

# 地质导向技术在HY1HF井随钻中的应用

周进峰, 杨 艳, 仇永峰, 付 茜, 刘志敏  
(中国石化江苏油田分公司勘探开发研究院, 江苏 扬州 225009)

**摘要:**地质导向是提高水平井靶窗钻遇率和单井产量的基础。针对花庄地区阜二段页岩层产状变化大、水平段发育断层、井震误差大等难点问题,通过建立地层标志点,开展地层视倾角和靶点垂深预测,以及随钻地层可能出现的4种情况进行分析,指导完成了江苏油田首口页岩油水平井HY1HF井的地质导向工作。HY1HF井水平段靶窗钻遇率达95%,为该井的成功压裂试获工业油流奠定了良好的基础。

**关键词:**地质导向;页岩油;水平井;高邮凹陷

**中图分类号:**TE122 **文献标志码:**A

## Application of geo-steering technology in HY1HF horizontal well while drilling

ZHOU Jinfeng, YANG Yan, QIU Yongfeng, FU Qian, LIU Zhimin

(Exploration and Development Research Institute of Jiangsu Oilfield Company, SINOPEC, Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** Geosteering is the basis for improving target window drilling rate and single well production in horizontal wells. By establishing stratigraphic marker points, the stratum apparent dip angle and the vertical depth of the target point were predicted, along with four possible situations of the formation while drilling were analyzed, to address difficult problems such as the large variety of shale layer occurrence in the second member of the Funing Formation in the Huazhuang area, the development of faults in the horizontal section, and the large well-seismic error. And then the geo-steering work of the first shale oil horizontal well HY1HF was completed in Jiangsu Oilfield. In the horizontal section of well HY1HF, the target window drilling rate reached 95%, providing a solid base for a successful fracturing test to produce industrial oil flow in the well.

**Key words:** geo-steering; shale oil; horizontal well; Gaoyou Sag

地质导向技术是指在水平井钻进过程中,根据随钻测井、录井的实时参数与导眼井进行对比分析<sup>[1-4]</sup>,及时判断钻头所处地层位置,并与导眼井进行对比,判断构造是否存在变化,是否需要及时调整井轨迹的技术。在随钻导向过程中,如何确保准确进入靶窗以及水平段井轨迹的控制,是保证最大限度提高优质页岩储层钻遇率的关键所在。地质导向技术在我国四川盆地页岩气的勘探开发中应用比较多<sup>[5]</sup>,技术相对成熟,尤其川南地区页岩气开发的主力目标层仅有3 m厚,通过地质导向技术的应用,从该区已完钻的多口水平井效果来看,水平段优质页岩箱体钻遇率能达96%。目前,适合江苏油田花庄地区页岩油的随钻地质导向技术尚处于摸索阶段,无借鉴实例。本文重点利用现场随钻测井和地震数据体等资料,探索研究花庄地区页岩油随钻地质导向技术,初步形成一套适用于该地区的水平井随钻导向技术,这对于后续页岩油水平井钻

探具有重要指导意义。

## 1 概况

HY1HF井位于高邮凹陷深凹带—内坡带的花庄构造。本构造处于有利含油气构造,地层整体表现为南倾北抬的特征,发育一系列近东西向和东北向正断层。本区阜二段( $E_{1f_2}$ )为深湖相沉积,岩性以暗色的含灰、含云泥页岩及泥灰岩为主,生烃能力强,厚度在240~280 m。有机质类型以I、II<sub>1</sub>型为主,II<sub>2</sub>型次之,泥页岩成熟度在0.8%~1.1%。 $E_{1f_2}$ 泥页岩自上而下分为5个亚段,分别对应I、II、III、

收稿日期:2022-01-09;改回日期:2022-07-11。

第一作者简介:周进峰(1986—),副研究员,现从事石油地质综合研究工作。E-mail:zhoujinf.jstt@sinopec.com。

基金项目:中国石化科技部项目“苏北盆地陆相页岩油富集条件与勘探评价研究”(P21113)。

IV、V亚段。纵向上发育三套页岩油有利组合,分布在Ⅱ-Ⅲ、IV、V亚段内,三套有利页岩层厚度均大于

60 m。HY1HF井是针对V亚段4-7小层部署实施的一口页岩油水平井。

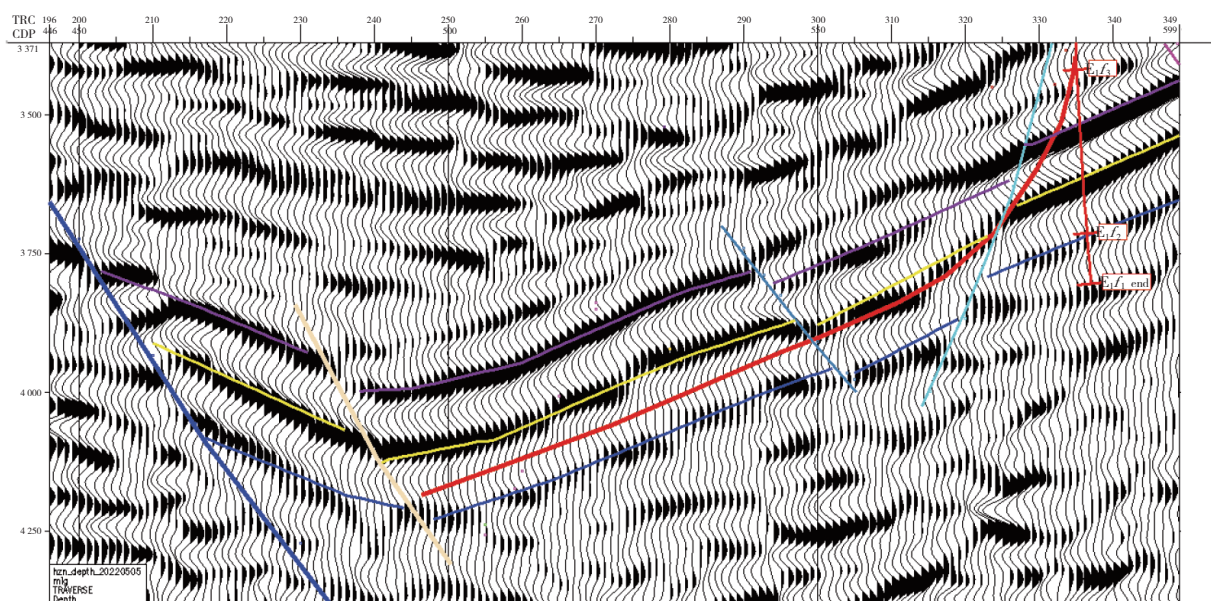


图1 HY1HF设计井轨迹地震剖面

HY1HF井是江苏油田针对页岩油部署的首口水平井,由于本区所处构造相对复杂,发育低序级断层(断距小于20 m),地层倾角变化较大( $0^{\circ}\sim 18^{\circ}$ )以及地震资料尺度大等一系列不利因素(图1),导致水平井入靶及井轨迹控制具有一定难度,从而影响目的层的钻遇效果。地质导向技术可以通过随钻测量的多种地质和工程参数对所钻地层地质参数进行实时对比<sup>[2-3]</sup>,依据对比结果调整井眼轨迹,确保命中最佳甜点层并在其内穿行。

## 2 随钻地质导向技术

本次针对花庄地区页岩油水平井如何入靶以及在钻探过程出现的几种地层变化情况等方面进行了分析和归纳,主要包括以下几方面内容。

### 2.1 建立地层识别标志点

标志点的重要性在于通过该标志点可以明确判断钻头所处地层层位与设计是否一致,进一步指导下步如何钻探<sup>[6-7]</sup>。随钻地质导向之前,可以利用导眼井(或区域已钻井)的测井曲线、元素录井、地化录井、地震数据体及气测显示情况等多种资料进行综合标定,建立可靠的地层标志点。

#### 2.1.1 利用测井曲线建立稳定的地层标志点

测井曲线对比是判断地层的有效手段之一,通常将测井曲线的变化趋势及其在区域上表现出的

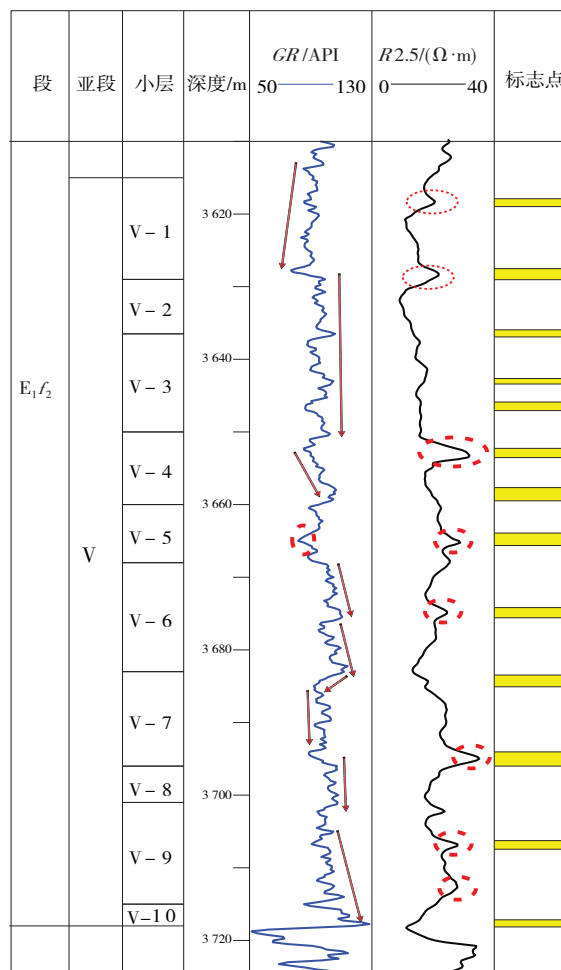


图2 导眼井HY1井V亚段页岩油电性标志点分布

特殊变化点作为地层识别的重要参考点。地质导向技术中随钻数据主要利用伽马( $GR$ )曲线和电阻率( $R_t$ )曲线,因此优先对导眼井及区域上探井的 $GR$ 和 $R_t$ 曲线进行对比,细化分析寻找特殊变化点,建立地层标志点。花庄地区的优势页岩油层段V亚段表现出 $GR$ 曲线有23个特征点, $R_t$ 曲线存在8个特高值,据其电性特征将V亚段细分为10个小层。

其中,V-1小层的 $GR$ 值由高变低趋势特征明显,在其顶、底部 $R_t$ 值均为高值,V-4小层的 $GR$ 值则由低变高趋势明显,V-5小层中部的 $GR$ 值为V亚段最低,V-7小层底部 $R_t$ 值是V亚段最高,V-10底部 $GR$ 值为V亚段最高(图2)。此外,结合周边探井,发现V亚段 $GR$ 曲线存在高低两个台阶,其中高台阶为V-2、V-6、V-8小层,低台阶为V-5、V-7小层(图3)。

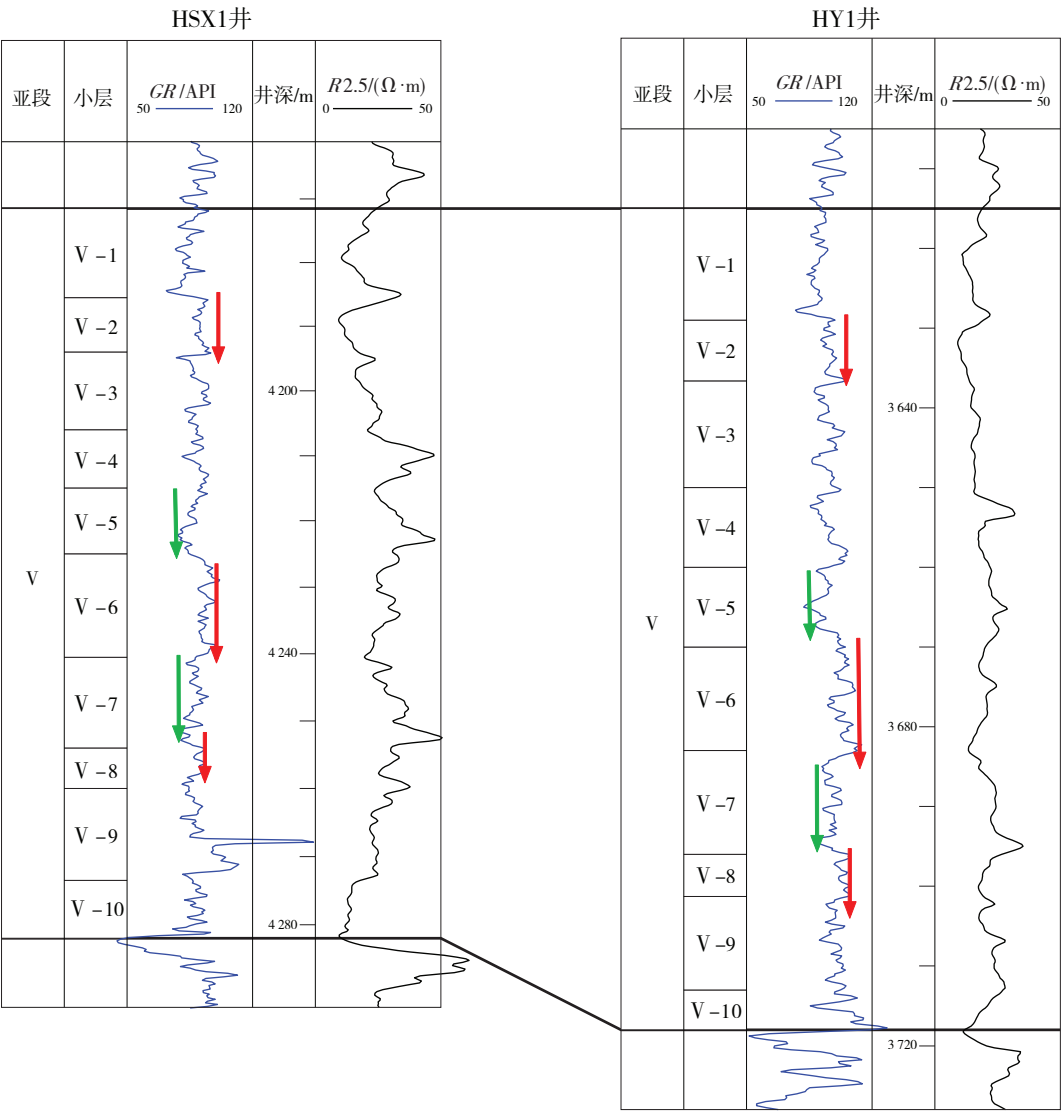


图3 HSX1井-HY1井对比

**2.1.2 利用元素和地化录井建立相对稳定的地层标志点**

在水平井随钻过程中,依据元素录井和地化录井中钙、镁、磷等微量元素的变化趋势及有机碳、游离烃 $S_1$ 的变化规律,以及结合花庄地区 $E_{1f2}$ 各亚段泥页岩特征,总结出“块状低钙定泥底(Ⅰ/Ⅱ亚段界限)、块状镁升定王底(Ⅱ/Ⅲ亚段界限)、高钙高碳定尖峰、低钙低碳定低阻”等规律,主要用于判断Ⅰ、

Ⅱ、Ⅲ亚段的地层界线以及Ⅳ亚段的高阻灰云质泥岩、低阻泥岩界面。但由于岩屑归位问题,本方法仅适用于各亚段页岩层界面及Ⅳ亚段内高电阻尖峰标志层的识别。

**2.1.3 利用地震数据体建立相对稳定的地层标志点**

在设计水平井轨迹剖面时,应优先选取区域地层稳定,断层分布少的地区,以减少断层的影响。

随钻过程中,可以依据导眼井各小层在地震剖面上的分布位置及明确的波组特征,指导水平井的小层分布及穿行轨迹。但通常由于地震资料尺度较大,精度不足以完全满足 10 m 左右小断层的识别和刻画,当断层发育和地层倾角发生变化时,都会导致水平井在钻探过程中层位变化,尤其远离导眼井,小层的位置存在着一定误差。

#### 2.1.4 利用气测及钻时建立不稳定的地层标志点

处于统一稳定的沉积-构造演化环境下,该地区的气测和钻时对于特殊段地层判断具有可参考性,但是由于其不稳定性,仅作为辅助判断。例如, HY1HF 导眼井 E<sub>1</sub>f<sub>2</sub>V 亚段 V-4、V-5 和 V-6 小层全烃值较高,最高达到 99.99%,周边的 HSX1 井 V 亚段则 V-5 和 V-7 小层全烃值较高,最高达到 99.99%,因此 V-5 的气测值相对较高,可指导 V-5 小层的判断。钻时在同一施工条件下,对于砂泥岩界面识别有一定的参考性,但由于钻头的磨损和钻压的影响,仅起到辅助作用。

### 2.2 地层视倾角及靶点垂深预测

在随钻地质导向过程中,及时的地层倾角预判和 A 靶点垂深预测,对于水平井能否以合适的井斜角入靶至关重要。钻探过程中,及时计算地层视倾角以及 A 靶点垂深,依据计算情况对井轨迹进行调整,确保精准入靶。例如当预测目的层变浅,则应提前增斜,避免入层后井轨迹难以调整,过快钻穿靶窗内的油层。当预测目的层加深,则应结合靶窗内油层的厚度及钻井工具的零长和造斜能力,及时预测合理的入层角度,调整井斜角,以合理的角度入层,再稳斜钻进。

地层视倾角的预测包括两种方法,一种方法为同层面法,是利用导眼井和水平井两口井的同一层界面为标准点,根据两者之间闭合位移  $\Delta X$  和垂厚差  $\Delta Z$  来定量计算地层视倾角(图 4a)。适用条件为导眼井到水平井距离较近,且两者之间地层产状稳定,没有明显的变化。套用式(1),求取地层倾角;另一种方法为等厚法,优先确定水平井上两个明确的标准点,利用两者之间的平面位移  $\Delta X$  和对应到导眼井两个标准点之间的垂厚来定量计算地层倾角(图 4b)。适用条件为水平井与导眼井的两个标准点特征清晰明确,地层连续,倾角变化小。套用式(2),求取地层倾角。

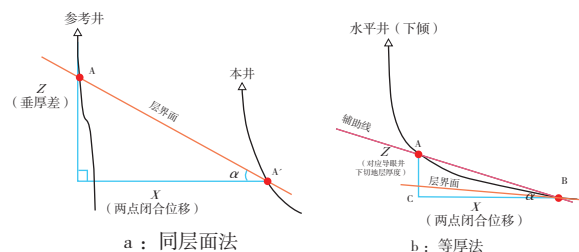


图 4 计算地层视倾角的两种方法

$$\alpha = a \tan [(\Delta Z)/\Delta X] \quad (1)$$

$$\alpha = a \tan [(AC - \Delta Z)/\Delta X] \quad (2)$$

其中: $\alpha$ 为地层倾角, $^{\circ}$ ;  $\Delta Z$ 为两口井同一层界面之间的垂厚差(同层界面法)或导眼井两个标准点间的垂厚(等厚法),m;  $\Delta X$ 为两口井同一层界面两点间的闭合位移(同层界面法)或水平井上两个标准点间的闭合位移(等厚法),m。

A 靶点垂深的预测,在确定地层倾角后,可以利用测算点到 A 靶点的闭合位移( $\Delta X/m$ )和导眼井测算点到 A 靶点对应位置的垂厚( $\Delta h/m$ )来计算得出(图 5)。如式 3、4 所示。

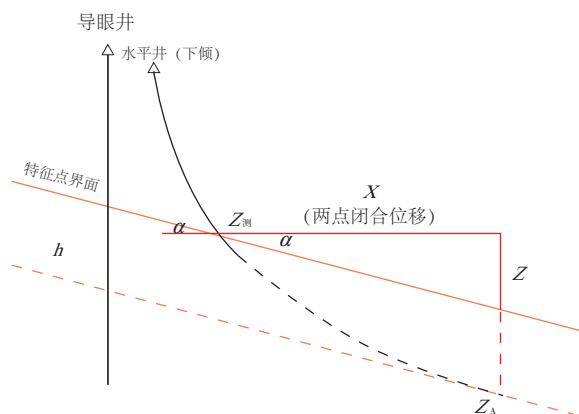


图 5 预测 A 靶垂深的方法

$$\Delta Z = \Delta X \tan (\alpha) \quad (3)$$

$$Z_A = Z_{\text{测}} + (\Delta h + \Delta Z) \quad (4)$$

其中: $\alpha$ 为地层倾角, $^{\circ}$ ;  $\Delta X$ 为水平井测算点到 A 靶点位置的闭合位移,m;  $\Delta Z$ 为  $\Delta X$  所计算的垂厚,m;  $\Delta h$ 为导眼井上测算点到设计 A 靶点对应层位的垂厚,m;  $Z_A$ 为 A 靶垂深,m;  $Z_{\text{测}}$ 为水平井测算点垂深,m。

随钻地质导向过程中,动态地利用同一界面法和等厚法预测地层视倾角及 A 靶点垂深,可以及时做出判断,动态调整井轨迹,确保轨迹以一个合理的井斜角进入 A 靶点。水平段井轨迹的控制,则可根据地层倾角、井斜角和斜厚,定量预测水平井对应导眼井的厚度和距下个标志点的厚度,做出预判,控制水平井穿行轨迹,确保以较小的角度在靶



窗内平稳穿行,期望钻遇较多的优质储层段。

2.3 随钻地层特征

地层对比是随钻工作中的一项基础且重要的工作,地层判断的可靠与否决定着水平段井轨迹是否需要调整。从最终钻探结果来看, HY1HF 井较为复杂,钻遇多条小断层,随钻过程中地层主要出现了以下四种情况,可以指导本地区后续页岩油水平井的钻探。

2.3.1 地层正常下切

水平井正常钻进过程中,保持地层正常下切。例如 HY1HF 井的 V-1 和 V-2 小层较为典型,通过与导眼井进行对比, V-1 小层 GR 曲线表现为两段式,先平整,后由大变小趋势明显,电阻率在 V-1 小层顶、底部的高电阻均较明显。 V-2 小层伽马为高台阶、低电阻,与导眼井特征也较为符合(图 6a)。

2.3.2 地层上切

当水平井轨迹与地层下切方向一致时,随着水

平井井斜角增大,井轨迹与地层之间的夹角低于 0°时,则水平井所钻地层为之前重复地层,表现为地层回切现象。测井曲线典型特征为回切点前后的曲线呈镜像关系(图 6b),例如 HY1HF 井 3 980 m 至 4 130 m 为明显的回切特征,回切点在 4 030 m 左右,由 V-3 的中部向上回切至 V-3 顶部。回切点的地层倾角为 17°,井斜 78.47°,推算回切角为-5.47°。

2.3.3 顺层切

水平井钻进过程中,当井轨迹与地层之间的夹角处于-1°~1°之间,则基本会顺沿着地层平行钻进。测井曲线表现为反复波动,呈“弹簧状”连续分布特征(图 6c)。例如 HY1HF 井的 5 280~5 395 m 井段,本段井斜角 79.5~80.9°,地层倾角约 10°,井轨迹与地层之间的夹角为 0.5°到-0.9°期间变化,据经验公式推算,水平井轨迹沿着约 10 cm 的地层上下钻进,对应导眼井 HY1 井的 3 666.3~3 666.4 m。

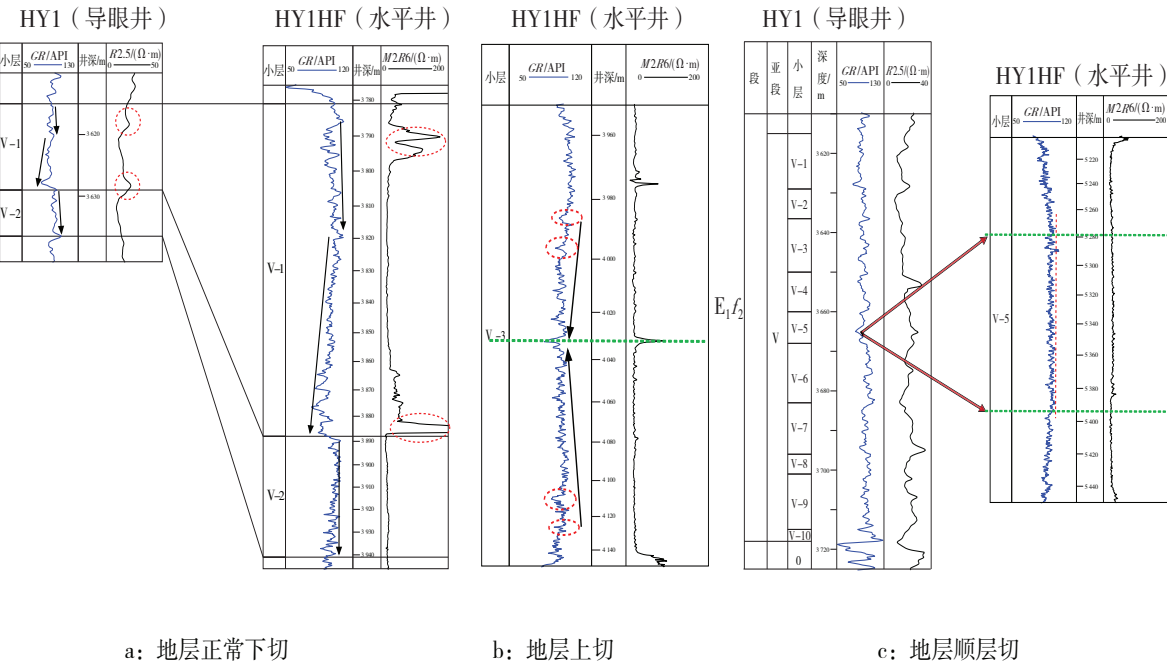


图6 水平井钻进过程中地层的三种情况

2.3.4 地层断缺或者重复

HY1HF 井区地层产状整体为南倾北抬,当断层为北掉断层,则地层断缺,当断层为南掉断层,则地层出现重复。

由于靶窗内各小层厚度小,均不超过 13 m,当存在小断层时,两侧地层会有错位现象。因此,随钻地质导向过程中,须在地震资料预警断层的区

域,加强地层对比,注意识别断层,优化井轨迹,确保水平井轨迹在靶窗内穿行。若断层后地层为已钻重复地层,须在断层前适当降井斜;当断层后地层缺失,为未钻遇的新地层,则须在断层前适当增井斜,确保水平井不出靶窗。 HY1HF 井钻遇多条断层,断距从 8~20 m 不等(图 7),对地层影响较大,需要进一步加强对断层的识别和刻画。

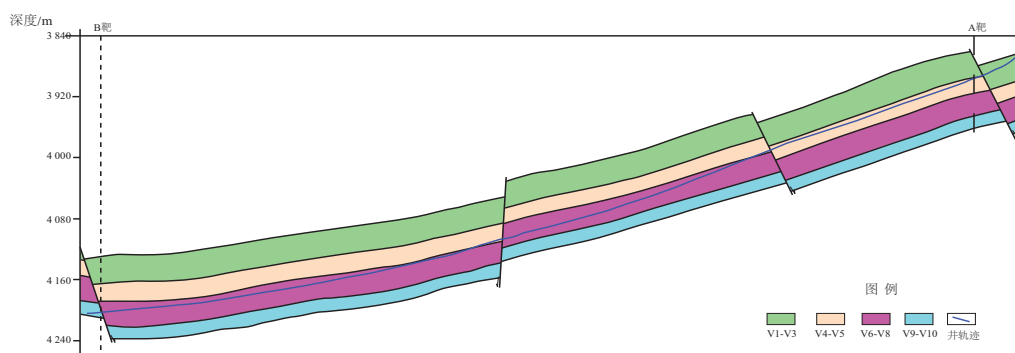


图7 HY1HF井钻后地质模型

### 3 钻探情况

地质导向技术的应用确保HY1HF井能够精准入靶,并在水平段钻探过程中,考虑断层的影响,及时调整井轨迹,确保水平段基本在靶窗内平稳穿行。HY1HF井设计AB靶段长1281m,实钻1278m,靶窗内(V-4至V-7小层)的穿行厚度为1218m,靶窗钻遇率达95%,为后期本井成功压裂试获工业油流奠定了良好的基础。

### 4 结论

(1)通过HY1及周边探井稳定的测井曲线特征、较稳定的元素、地化录井特征和地震剖面特征以及不太稳定的气测和钻时等资料来综合标定,建立了花庄地区V亚段地层标志点。其GR曲线存在高低两个台阶,高台阶为V-2、V-6、V-8小层,低台阶为V-5、V-7小层,GR曲线上存在23个标志点,Rt曲线有8个标志点。

(2)随钻过程中,利用同一界面法和等厚法及时开展地层视倾角及A靶点垂深预测,确保水平井能够精准进入靶窗。进入水平段后,HY1井的钻探揭示了地层会出现4种情况,地层正常下切、上切、顺层切以及地层重复(断缺)等。根据这4种情况,应及时判断,动态调整,进一步优化水平井轨迹,确

保钻遇更多甜点层。

(3)利用地质导向技术指导完成HY1HF井水平钻进,本井钻遇多条小断层,仍保持在靶窗内穿行。HY1HF井实钻A-B靶段长1278m,靶窗钻遇率达95%,为后期本井成功压裂试获工业油流奠定了良好的基础。

#### 参考文献:

- [1] 杨邵存,李长洪,施宝海,等.大港油田页岩油水平井地质导向技术研究与应——以GD区块GD2H井为例[J].录井工程,2018,29(4):24-28.
- [2] 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.
- [3] 刘旭礼.页岩气水平井钻井的随钻地质导向方法[J].钻井工程,2016,36(5):69-73.
- [4] 刘乃震,王国勇,熊小林.地质工程一体化技术在威远页岩气高效开发中的实践与展望[J].中国石油勘探,2018,23(2):59-68.
- [5] 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.
- [6] 袁昭,李艳明,陶林本,等.吐哈油田水平井随钻地质导向技术研究[J].石油钻探技术,2007,36(3):87-90.
- [7] 孙林,柳金钟,侯鲁亮,等.中原油田水平井地质导向技术研究与应用[J].录井工程,2010,21(1):11-15.

(编辑 刘义梅)