

# 三维水平井靶前距的 COMPASS 优化设计

张 胜

(大庆钻探工程公司钻井工程技术研究院, 黑龙江 大庆 163413)

**摘要:** 为保证三维水平井钻井施工安全、高效, 顺利钻达地质目标层, 使用 COMPASS 软件对三维水平井轨道进行了优化设计研究, 通过模拟分析, 总结出了三维水平井靶前距设计规律, 提出了最小纵向靶前距概念, 为三维水平井靶前距优化设计提供了依据。

**关键词:** 三维水平井; 最小纵向靶前距; 靶前距设计; COMPASS

**中图分类号:** TE243 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 - 7428(2016)12 - 0006 - 06

**Optimizing Design of the Pre-target Displacement of a Three-dimensional Horizontal Well/ZHANG Sheng** (Drilling Engineering Technology Research Institute, Drilling and Exploration Engineering Corporation, Daqing Heilongjiang 163413, China)

**Abstract:** In order to ensure a three-dimensional horizontal well to be drilled to the geological target safely and efficiently, the optimal design and research on trajectory of three-dimensional horizontal well was made by using COMPASS software. The design rules for the pre-target displacement of three-dimensional horizontal wells have been concluded by computer simulation study. The minimum longitudinal pre-target displacement was put forward. These provide the basis for the optimal design of the pre-target displacement of 3 - D horizontal wells.

**Key words:** three-dimensional horizontal well; minimum longitudinal pre-target displacement; pre-target displacement design; COMPASS

三维水平井是由于地面受限或井下障碍物的影响而设计的绕障井, 近年来随着致密油气藏的开发, 工厂化水平井多采用三维井眼轨道设计。仅从钻井施工的角度讲, 工厂化水平井地质整体部署, 统筹施工, 可切实有效减少井场征地面积, 减少钻前投资, 减少设备动迁。但在施工过程中, 既要表层及上直段防碰, 又要斜井段防碰, 增加了井眼轨迹控制和防碰难度。因此在地质整体部署之初做好三维水平井靶前距设计是井眼轨道优化的先决条件, 是保证三维水平井钻井施工安全、高效, 顺利钻达地质目标层的基础。

## 1 靶前距设计定义

### 1.1 靶前距(靶前位移)

靶前距是指靶点至井口所在铅垂线的距离。

三维水平井的井口铅垂线不在水平段的延长线上, 靶前距存在 2 个分量, 一个是与水平段平行的纵向靶前距, 一个是与水平段垂直的横向靶前距(也称为井口偏移量), 如图 1 所示。

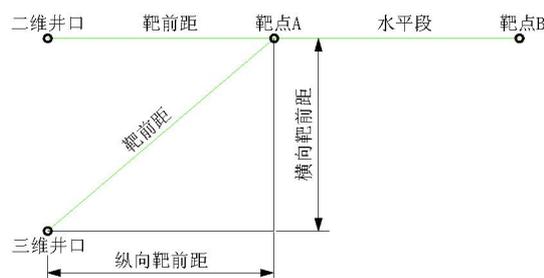


图 1 水平井靶前距

### 1.2 纵向靶前距

当一个井眼以一定曲率造斜后, 则该曲率下的最小纵向靶前距也随之被确定。例如一个  $6^\circ/30\text{ m}$  曲率的二维单增剖面井眼轨道, 从井斜  $0^\circ$  增斜至  $90^\circ$  时, 其靶前距约为(曲率半径)286.48 m, 亦可以称为该曲率下的最小靶前距。在地层倾角的影响下, 入靶后水平段的井斜角  $< 90^\circ$  时, 靶前距则  $< 286.48\text{ m}$ ,  $> 90^\circ$  时, 则  $> 286.48\text{ m}$ , 本文仅以水平段井斜角为  $90^\circ$  的情况为例做针对性的探讨分析。

不论二维或三维水平井, 在以相同的  $6^\circ/30\text{ m}$  曲率造斜情况下, 若设计井给定的纵向靶前距小于

收稿日期: 2016 - 03 - 09; 修回日期: 2016 - 09 - 28

作者简介: 张胜, 男, 汉族, 1966 年生, 工程师, 从事钻井工程及相关科研工作, 黑龙江省大庆市红岗区八百垅, zhangsheng1@petrochina.com.cn。

最小纵向靶前距 286.48 m 时,都会出现从井口向水平段延长线相反方向增斜钻进的现象,在投影图上因位于井口与水平段相反方向上,故该段纵向靶前距为负数、为负位移。

二维井眼负位移:先以与水平段相反方向增斜钻进,再降井斜角为 0°,完成靶前距上的负位移量,然后从井斜角 0°开始增斜钻进至井斜角 90°入靶,其负位移量与正位移量相加为 286.48 m,如图 2 所示。

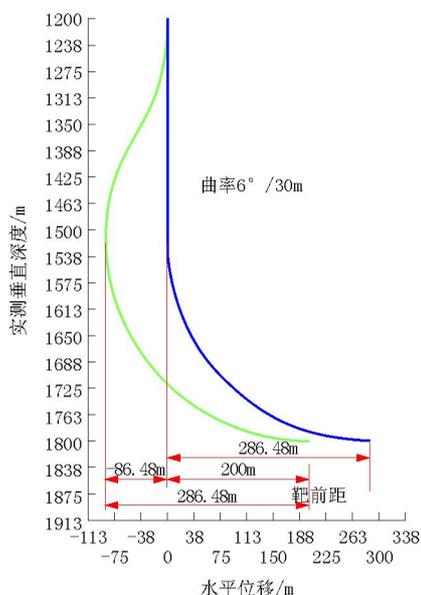


图 2 二维水平井靶前距负位移量

三维井眼负位移:先以一个大于 90°的方位角增斜钻进,再增斜扭方位至 90°,完成纵向靶前距上的负位移量,然后从方位角 90°开始增斜扭方位钻进至方位角 0°、井斜角 90°入靶,其负位移量与正位移量相加为 286.48 m,如图 3 所示。

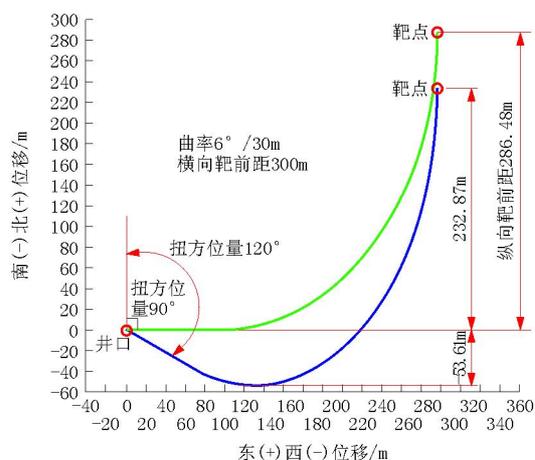


图 3 三维水平井纵向靶前距负位移量

假设以 6°/30 m 的曲率造斜,给定横向靶前距 300 m,钻至井斜 90°,增斜的同时完成扭 90°方位,利用 Landmark 软件 COMPASS 模块(计算机辅助设计和测量分析系统)从扭方位量 60°~120°对三维水平井眼纵向靶前距的影响进行研究,如图 4~7 所示。

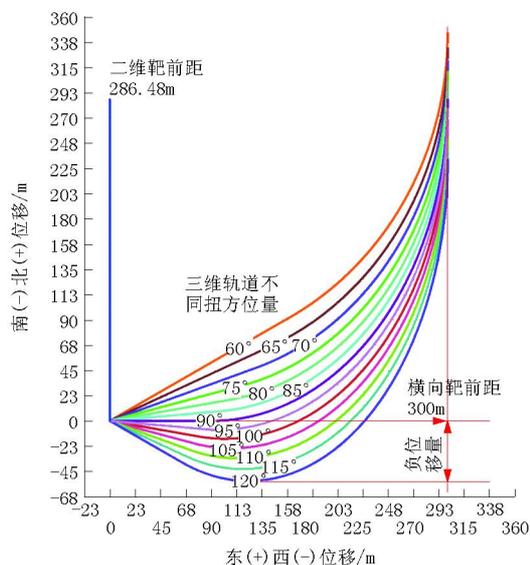


图 4 横向靶前距 300 m,不同扭方位量的水平投影

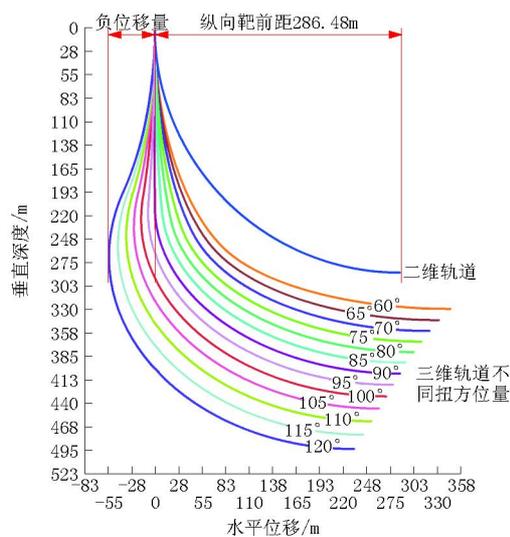


图 5 横向靶前距 300 m,不同扭方位量的垂直投影

通过软件模拟计算得到以下结论:

- (1) 当三维水平井扭方位量为 90°时,在 6°/30 m 的曲率下,三维井眼最小纵向靶前距和二维井眼的靶前距相等,都为 286.48 m;
- (2) 当三维水平井设计的纵向靶前距比最小纵向靶前距 286.48 m 大时,则扭方位量 < 90°,且纵向靶前距越大,扭方位量越小;

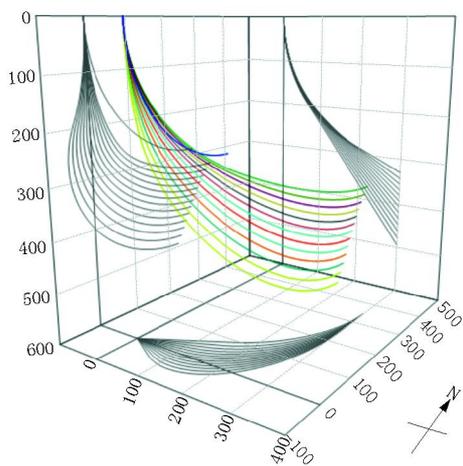


图6 横向靶前距300 m,不同扭方位量的立体图

向靶前距286.48 m小时,则扭方位量  $> 90^\circ$ 。纵向靶前距的负位移量越大,扭方位量越大。此时的纵向靶前距分为井口与水平段同侧的正值区和与水平段相反的反值区,相加后的和为最小纵向靶前距长度286.48 m。

(4) 扭方位量越大,需要的垂直深度增量越大。

### 1.3 横向靶前距

三维井眼水平井在造斜段采用  $6^\circ/30\text{ m}$  曲率的双增剖面(定方位增斜-增斜扭方位)钻至井斜  $90^\circ$  入靶,设定纵向靶前距为一定值286.48 m,也就是扭方位  $90^\circ$  时,对不同横向靶前距进行研究,如图8所示。

### (3) 当三维水平井设计的纵向靶前距比最小纵

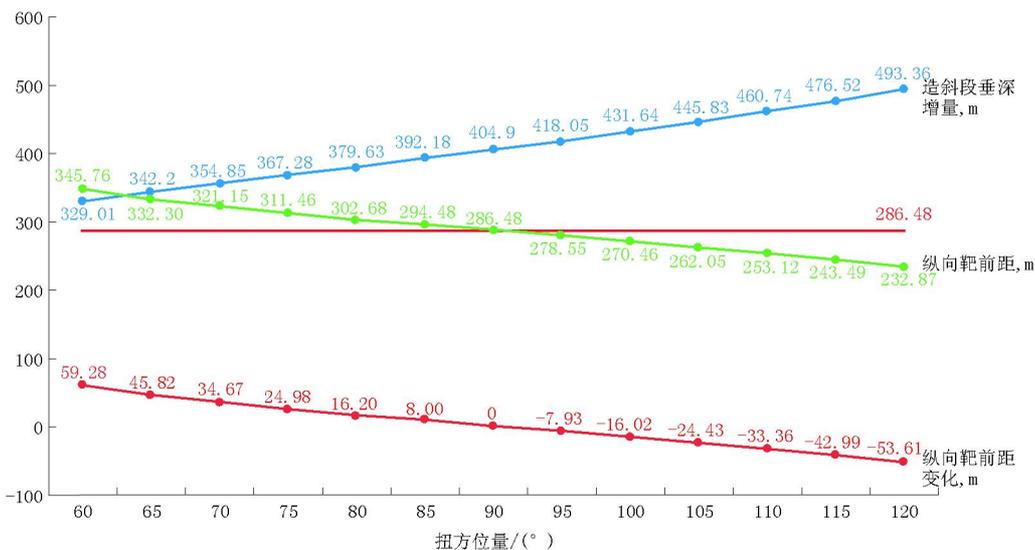


图7 横向靶前距300 m,纵向靶前距随扭方位量变化

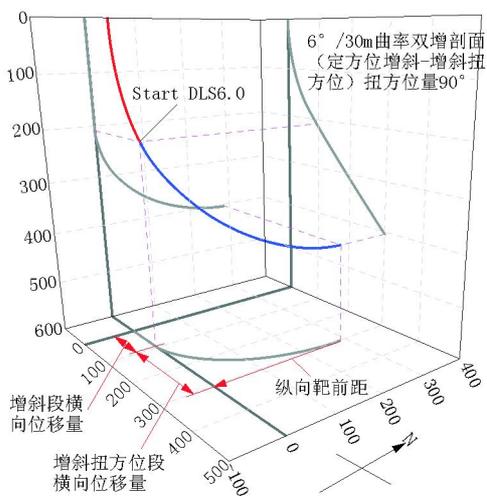


图8 双增剖面,横向位移量分布

横向靶前距的位移量是先以一定的方位进行增斜钻进,完成部分横向位移,再通过增斜、扭方位完成其余横向位移量,如图9所示。

从以上计算可以知道,在三维井眼中,纵向靶前距为286.48 m时,不同横向靶前距的轨道表现为开始扭方位钻进的井斜角不同,如图10、11所示。

通过软件模拟计算得到以下结论:

(1) 三维水平井的横向位移量不受纵向靶前距或曲率的影响。

(2) 横向靶前距不同,所需增斜扭方位的井斜角不同。横向靶前距越小,扭方位时的井斜角越小,扭方位越快,造斜进尺越少。

(3) 横向位移量为300 m时需要的垂直增量最大。

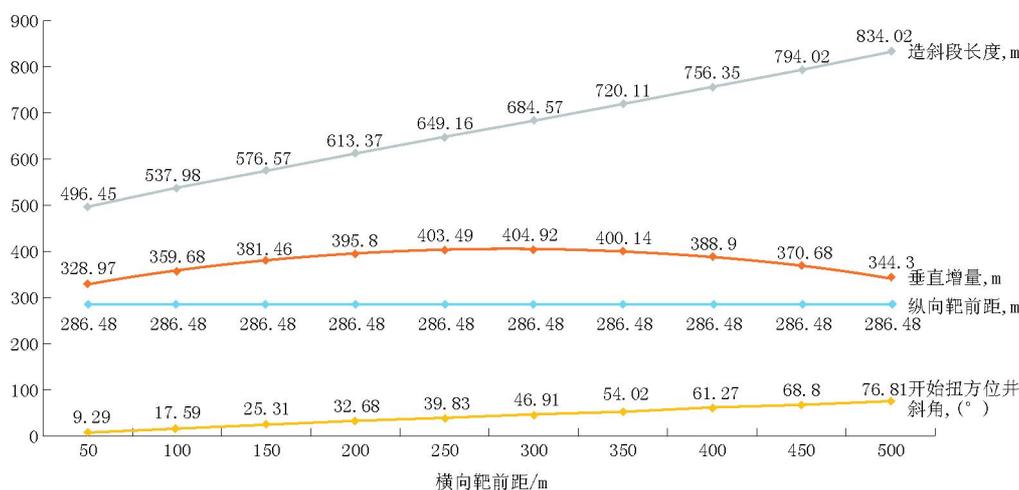


图 9 纵向靶前距为常数,开始扭方位的井斜角随横向靶前距变化

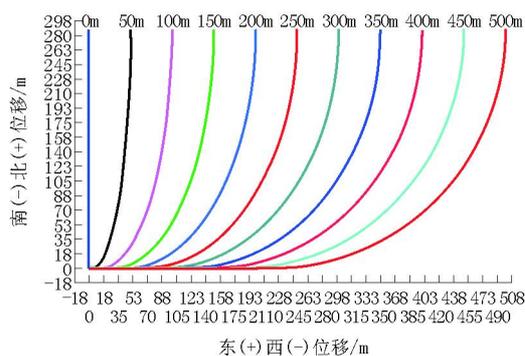


图 10 纵向靶前距 286.48 m,不同横向靶前距水平投影图

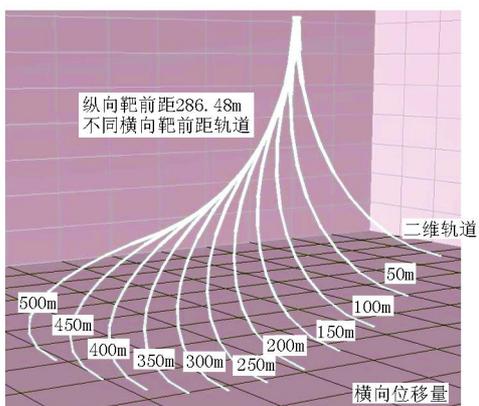


图 11 纵向靶前距 286.48 m,不同横向靶前距立体图

大庆油田致密油水平井钻井实践证明,造斜段采用  $\varnothing 215.9$  mm 井眼,造斜段机械钻速较  $\varnothing 311.2$  mm 井眼提高 191.64%,钻井周期缩短 7.52 d,如图 12 所示。

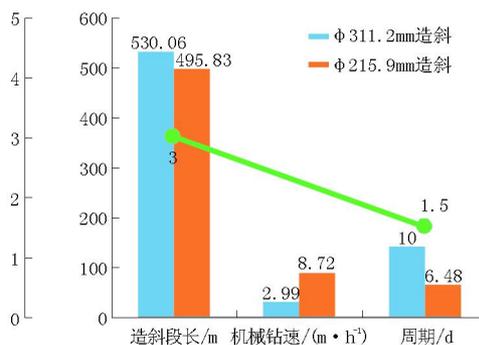


图 12 不同井眼尺寸造斜段施工对比

## 2.2 确定井眼曲率

水平井设计不应只追求进尺最短,要综合考虑地层稳定性、可钻性,易于井眼轨道控制,保证井眼质量等因素来确定井眼曲率。

大庆油田致密油探评水平井实践表明,12½ in ( $\varnothing 317.5$  mm) 井眼采用曲率  $\leq 5.5^\circ/30$  m、8½ in ( $\varnothing 215.9$  mm) 井眼采用曲率  $\leq 7^\circ/30$  m 施工效果好。

## 2.3 确定剖面类型

根据水平井类型确定剖面类型。大庆油田致密油藏受多物源控制,为河流-浅水三角洲沉积,储层以分流河道和下水分流河道沉积砂体为主,油层厚度薄,单层 1~3 m 不等。加之探评井因地质控制精度不高,没有可以对比地层的邻井,故设计入靶点深度与实际地层深度存在一定的误差,导致准确钻入目的储层有一定的困难。

## 2 靶前距设计程序

### 2.1 确定井身结构

综合考虑钻探目的层位及地层三压力剖面确定井身结构,同时应考虑钻井施工效率,大井眼 ( $\geq 311.2$  mm) 造斜增斜较慢;小井眼造斜 ( $\leq 118$  mm) 水平段钻进加钻压困难,排量受限井眼清洁困难,都对钻井施工带来不利影响,应尽量避免。

在探评井设计中,宜采用6段式井眼剖面设计,即:直井段-定向增斜段、稳斜段-稳斜扭方位段-增斜段-探顶段-水平段。纵向靶前距预留30~50m探顶段,以 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}/30\text{m}$ 曲率入靶。若现场发现地层出现意外情况,用 $6^{\circ}\sim 7^{\circ}/30\text{m}$ 的曲率调整轨道,可以获得2~5m的垂深调整余量,能够有效地降低地质探顶的施工风险。

用 $6^{\circ}/30\text{m}$ 曲率,以垂直于水平段的方位增斜至井斜 $30^{\circ}$ 时,横向位移量为38.38m。若设计横向靶前距大于该值时,则可以稳斜方式来增加横向位移量,横向靶前距越大,稳斜段越长;稳斜段井斜角越大,横向位移增长越快。因造斜及稳斜段是有相同的方位角,即在同一垂直剖面下增加横向位移量的井段,所以划为同一井段。

进行扭方位设计时,宜在较小井斜角完成扭方位钻进,一是下部地层硬度增大,扭方位施工难度增大;二是 $45^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 的井斜角,易形成岩屑床,井眼不易清洁,扭方位时应避开该井斜范围。小井斜角扭方位时,横向靶前距增量变化缓慢,因此三维井眼轨道设计应考虑井斜角 $30^{\circ}$ 左右完成扭方位施工,如图13所示。

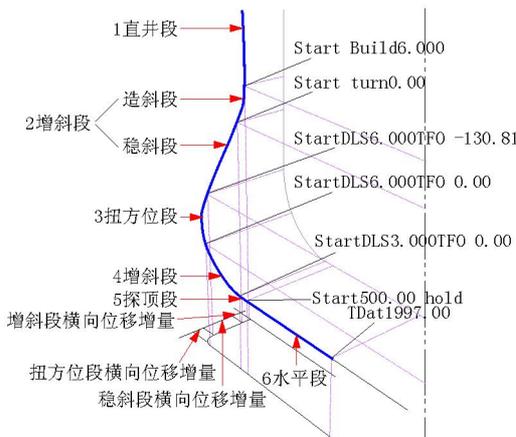


图13 大庆油田致密油三维水平井探井轨道设计剖面

### 2.4 确定靶前距

纵向靶前距应根据确定的井眼轨道剖面类型、井眼曲率、调整探顶段等参数,计算出没有负位移量的推荐使用的最小纵向靶前距(见表1)。

横向靶前距应根据体积压裂改造的裂缝半长等相关开发参数来确定。在现场施工允许的条件下,应尽量增大裂缝半长以利于提高产能。

### 2.5 确定井口坐标

对于单独的绕障水平井,进行方案设计时,先以

表1 探顶推荐使用的最小靶前距

井眼直径/mm	造斜段井眼曲率/ $[(^{\circ})\cdot(30\text{m}^{-1})]$	最小纵向靶前距/m	横向靶前距/m	探顶段/m
6	+0+6+6+3	327.21	250	50
215.9	6.5+0+6.5+6.5+3	295.13	250	50
7	-0-7-7-3	287.60	250	50

注:造斜至 $30^{\circ}$ 井斜,稳斜增横向靶前距,稳斜并扭 $90^{\circ}$ 方位,增斜、探顶 $90^{\circ}$ 至靶点。

推荐最小纵向靶前距及横向靶前距来确定井口位置。现场踏勘时,根据现场实际情况调整井口位置时,应尽量保证纵向靶前距不小于最小纵向靶前距,以防止出现负位移现象,增大设计轨道的复杂程度、增加钻井轨迹的控制难度和钻井施工的风险。

为方便踏勘现场时快速确定井口坐标,笔者用Excel自编计算程序计算井口坐标。首先基于水平段入靶点坐标和水平段上终靶点坐标,计算水平段方位角,其次依据给定的最小纵向靶前距、横向靶前距数据,以靶点A为“0”点,利用三角函数对设计井自动运算井口坐标。最终计算出的井口坐标为井口位于水平段左侧和右侧两个结果供设计者选择,如图14、15所示。



图14 三维水平井井口坐标计算界面

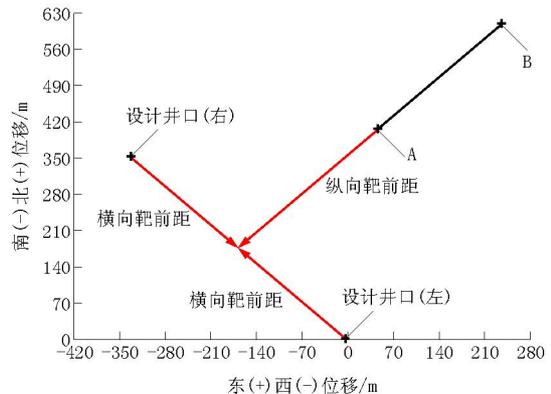


图15 三维水平井靶前距设计

对于工厂化平台井组,进行水平井井位方案设计时,提前与钻井工程相结合,以钻井工程安全、高

效、易于操作的井眼尺寸和曲率进行最小纵向靶前距设计,确定井口平台位置,设计过程中要避免出现纵向靶前距的负位移。负位移会使各井之间在造斜段上相互交织,增大了各井相碰的风险和井眼轨迹施工控制的难度,导致钻井周期和钻井成本增加。

### 2.6 设计实例

设计井基础数据见表 2。

表 2 设计井基础数据

项目	东值/m	北值/m	垂深/m
靶点 A	2777777.00	555555.00	1800
靶点 B	27777980.65	5555758.65	1800
设计井口坐标	27777722.40	5555146.85	
纵向靶前距/m	327.21	横向靶前距/m	250

本井采用三层井身结构,一开  $\varnothing 339.7$  mm 表层下深 210 m,封固浅层地下水,保护浅表水源不受污染。二开  $\varnothing 244.5$  mm 技术套管下在造斜点以上 30 m,封固浅层气和上部注入开发层的异常高压,保证造斜段、水平段安全钻进。三开采用  $8\frac{1}{2}$  in( $\varnothing 215.9$  mm)井眼造斜和打水平段,下入  $\varnothing 139.7$  mm 套管完井。

确定采用探评井剖面类型,曲率为  $6+0+6+6+3$  [(°)/30 m],探顶段 50 m,最小纵向靶前距 327.21 m,横向靶前距 250 m,计算出设计井口坐标后进行井眼轨道设计(参见表 3)。

从最终设计结果看,方位从  $315^\circ$  扭至  $45^\circ$ ,扭方位量  $90^\circ$ ,符合无负位移最小纵向靶前距设计规律。

表 3 轨道设计数据表

序号	井段	测深/m	井斜/(°)	方位/(°)	垂深/m	北南/m	东西/m	视平移/m	狗腿度/[(°)·(30 m <sup>-1</sup> )]	项目
1	直井段	1052.10	0	0	1052.10	0.00	0.00	0.00	0	造斜点
2	增斜段	1202.09	30	315	1195.33	27.14	-27.13	14.45	6	增斜段
	稳斜段	1517.09	30	315	1468.14	138.50	-138.49	73.74	0	稳井斜方位段
3	扭方位	1724.13	30	45	1655.67	215.06	-138.49	144.28	6	全力扭方位段
4	增斜段	1999.13	85	45	1797.82	372.84	19.29	350.99	6	增斜段
5	探顶段	2049.13	90	45	1800.00	408.15	54.60	397.26	3	A
6	水平段	2337.13	90	45	1800.00	611.80	258.25	664.07	0	B

井口确定后,分别采用  $6.5+0+6.5+6.5+3$  [(°)/30 m] 及  $7+0+7+7+3$  [(°)/30 m] 曲率进行了对比设计。在井口与入靶点的位置关系不变的情况下,因设计曲率增大,所需要的最小纵向靶前距减小,导致扭方位量  $< 90^\circ$ ,且曲率越大扭方位量越小,分别为  $84.49^\circ$  和  $79.93^\circ$ ,如图 16、17 所示。

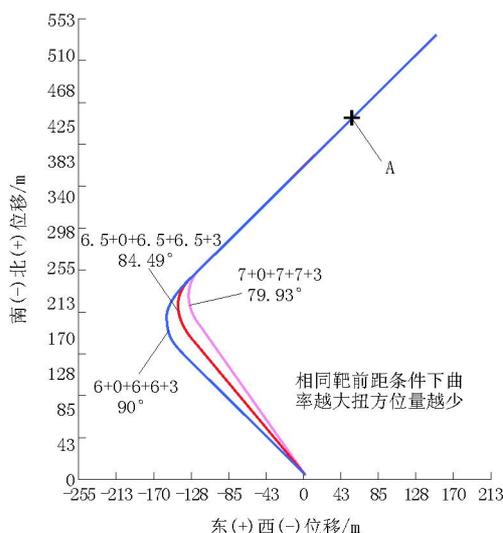


图 16 三维水平井对比设计水平投影

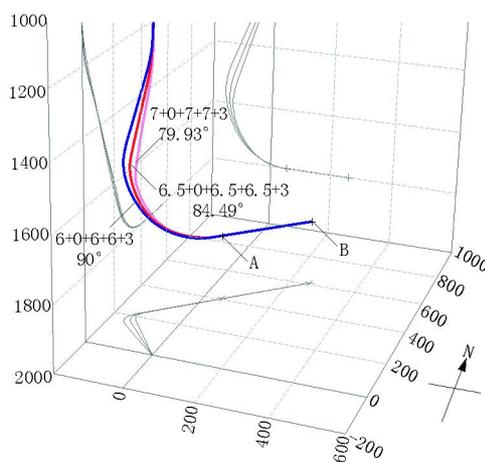


图 17 三维水平井对比设计立体图

通过设计实例,验证了最小纵向靶前距对纵向靶前距负位移的影响,为三维水平井靶前距优化设计提供了依据。

### 3 结论

(1)一定曲率下的靶前距为一定值,当三维水平井扭方位量为  $90^\circ$  时,纵向靶前距与二维靶前距相等。  
(下转第 17 页)

此外,为了降低砂堵的风险,实现平稳、连续加砂操作,从裂缝内支撑剂的优化组合实验结果来看,可以将不同类型支撑剂的粒径均缩小一个数量级,且不会明显降低裂缝的导流能力。

## 5 结论

(1)保德区块煤储层以中低阶煤为主,煤层天然裂缝发育、目的层有效厚度大、压裂施工中压力控制不当压穿顶底板高渗透性砂层,是造成砂堵的主要原因。采用水基清洁压裂液,适当提高施工排量,采用“先小后大”的加砂程序,可以有效解决砂堵问题,同时确保施工压力不至于过高,而且能有效减少压裂液对煤储层的污染。

(2)保德区块中低阶煤层压裂施工实践表明,对4+5号、8+9号以及4+5+7号煤层进行合层压裂改造,特别是单个煤层厚度较大时,易造成压裂液滤失量增大,难以形成主裂缝或裂缝宽度有限,造成加砂困难。因此,为了提高压裂液的造缝效率,彻底改造目的煤层,应尽量采用分层压裂的方式。

## 参考文献:

- [1] 彭少涛,刘川庆,朱卫平,等.保德区块中低阶煤压裂存在的问题及技术对策[C]//中国煤炭学会煤层气专业委员会、中国石

油学会石油地质专业委员会.2011年煤层气学术研讨会论文集,2011:303-307.

- [2] 李勇明,李崇喜,郭建春,等.M气藏压裂施工砂堵原因剖析[J].钻采工艺,2008,31(2):55-57.
- [3] 郑彬涛,郭建春.YQ探区气井压裂砂堵分析与对策研究[J].复杂油气藏,2010,3(1):70-72.
- [4] 张高玖,赵德勇,刘欣,等.安棚油田压裂砂堵因素分析及解决方法[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2007,9(2):1-3.
- [5] 接铭训.鄂尔多斯盆地东缘煤层气勘探开发前景[J].天然气工业,2010,20(6):1-6.
- [6] 李林地,张士诚,庚勤.煤层气藏水力裂缝扩展规律[J].天然气工业,2010,30(2):72-75.
- [7] 陈小新,魏英杰.粉砂在压裂施工中的应用效果显著[J].钻采工艺,2002,25(4):99-100.
- [8] 尹清奎,李玉魁,杨清荣,等.煤层压力施工过程中压力分析及应用[J].中国煤层气,1999,(2):52-54.
- [9] 韩庆,孙建平,张帆.压裂施工中压力异常波动原因分析及处理[J].石油化工设备,2012,15(1):36-38.
- [10] 米卡乐丁·埃克诺米德斯著.油藏增产措施[M].张保平,蒋阔,译.北京:石油工业出版社,2002:534-606.
- [11] 张鹏.煤层气压裂液流动和支撑剂分布规律研究[D].山东青岛:中国石油大学(华东),2011.
- [12] 中联煤层气国家工程研究中心有限责任公司.压裂用低成本水基清洁压裂液及破胶液:中国,CN101693830B[P].2013-04-24.
- [13] 崔会杰,王国强,冯三利,等.清洁压裂液在煤层气井压裂中的应用[J].钻井液与完井液,2006,23(4):58-60.
- [14] 李安启,姜海,陈彩虹.我国煤层气井水力压裂的实践及煤层裂缝模型选择分析[J].天然气工业,2004,24(5):91-93.

## (上接第11页)

(2)三维水平井剖面类型和井眼曲率确定后,最小纵向靶前距随之确定。设计井给定的纵向靶前距的大小决定了是否出现负位移和扭方位量。工厂化水平井多井设计中,应利用最小纵向靶前距概念布置水平井组及井口平台,设计中应尽量不采用负位移设计,有负位移的井眼轨道,各井在造斜井段相互关系复杂,增加了钻井施工风险。

(3)三维水平井横向靶前距不受纵向靶前距或井眼曲率的影响,横向位移可通过一定井斜角下的稳斜钻进实现。横向靶前距的设计可根据开发方案确定。

(4)大庆油田致密油气藏目的层薄,储层变化快,宜采用6段制水平井轨道剖面,在井斜30°左右完成扭方位钻进,以降低扭方位井段的轨迹控制难度,探评井预留30~50m探顶段保证准确钻入目的层。

## 参考文献:

- [1] SY/T 5435—2012,定向井轨道设计与轨迹计算(中文/English)[S].
- [2] SY/T 5955—2004,定向井井身轨迹质量[S].
- [3] SY/T 6332—2012,定向井轨迹控制[S].
- [4] SY/T 6963—2013 大位移井钻井设计指南[S].
- [5] 韩志勇.定向钻井设计与计算[M].山东东营:中国石油大学出版社,2007:321-328.
- [6] 刘修善.井眼轨道几何学[M].北京:石油工业出版社,2006:149-152.
- [7] 苏义脑.水平井井眼轨道控制[M].北京:石油工业出版社,2000.
- [8] 刘修善,张海山.欠位移水平井的设计方法[J].天然气工业,2008,28(10):61-63.
- [9] 李增乐.中浅层水平井井眼轨道优化设计与现场施工[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(10):43-45.
- [10] 窦玉玲.长水平段大位移井井眼轨道优化设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(7):50-52.
- [11] 宋执武,高德利,李瑞营.大位移井轨道设计方法综述及曲线优选[J].石油钻探技术,2006,34(5):24-27.
- [12] 卢明辉,管志川.大位移井摆线轨道设计方法[J].石油大学学报(自然科学版),2003,27(6):33-35.
- [13] 卢明辉,管志川.大位移井轨道设计中关键参数的确定[J].石油钻探技术,2003,31(5):70-71.