

# 煤层气水平井高效钻进关键技术研究

## ——以山西沁水盆地某煤层气区块为例

贺云超, 翁 炜, 冯美贵, 徐军军, 郭 强, 吴 烁, 蒋 睿

(北京探矿工程研究所, 北京 100083)

**摘要:**为提高煤层气资源开发利用效率,针对常规远端伽马和EMWD仪器判层不及时,薄煤层分辨率低,井眼轨迹易出层等难题,提出一种基于近钻头地质导向的高效钻进技术。以山西省沁水盆地某煤层气区块为工程实例,对区块内布置的多口水平井施工情况、应用特点及效果等进行阐述,总结出一套可推广、可复制的煤层气水平井高效钻进技术工艺,包括采用柔性钻具组合、选择合理钻进参数、结合井眼轨迹精细化控制技术等,为煤层气高效开发利用提供技术参考。

**关键词:**煤层气;水平井;地质导向;近钻头仪器;轨迹控制;方位伽马;柔性钻具组合

**中图分类号:**TE243;P634.7 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)S1-0345-06

## Research on key technologies for efficient drilling of coalbed methane horizontal wells: Taking a coalbed methane block in Qinshui Basin, Shanxi Province as an example

HE Yunchao, WENG Wei, FENG Meigui, XU Junjun, GUO Qiang, WU Shuo, JIANG Rui

(Beijing Exploration Engineering Research Institute, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of coalbed methane resource development and utilization, a high-efficiency drilling technology based on near bit geological guidance is proposed to address the problems of delayed layer identification by conventional remote gamma and EMWD instruments, low resolution of thin coal seams, and easy formation of wellbore trajectories. Taking a coalbed methane block in Qinshui Basin, Shanxi Province as an engineering example, the construction situation, application characteristics, and effects of multiple horizontal wells arranged in the block are elaborated, and a set of promotable and effective methods is summarized. The replicable high-efficiency drilling technology for horizontal wells of coalbed methane, including the use of flexible drilling tool combinations, the selection of reasonable drilling parameters, and the combination of fine control technology for wellbore trajectory, provides technical reference for the efficient development and utilization of coalbed methane.

**Key words:** coalbed methane; horizontal well; geological guidance; near drill bit instruments; trajectory control; azimuth gamma; flexible drilling tool assembly

## 0 引言

煤层气水平井是指最大井斜角达 $90^{\circ}$ 以及目标层有水平或近似水平段的煤层气井。近年来,利用

L型水平井开发煤层气已成为普遍趋势和重要技术手段。煤层气水平井与直井和普通定向井相比,可高效导通煤储层裂隙,增大解析面积,提升气、水导

收稿日期:2023-05-30;修回日期:2023-08-16 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.S1.054

第一作者:贺云超,男,汉族,1988年生,探矿工程专业,硕士,长期从事定向井、水平井高效钻井工艺技术研究工作,北京市海淀区学院路29号,1421838195@qq.com。

引用格式:贺云超,翁炜,冯美贵,等.煤层气水平井高效钻进关键技术研究——以山西沁水盆地某煤层气区块为例[J].钻探工程,2023,50(S1):345-350.

HE Yunchao, WENG Wei, FENG Meigui, et al. Research on key technologies for efficient drilling of coalbed methane horizontal wells: Taking a coalbed methane block in Qinshui Basin, Shanxi Province as an example[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 345-350.

流能力,提高单井产量和煤层气采收率,降低煤层气开采成本,缩短投资回收周期,利于开发沟壑山林等复杂地形条件地区受开发场地限制的煤层气,节约钻前工程和井场占地费用等。但目前煤层气水平井钻进时存在如下问题:(1)目的层顶底界面深度确定困难,往往采用先施工200~300 m长度的导眼,以便于水平井井身轨迹剖面的设计,而导眼钻进属于无效工程量;(2)水平段煤层钻遇率普遍比较低,钻进时容易发生穿层进入煤层顶板或底板,甚至找不到煤层位置等情况;(3)松软煤层水平井井壁稳定性差,钻完井过程中极易发生井壁坍塌掉块,引起卡钻、甚至埋钻等工程事故,成孔困难;(4)水平段钻进时拖压严重,定向时往往工具面较难稳定,钻进效率低<sup>[1-6]</sup>。

针对煤层气水平井钻进时存在的上述问题,本文提出在山西晋城沁水盆地某煤层气区块,利用邻井钻探、测井等资料进行地层对比分析,筛选标志层,预测标志层、目的煤层的位置,通过钻井揭露情况验证预测结果,从而判识钻头与标志层、煤层的空间位置,及时更新轨道设计,最终达到无导眼一次准确入靶;从优化井身结构、优选钻进参数、防塌钻进技术等入手,总结出一套松软煤层高效钻进工艺技术;综合利用钻时录井、地质导向技术,使水平段轨迹处于煤层最佳部位,保证煤层钻遇率。该研究对提高煤层气水平井产能,节约钻井成本,降低投资风险具有重要借鉴作用,为煤层气水平井技术的推广提供指导建议。

## 1 区域地质特征<sup>[7-10]</sup>

沁水盆地在石炭系上统太原组和二叠系下统山西组发育多套煤层,是在奥陶系古风化壳之上发育的一套近海海陆交互相含煤沉积。其中,3号煤层和15号煤层在沁水盆地稳定分布且范围广,柿庄北区块内以这2套煤层为勘探开发对象。

(1)埋深、厚度:根据区块内完井资料及煤田钻孔资料,3号煤的埋深变化范围为716.54~1495.00 m,平均948.47 m;根据15号煤的完井资料,其埋深区域上变化范围为836.40~1574.06 m,平均1076.56 m。3号煤厚度变化范围3.78~7.31 m,平均5.77 m;15号煤厚度变化范围1.21~12.26 m,平均5.51 m,单层厚度变化较大。

(2)煤体结构、含气量:柿庄北地区煤体结构以

碎裂结构煤为主。区内煤的变质程度高,属于无烟煤阶段,含气量高。柿庄北区块样品测试测定结果3号煤层含气量一般在3.81~21.60 m<sup>3</sup>/t之间,平均13.83 m<sup>3</sup>/t。15号煤含气量变化范围在4.41~23.21 m<sup>3</sup>/t之间,平均为13.38 m<sup>3</sup>/t。SX-XX井区附近15-2号煤层含气量约16.57 m<sup>3</sup>/t。

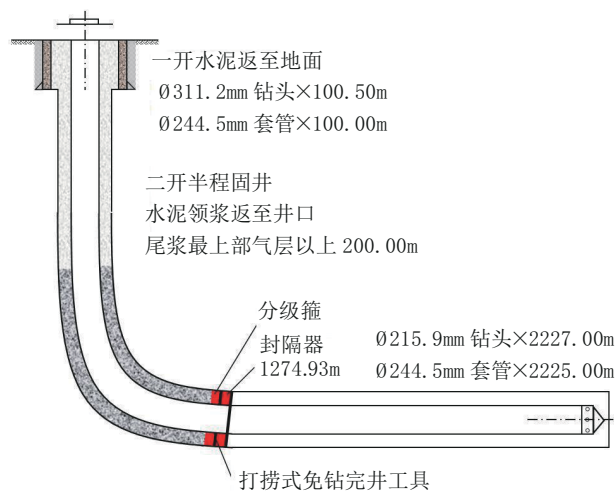
(3)煤层顶底板特征:山西组3号煤层顶板主要由泥岩、粉砂岩、粉砂质泥岩等致密岩石组成,局部为细、中粒砂岩,垂直裂隙发育,方解石充填。底板多为泥岩和粉砂岩。太原组15号煤层伪顶多为薄层炭质泥岩、泥岩和含钙泥岩,K2灰岩常为其直接顶板,底板主要为泥岩、炭质泥岩。

(4)煤储层压力及温度:3号煤层储层压力梯度为0.81 MPa/100 m;15号煤层储层压力梯度为0.58 MPa/100 m;总体上3、15号煤层储层压力均属于欠压储层。

## 2 钻完井关键技术

### 2.1 井身结构优化

合理的井身结构设计是保证钻井安全、高效的前提,同时也可降低钻井成本。勘探程度及钻井装备能力的不断提高及钻井工艺技术的发展,为完善井身结构、保证钻井施工安全和质量提供保障<sup>[11-12]</sup>。为缩短钻井周期及节约成本,沁水盆地柿庄北区域多口钻井均采用了二开结构,一开主要封隔第四系上部易垮、易漏失地层,为二开的安全钻进创造条件,一般钻深60~100 m,下入导管封固。以SX-XX井为例说明(如图1所示):



(1)一开采用  $\varnothing 311.15\text{ mm}$  钻头钻入基岩 10 m 稳定地层,下入  $\varnothing 244.5\text{ mm}$  表层套管,固井水泥返至地面。

(2)二开采用  $\varnothing 215.9\text{ mm}$  钻头钻进至完钻,下入  $\varnothing 139.7\text{ mm}$  生产套管+筛管,水泥领浆返至井口,尾浆返至最上部气层以上 200 m。

## 2.2 水平井井身轨迹设计

井身轨迹设计一般由直井段、造斜段和水平段组成,为满足后期下泵排采需要,需在井斜角  $75^{\circ}\sim 85^{\circ}$  范围内预留 30 m 以上全角变化率  $<3^{\circ}/30\text{ m}$  的稳斜段。以 SX-XX 井为例,入靶点处井斜角设计在  $90^{\circ}$  左右,控制点 K2、K3 处的井斜角设计在  $93^{\circ}$  以上。为满足以上需求,采用“怡恒阳光软件”中“水平井微增探油层模型”,自 500 m 处以  $4^{\circ}/30\text{ m}$  狗腿度进行造斜,808.25 m 处开始以  $6.2^{\circ}/30\text{ m}$  狗腿度增斜,井斜达到  $81.19^{\circ}$  时以  $3^{\circ}/30\text{ m}$  狗腿度微增  $<30\text{ m}$ ,以保证后期下泵顺畅,井斜达  $85^{\circ}$  后以  $3.5^{\circ}/30\text{ m}$  狗腿度增斜至  $90^{\circ}$  着陆,水平段调整轨迹时,设计狗腿度  $\geq 2^{\circ}/30\text{ m}$ ,其设计垂直投影图见图 2。设计时轨道起伏尽可能小,有利于井眼轨迹控制,使井眼轨迹更光滑。SX-XX 井设计轨道数据见表 1。

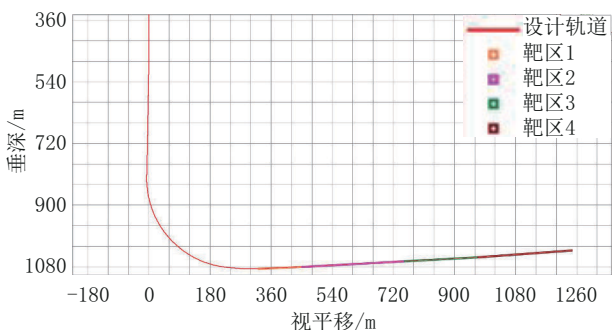


图 2 SX-XX 井垂直投影

## 2.3 钻具组合优化

根据不同井段设计要求,采取相应的定向钻具组合。为保证煤层水平段成井,采用柔性钻具组合进行防斜并及时纠斜。

(1)一开直井段:  $\varnothing 311.2\text{ mm}$  钻头+转换接头+  $\varnothing 203\text{ mm}$  螺杆+  $\varnothing 172\text{ mm}$  钻铤+  $\varnothing 127\text{ mm}$  钻杆。

(2)二开直井段+造斜段:  $\varnothing 215.9\text{ mm}$  钻头+  $\varnothing 172\text{ mm}$  螺杆+定向接头+  $\varnothing 172\text{ mm}$  无磁钻铤(MWD)+  $\varnothing 127\text{ mm}$  加重钻杆+  $\varnothing 127\text{ mm}$  钻杆。

表 1 SX-XX 井设计轨道数据

测深/m	井斜/ ( $^{\circ}$ )	方位/( $^{\circ}$ )	狗腿度/ [( $^{\circ}$ )· ( $30\text{ m}^{-1}$ )]	段长/ m	备注
0.00	0.00	179.75	0.00	0.00	
500.00	0.00	179.75	0.00	500.00	造斜
534.15	4.55	179.75	4.00	34.15	稳斜
808.25	4.55	179.75	0.00	274.10	增斜
1199.85	81.19	93.43	6.20	391.59	稳斜微增
1265.08	87.72	93.43	3.00	65.23	稳斜微增
1284.65	90.00	93.43	3.50	19.57	靶点
1368.39	93.42	95.84	1.50	83.74	
1413.75	93.42	95.84	0.00	45.36	K1
1498.34	93.08	93.04	1.00	84.60	
1715.90	93.08	93.04	0.00	217.55	K2
1728.02	93.09	93.44	1.00	12.12	
1932.92	93.09	93.44	0.00	204.90	K3
1966.47	94.21	93.43	1.00	33.55	
2211.25	94.21	93.43	0.00	244.78	终靶点

(3)二开水平段:  $\varnothing 215.9\text{ mm}$  钻头+近钻头发射短节+  $\varnothing 172\text{ mm}$  螺杆+近钻头接收短节+定向接头+  $\varnothing 172\text{ mm}$  无磁钻铤(MWD)+  $\varnothing 127\text{ mm}$  加重钻杆+  $\varnothing 127\text{ mm}$  钻杆。如图 3 所示。

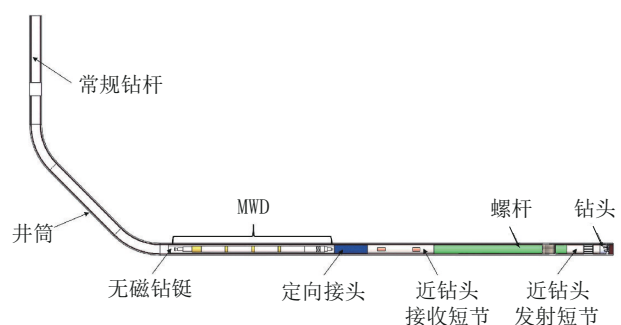


图 3 水平段钻具组合结构示意图

## 2.4 钻进参数优选

一开直井段采用防斜吊打方式,高转速,小钻压,大排量。二开直井段采用高转速,小钻压,大排量,提高喷嘴压降,充分发挥水力破岩作用。二开造斜段采用低转速,高钻压,适当加大排量,确保井下安全。二开水平段钻遇煤层段时采用低钻压、低转速、低排量、低射流冲击力的“四低”参数钻进。下钻到底提前 2 个单根开泵,小排量顶通后逐步增加至正常排量<sup>[13-14]</sup>。各开次钻进参数如表 2 所示。

表2 水平井钻进参数

开次	钻头 类型	钻头尺 寸/mm	钻压/ kN	转速/(r· min <sup>-1</sup> )	排量/ (L·s <sup>-1</sup> )
一开	PDC	311.2	50~70	80	32
二开直井段	PDC	215.9	30~50	80	32
二开造斜段	PDC	215.9	40~60	40	30
二开水平段	PDC	215.9	30~40	35	28

## 2.5 钻井液设计

根据地层情况,结合水平井储层保护要求,解决钻进施工面临漏失、坍塌、缩径等问题,进行钻井液设计。

(1)一开直井段为了防止黄土层、卵砾石层段发生坍塌、掉块等事故,使用大密度、高粘度的膨润土钻井液,有利于维持井壁稳定、携带岩屑。采用如下配方:5.0%~7.0% 膨润土+0.1%~0.2% 烧碱+0.1%~0.2% 纯碱+0.1%~0.3% 聚合物包被抑制剂+0.2%~0.5% CMC。开钻之前进行实验室水样分析,确定水中钙镁离子的含量。基于实验室数据采用Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>和NaOH对钻井液进行适当处理;调和出膨润土钻井液80 m<sup>3</sup>,钻井液的马氏粘度达到30 s。可以适当加入高分子聚合物以提高钻井液的携砂能力;钻至设计深度后彻底循环清洗井筒,保证后期套管的顺利下入。

(2)二开水平段之前钻井液配制可将一开钻井液用清水稀释,采用如下配方:清水+0.5%~1% HMP21+0.4%~0.6% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+0.2%~0.3% KPAM+0.3%~0.5% FT103+0.2%~0.5% CMC。加入KPAM、HMP21和Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>搅拌均匀充分水化,混合成90 m<sup>3</sup>高分子聚合物钻井液体系,所有添加剂加入后地面充分循环使钻井液密度达到均匀,采用KPAM限制地层造浆和控制粘土含量,采用HMP21降低滤失提高粘度,采用FT103加强泥饼质量降低水分在高温高压下的滤失,防止井眼坍塌,在钻水泥塞时及时排掉返出的钻井液,并根据钻井液的污染程度加入Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>进行处理,在钻进过程中要根据地层的变化及时调整钻井液的性能,避免钻井液漏失,根据地层的实际情况改变钻井液的密度。在井眼可能垮塌的井段,加入适量的防塌剂,防止井眼垮塌、钻井液漏失和井涌发生;为了保证井眼稳定及保护煤层,水平段采用聚合物钻井液体系,禁止使用大分子护剂类添加剂,钻进至目的煤层前

100 m对钻井液性能进行调整<sup>[15-16]</sup>。

## 3 地质导向技术

地质导向以随钻测井中方位GR数值、钻时、录井的岩屑及气测数据等作为综合评价依据。钻遇煤层顶底板,或者夹矸,GR值、钻时、岩屑、气测值均将发生变化,而钻时受多重因素影响,岩屑、气测等均受迟到时间影响,随钻方位GR将及时反映出钻头所处位置,及时指导钻井轨迹的调整,保证储层钻遇率。

### 3.1 地质导向工具

井下随钻测量及地质导向仪器是石油钻井过程中为实时获取井底真实地质参数而研发的一种智能型的测量系统。井下随钻测量及地质导向仪器主要有近钻头发射短节、近钻头接收短节、定向接头、配套的随钻测量仪器(Measure while drilling,简称MWD)等部分组成。近钻头仪器包括安装在钻头与螺杆之间的近钻头测量短节(发射短节),在螺杆与无磁钻铤之间安装的近钻头接收短节,和配备无线接收短节的MWD。近钻头测量仪器实时测量的是近钻头井斜以及地层方位伽马等地质信息,通过跨螺杆通信传输给近钻头接收短节,再通过无线通信传输到MWD,MWD实时测量的井斜、方位、定向工具面等工程信息,需通过钻井液高、低脉冲压差传输到地表,供现场工程师进行轨迹调整决策,钻井液脉冲信号的产生是由井下MWD的脉冲器进行。近钻头仪器利用高精度加速度传感器动态测量钻头姿态,利用低频电磁波脉冲向接收工具传输近钻头处的实时测量数据,为伽马敏感地层地质导向提供参考。其测量的参数比常规MWD提前13 m以上,距离钻头只有0.6 m,可准确获取井下钻头处的动态方位伽玛数据和静态井斜数据,解决常规伽玛地质导向工具的不足。近钻头仪器主要适用于定向井、水平井和联通井,为复杂地层、薄油层的开发提供先进的工具,推动超薄油层及各类复杂油气层的开采,缩短钻井周期,降低钻井成本<sup>[17-19]</sup>。近钻头导向工具如图4所示。

### 3.2 标志层选取

标志层具有分布范围广、层位稳定、岩性特征明显、易于鉴别的特点。对邻井测井、钻探资料进行地层对比分析,邻井煤层测井曲线图如图5所示。根据邻井测井显示,15-2号煤层厚度4.5~6.8 m。在





图 4 近钻头导向工具连接示意

施工过程中及时通过方位伽马数据,和邻井煤层伽马数据拟合,判断钻头所处煤层位置,控制轨迹在煤层上部距离煤层顶 0.5~2.0 m 内煤质较好层段穿行。

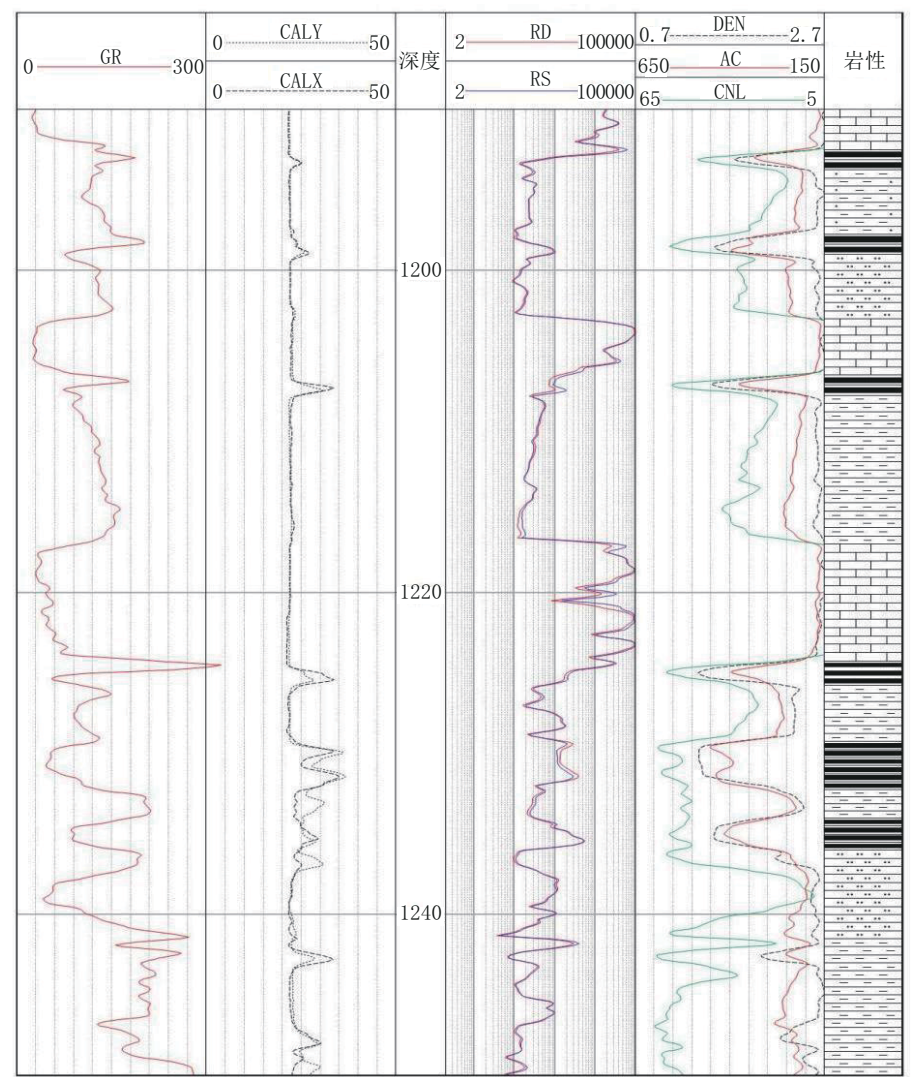


图 5 临井 15-2 号煤层测井曲线

3.3 SX-XX井地质导向

根据钻井揭露的地层信息验证标志层,利用钻时录井资料、钻进参数、MWD 参数及煤层底板等高线图,及时判断钻头位置距离目的煤层的空间位置,通过及时调整井眼轨迹,保证入窗井斜角与地层倾角适配,最后顺利实现无导眼直接一次着陆入窗,水平段通过钻时录井、气测录井、钻进参数录井、尤其

是近钻头地质导向工具跟踪实时监测。利用平均伽马曲线(GR)初步判断钻头进出煤层情况,根据上伽马(HiGm)、下伽马(LoGm)进一步判断煤层的顶底板<sup>[20-21]</sup>,实时监测曲线如图 6 所示。该井煤层的伽马值一般在 50 API 以下,根据上下伽马值变化,及时调整井眼轨迹,使钻头一直处于储层当中。采用地质导向与几何导向相结合并眼轨迹控制技术,最

终使实钻轨迹高度耦合设计轨道,井眼轨迹控制在靶区范围内,煤层钻遇率达到了100%。整井钻井周期15 d,造斜段用时118 h,水平段用时106 h,水平段与造斜段均采用一趟钻完成,实现了安全、高效钻进。

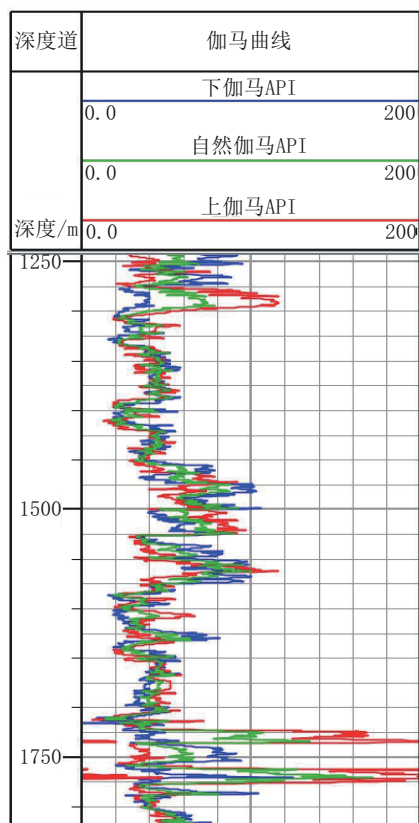


图6 SX-XX井随钻伽马实时监测曲线

#### 4 结论

(1)在晋城沁水柿庄煤矿充分利用邻井资料和钻时、岩屑录井资料及地质导向随钻测量系统,选择合适标志层,实现水平井无导眼安全、高效着陆入靶,缩短了单井建井周期,降低了煤层气水平井施工成本。

(2)采用柔性钻具组合、选择合理钻进参数,结合井眼轨迹精细化控制技术,实现松软煤层安全高效钻进。

(3)采用近钻头地质导向技术,实现了100%的煤层钻遇率,提高单井产气量和煤层气采收率。

#### 参考文献:

- [1] 赵建新.煤层气水平井钻进技术分析及应用优选[J].能源技术与工程,2021,46(3):163-165.
- [2] 王占强,任贵阳.沁水盆地煤层气水平井钻进技术应用总结[J].世界有色金属,2019(12):204-205.
- [3] 张双斌,刘国伟,季长江.煤层气水平井技术应用分析及优化[J].煤炭工程,2021,53(3):93-97.
- [4] 胡秋嘉,李梦溪,贾慧敏,等.沁水盆地南部高煤阶煤层气水平井地质适应性探讨[J].煤炭学报,2019,44(4):1178-1187.
- [5] 苏旭楠,王涛,曾佑元.煤层气水平井施工井漏问题及解决办法[J].煤炭技术,2020,39(9):43-45.
- [6] 杨恒林,汪伟英,田中兰,等.煤层气储层损害机理及应对措施[J].煤炭学报,2014,39(S1):158-163.
- [7] 崔晓松,周瑞,张凯.沁水盆地寿阳西部地区煤层气资源潜力评价[J].煤炭科学技术,2022,50(7):224-232.
- [8] 李贵山,于振锋,杨晋东,等.沁水盆地郑庄区块煤层气水平井钻井体系优化[J].煤炭科学技术,2023,51(4):118-126.
- [9] 王宇红,孙天玉,李鹏.沁水盆地深部煤层气水平井定向钻进地质导向技术[J].煤矿安全,2023,54(6):41-46.
- [10] 许耀波,朱玉双,张培河.沁水盆地赵庄井田煤层气产出特征及其影响因素[J].天然气地球科学,2019,30(1):119-125.
- [11] 刘明军,李兵,黄巍.煤层气水平井无导眼地质导向钻进技术[J].煤田地质与勘探,2020,48(1):233-239.
- [12] 张洪,何爱国,杨风斌,等.“U”型井开发煤层气适应性研究中[J].中外能源,2011,16(12):33-35.
- [13] 曹立虎,张遂安,石惠宁,等.煤层气多分支水平井井身结构优化[J].石油钻采工艺,2014,36(3):10-14.
- [14] 牟全斌,韩保山,张培河,等.潘庄地区煤层气U型水平井技术工艺研究[J].中国煤炭地质,2014,26(11):53-56.
- [15] 任美洲.松软储层煤层气水平井钻井液技术[J].石化技术,2021,28(8):98-99.
- [16] 岳前升,陈军,邹来方,等.沁水盆地基于储层保护的煤层气水平井钻井液的研究[J].煤炭学报,2012,37(S2):416-419.
- [17] 林听,苑仁国,韩雪银,等.地质导向钻井轨迹控制技术[J].钻采工艺,2021,44(2):5-8.
- [18] 林听,苑仁国,谭伟雄,等.地质导向钻井着陆关键技术及分析图版[J].断块油气田,2021,28(5):700-705.
- [19] 申鹏磊,白建平,李贵山,等.深部煤层气水平井测-定-录一体化地质导向技术[J].煤炭学报,2020,45(7):2491-2499.
- [20] 于华伟,王文定,张丽,等.随钻方位伽马测井方位灵敏特性研究[J].核技术,2021,(1):43-48.
- [21] 武程亮.方位伽马在煤层气水平井中的应用[J].钻探工程,2021,48(5):69-75.

(编辑 周红军)