04	13.0	1 497.33
合计						16.43	24.8	5 829.17

气量为 $16.43 \times 10^4 \text{ m}^3$, 累产气量为 $5 829.17 \times 10^4 \text{ m}^3$, 其中 SM-X-H2 井和 SM-X-H3 井目前套压仍然维持在 5 MPa 以上, 压降速率较小, 稳产能力较强。已投产的 3 口井整体生产效果较好, 体现出该区块深层煤层气具有较大的开发潜力。

4 认识与探讨

4.1 水平井部署

神木气田 X 区块本溪组 8 号煤层构造发育呈西低东高、南北比较平缓的趋势, 通常高部位的煤层含气性要更好; R_0 值自北向南逐渐升高, R_0 值越大, 煤层的成熟度越高, 生烃能力越强; 煤层厚度北部和南部偏厚、中部偏薄, 煤层厚度越大, 地质储量越大。结合构造、 R_0 值、煤层厚度等几方面因素考虑, 深层煤层气水平井应优选构造高部位、 R_0 值较高、煤层厚度较大的区域进行部署。

水平井的优化部署是进行水平井地质导向的前提, 而对于深层煤层气水平井来说, 精准的构造认识就是最重要的部署依据。单从构造方面来看, 要优选构造相对平缓、地层整体上倾的区域进行重点部署, 这对于提高煤

层钻遇率、确保井轨迹光滑、后期排水采气均比较有利, 应尽量避免在地层产状多变、局部倾角过大的区域进行部署。

4.2 水平井地质导向

综合地质、地震、测井、录井和钻井工程等多学科知识的地质导向技术, 目前已取得良好的钻遇效果, 其中近钻头方位伽马成像导向工具发挥了核心作用。但近钻头导向工具费用高昂, 按天计费, 且煤层钻速快, 坍塌周期短, 需现场驻井导向小组不分昼夜及时决策。虽然勘探开发效果显著, 但也花费了大量人力、物力和财力。

关于未来深层煤层气地质导向的思考: ①可考虑适当降低对煤层钻遇率的要求, 根据目前的认识, 当水平井轨迹处于煤层上部时, 后期压裂改造和生产效果会更好, 因此尽量保证钻头在煤层顶部穿行, 即使是顶出牺牲了一定钻遇率, 也可以通过改变射孔方式实现出层段的充分改造; ②适当改变导向模式, 目前的导向模式给经营成本带来巨大压力, 不适宜大规模推广, 可探讨远程线上导向和常规 LWD 导向工具替代近钻头导向工具的模式, 但此模式需要研发远程导向技术, 且对 8 号煤层构造刻画的精度提出更高的要求。

5 结论

1) 神木气田X区块深层本溪组8号煤层厚度较大,纵向顶底板岩性组合和煤层小层组合多变,局部横向顶面构造产状变化较快。煤层钻速快,易坍塌,对钻井、完井周期要求较高。靠单一学科或者单一技术难以精准判断水平井钻进的实时位置,无法实现高钻遇率和快速钻井、完井,地质导向难度较大。

2) 以精细地震构造解释为前提进行井位部署,以近钻头方位伽马成像分析为关键核心技术进行导向,并结合相关地质、测井、录井和钻井参数为一体的综合水平井地质导向技术,在神木气田X区块深层煤层气水平井导向中取得了显著的效果,对鄂尔多斯盆地同类型气藏地质导向具有较好的推广和借鉴意义。

3) 目前深层煤层气地质导向技术的人力和资金成本较高,可持续性较差。未来需要进一步优化和完善地质导向技术,做到既能充分实现地质目的又能降低人力和资金投入,最终实现神木气田X区块深层煤层气的效益开发。

参考文献

[1] 周德华,陈刚,陈贞龙,等. 中国深层煤层气勘探开发进展、关键评价参数与前景展望[J]. 天然气工业, 2022, 42(6): 43-51.
ZHOU Dehua, CHEN Gang, CHEN Zhenlong, et al. Exploration and development progress, key evaluation parameters and prospect of deep CBM in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 43-51.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 徐凤银,张伟,李子玲,等. 鄂尔多斯盆地保德区块煤层气藏描述与提高采收率关键技术[J]. 天然气工业, 2023, 43(1): 96-112.
XU Fengyin, ZHANG Wei, LI Ziling, et al. Coalbed methane reservoir description and enhanced recovery technologies in Baode block, Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(1): 96-112.

[5] 李曙光,王成旺,王红娜,等. 大宁—吉县区块深层煤层气成藏特征及有利区评价[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(9): 59-67.
LI Shuguang, WANG Chengwang, WANG Hongna, et al. Reservoir forming characteristics and favorable area evaluation of deep coalbed

methane in Daning-Jixian Block[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(9): 59-67.

[6] 聂志宏,时小松,孙伟,等. 大宁—吉县区块深层煤层气生产特征与开发技术对策[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 193-200.
NIE Zhihong, SHI Xiaosong, SUN Wei, et al. Production characteristics of deep coalbed methane gas reservoirs in Daning-Jixian Block and its development technology countermeasures[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 193-200.

[7] 郭广山,徐凤银,刘丽芳,等. 鄂尔多斯盆地府谷地区深部煤层气富集成藏规律及有利区评价[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(2): 81-91.
GUO Guangshan, XU Fengyin, LIU Lifang, et al. Enrichment and accumulation patterns and favorable area evaluation of deep coalbed methane in the Fugu area, Ordos Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(2): 81-91.

[8] 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. Outcomes and implications of pilot tests for deep coalbed methane production on the eastern margin of the Ordos Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(2): 1-12.

[9] 曾雯婷,徐凤银,张雷,等. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气排采工艺技术进展与启示[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(2): 23-32.
ZENG Wenting, XU Fengyin, ZHANG Lei, et al. Deep coalbed methane production technology for the eastern margin of the Ordos Basin: Advances and their implications[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(2): 23-32.

[10] 安琦,杨帆,杨睿月,等. 鄂尔多斯盆地神府区块深部煤层气体积压裂实践与认识[J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 2376-2393.
AN Qi, YANG Fan, YANG Ruiyue, et al. Practice and understanding of deep coalbed methane massive hydraulic fracturing in Shenfu Block, Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(5): 2376-2393.

[11] 赵喆,徐旺林,赵振宇,等. 鄂尔多斯盆地石炭系本溪组煤岩气地质特征与勘探突破[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(2): 234-247.
ZHAO Zhe, XU Wanglin, ZHAO Zhenyu, et al. Geological characteristics and exploration breakthroughs of coal rock gas in Carboniferous Benxi Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(2): 234-247.

[12] 孙璐,周国晓,荆雪媛,等. 鄂尔多斯盆地中东部本溪组深部煤岩分形特征与成储机理[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2024, 39(3): 1-11.
SUN Lu, ZHOU Guoxiao, JING Xueyuan, et al. Research on fractal characteristics and reservoir forming mechanism of deep coal rock in Benxi Formation, central-eastern Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2024, 39(3): 1-11.

[13] 王红岩,段瑶瑶,刘洪林,等. 煤层气水平井开发的理论技术初探:兼论煤层气和页岩气开发条件对比[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(4): 47-59.
WANG Hongyan, DUAN Yaoyao, LIU Honglin, et al. Preliminarily exploring the theories and technologies for coalbed methane production using horizontal wells: Comparison of conditions for coalbed methane and shale gas exploitation[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(4): 47-59.