

文章编号: 1000-7393(2010)04-0086-05

## 煤层气羽状水平井井眼轨迹控制技术

鲍清英<sup>1</sup> 张 义<sup>1</sup> 何伟平<sup>2</sup> 张继东<sup>1</sup> 任源锋<sup>3</sup> 杨再葆<sup>3</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007; 2. 华北油田采油二厂, 河北霸州 065700;  
3. 渤海钻探井下作业公司, 河北任丘 062552)

**摘要:** 为了提高煤层气的钻遇率、减少井下复杂事故, 开展煤层气羽状水平井井眼轨迹控制技术研究至关重要。通过分析煤层气产出机理和羽状水平井技术特点, 给出了羽状水平井井眼轨迹控制综合分析流程图及常用的控制方法, 详细介绍了随钻电阻率、自然伽马测井等测井响应井眼轨迹综合控制技术及不同地层倾角煤储层井眼轨迹实施跟踪预测控制技术。研究结果表明: 准确掌握煤储层物性参数、地层倾角及顶底板岩性等是实现井眼轨迹有效控制的基础和关键, 在钻进过程中通过实时跟踪和分析钻井参数, 并结合随钻电阻率、自然伽马测井及综合录井信息等对井眼轨迹进行实时监测和调整, 可有效控制钻头在目标层中最佳层位延伸钻进, 从而可确保煤储层钻遇率及减少井下复杂事故发生。

**关键词:** 产出机理; 羽状水平井; 井眼轨迹控制; 响应特征; 地层倾角

**中图分类号:** TE242.9 **文献标识号:** A

### Study on well path control technologies for pinnate horizontal CBM wells

BAO Qingying<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>1</sup>, HE Weiping<sup>2</sup>, ZHANG Jidong<sup>1</sup>, REN Yuanfeng<sup>3</sup>, YANG Zaibao<sup>3</sup>

(1. Langfang Branch, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Petrochina, Langfang 065007, China;  
2. No. 2 Oil Production Factory, PetroChina Huabei Oilfield, Bazhou 065700, China;  
3. Downhole Services Co, CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Renqiu 062552, China)

**Abstract:** Pinnate horizontal well technology is one of the main technologies for coal bed methane (CBM) development. It is very important to study on the well path control technology for increasing much more footage in coal seams and decreasing borehole problems. Based on the analysis of CBM generation mechanisms and characteristics of pinnate horizontal well, the flow chart of analysis on well path controlling for pinnate horizontal well and general controlling methods are presented. Besides, some well path control technologies such as log response controlling technology of resistivity-while-drilling and gamma ray logging, etc., and well path real time tracking and predicting in different dip angles of coal seams are also introduced in details. It comes to conclusions that one of the most important things for controlling well path is to master the accurate parameters for coal seams and strata dips, and to find out the lithologic characters of the adjacent rocks. It could implement the real time controlling and adjusting on the well path with the real time analyses of drilling parameters, resistivity, gamma ray logging, and so on, and it finally could ensure the bit drilling ahead along the optimum position of target zones.

**Key words:** generation mechanism; pinnate horizontal well; well path control; log response characteristic; strata dip

随着能源需求的发展, 能源消耗和开发利用发生了很大的变化, 多数国家把研究重点转向了新能源综合利用方面。国内煤层气资源量丰富,

2000 m 以浅的煤层气资源量约为  $36.81 \times 10^{12} \text{ m}^3$ , 与陆地常规天然气资源量相当, 居世界第 3 位<sup>[1]</sup>, 是国内未来开发可利用的主要新能源之一。

基金项目: 十一五国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发子课题”(编号: 2008ZX05033)的部分内容。

作者简介: 鲍清英, 1965 年生。现主要从事油田定向井、丛式井、煤层气钻井技术研究、管理等工作, 高级工程师。电话: 010-69213541, E-mail: bqymcq69@petrochina.com.cn。

近年来国内在煤层气地质理论、勘探开发关键技术等方面进行了综合性研究,并借鉴近代油气钻完井技术,根据煤储层特性、产气机理、开发成本研究探索出了与之相适应的一系列经济可行的煤层气开发模式。其中,煤层气羽状水平井钻井技术极大地提高了煤层气开发效益,成为地面开发煤层气行之有效的主要钻井工艺<sup>[2,3]</sup>,而井眼轨迹控制技术是羽状井钻井实施过程中提高煤层钻遇率、提高单井产能、减少井下复杂事故的关键技术。因此,对羽状水平井井眼轨迹控制技术的研究至关重要<sup>[4]</sup>。

## 1 煤层气产出机理及羽状水平井技术特点

### CBM producing mechanism and characteristics of pinnate horizontal wells

煤层既是生气层,又是储集层,它具有双重孔隙系统,发育着大量的天然微裂缝和基质孔隙,煤层气(包括煤层自生气和其他气源岩中运移至煤层中的天然气,以甲烷为主)主要以吸附、溶解、游离气3种形式赋存于煤层中。因此,煤层气产出需大面积排水降压,使储层压力降至甲烷临界解吸压力以下后经“解吸-扩散-渗流”3个过程产出<sup>[5]</sup>。

羽状水平井的技术特点是突破了以往微小面积排水降压和裂缝内流体阻力大的束缚,通过主支与分支井眼进行了大面积的网状沟通,在煤层展布方向沟通了尽可能多的煤储层天然割理、裂缝系统,增大泄压控制面积和煤层气解吸范围<sup>[2]</sup>。目前该技术在沁水盆地煤层气田煤层气开采中取得了较好的应用效果,单井平均日产气达到常规水力压裂直井的3~7倍,最高达10倍<sup>[2,3,6]</sup>。

## 2 井眼轨迹控制方法分析

### Analysis on well path control

### 2.1 井眼轨迹控制方法

#### Methods for well path control

实践证明,在做好羽状井地质钻井设计的基础上,要实现测井地质导向,必须充分利用随钻测量、测井和录井等资料进行实时岩性识别,从已钻邻井测井资料解释结果中归纳总结出目标煤层的测井地质特征,作为比对参照模式建立地质导向参数预测模型,提供可靠的岩性解释依据。通过对比分析来确定钻进过程中钻头上行下行钻进方向及在目标层中的位置,实时调整井眼轨迹,使其尽可能在煤储层

物性较好的层位钻进。

煤层气羽状井施工中通常把煤层上下岩性较稳定的泥岩、致密顶底板、煤层夹矸作为判断钻头上、下倾钻进、实时监控钻头是否在目标层中的导向标志层。标志层可通过邻近直井、已施工的羽状水平井随钻跟踪曲线进行地层响应对比来合理地选取导向标志层,同时钻进过程中要结合返出钻屑、钻时变化、综合录井等相关参数分析决策井眼轨迹控制需要。准确的地质剖面参数(地层产状、岩性、物性和流体性质)和一些必要的工程参数(地层压力),能够更正确地实时监测和跟踪地质目标,并在三维地质环境中调整或修正井眼轨迹,使钻头沿着煤储层物性最佳的层位钻进。同时可避免或减少钻进过程中由于岩性解释判断误差而导致某一井段反复造斜修正井眼轨迹引起的井下垮塌等复杂事故,降低风险成本<sup>[7]</sup>。

羽状井在设计实施前要进行勘探区块地震资料、煤层产状、埋深变化、煤层及底板岩性、地层随钻解释标志层响应特征综合分析研究,流程如图1所示。

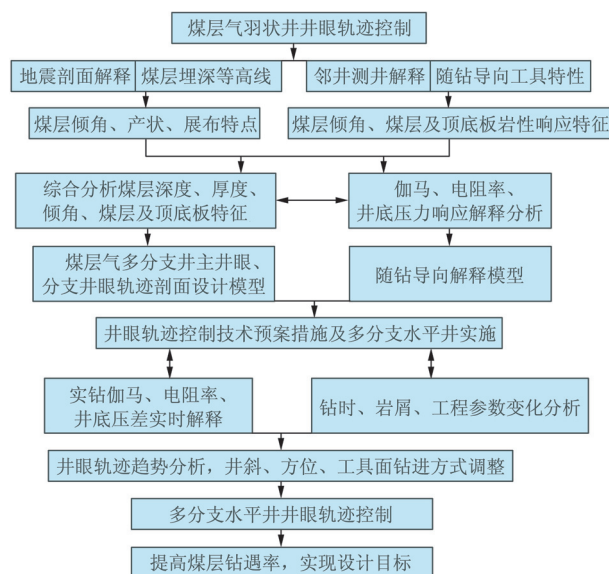


图1 煤层气羽状井井眼轨迹控制综合分析流程

Fig.1 Flow chart of the well path control of pinnate horizontal CBM wells

### 2.2 地井层倾角数值计算

#### Methods for calculating strata dip

由于后期需要排采降压,煤层气羽状井一般需有一口工程井和排采直井组成,若羽状井主井眼在煤层着陆点的三维坐标为 $(x_1, y_1, h_1)$ ,洞穴井目标层坐标 $(x_2, y_2, h_2)$ 那么羽状井主井眼水平钻井方位地

层倾角可按以下方法计算

$$\arctg \theta = \frac{(h_2 - h_1)}{\sqrt{[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2]}}$$

式中,  $\theta$  为钻进方向的地层倾角,°。

2.3 二维地震资料解释

Explanation with 2-D seismic data

羽状井施工前都要进行区域二维地震勘探,从地震资料处理信息对地层产状、煤层展布有一个初步了解和预知,从中可获得所钻区块煤层连续性、地层倾角、倾向等地层参数,见图 2。此外,还可根据区域煤层等高线、邻井测井解释获取所钻煤层倾角。

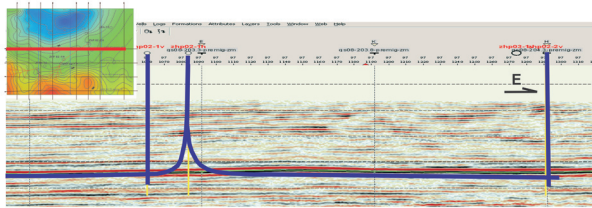


图 2 二维地震测线处理图  
Fig.2 Flow chart of the well path control of pinnate horizontal CBM wells

3 实钻井眼轨迹控制技术

Well path control technologies for actual wellbore

3.1 测井响应综合控制技术

Well path controlled with log response

井眼轨迹通常会在煤层标志层界面上下波动,由此引起的测井响应特征变化能够反映空间上的煤体结构和岩性的变化;实时参数采集、解释、导向技术被誉为钻头的眼睛,及时分析研究钻头上下倾钻进方向、防止或预告钻头钻出煤层顶底界面;轨迹控制过程中通过增斜或降斜、改变钻进方位实时调整三维井身轨迹变化,使钻头始终处在目标层中最佳层位延伸钻进。钻井过程中即使煤层倾角变化不大,但若不能充分认识井斜角与地层倾角之间的变化关系,井眼轨迹有可能钻穿或钻过煤层。因此、随钻测井评价要结合煤储层已有的岩性曲线特征、综合录井信息来分析研究沿三维井眼轨迹地层参数响应变化规律<sup>[7]</sup>。

在煤层顶底板岩性已知的情况下,煤层中地层水相对稳定,地层电导率取决于煤层孔隙度,电阻率、伽马测井曲线发生响应变化。沁水郑庄区块不同岩性地层电缆测井响应特征如表 1 及图 3 所示。

表 1 沁水郑庄区块不同岩性电缆测井响应特征参数  
Table 1 Response characteristic parameters of wireline logging for different formations in Zhengzhuang Block

岩性	电阻率 / $\Omega \cdot m$	自然伽马 /API	体积密度 / $g \cdot cm^{-3}$
砂岩	90 ~ 300	60 ~ 100	2.6-2.7
泥岩	15 ~ 40	100 ~ 380	2.2-3.0
煤	4000 ~ 7000	15 ~ 60	0.5-1.3
灰岩	8000 ~ 90000	15 ~ 40	4.0-5.1

从该井煤层测井响应曲线上显示,546.0~552.8 m 是该井 3<sup>#</sup> 煤层,单层厚度大,煤质较好,但从测井曲线显示煤层内部是非均质的,体积密度、声波时差曲线有小幅波动,自然伽马和电阻率曲线显示具有明显的变化,其中 551.0~551.8 m 体积密度和自然伽马幅值增大,声波时差、电阻率幅值降低,与上部有明显的区别,应为煤层夹矸。因此,煤层在常规测井响应特征上具有高电阻率、声波时差、低自然伽马、体积密度的特征。顶底板泥岩具有低电阻率、中等声波时差、高自然伽马、中等体积密度值的特征。

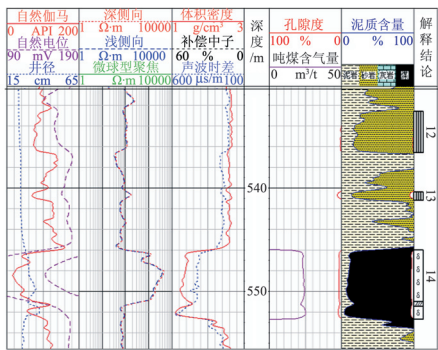


图 3 沁水郑庄山西组 3<sup>#</sup> 电缆测井响应曲线  
Fig.3 Response curve of wireline logging for No.3 coal seam in Zhengzhuang Block

3.2 井眼轨迹实时跟踪预测控制技术

Well path predicted with the real-time parameters

在实钻过程中,随钻 LWD 测井还能实时读取、计算工程参数,可实时获得井深 MD、井斜角  $\alpha$ 、井斜方位角  $\beta$ 、工具面角  $\phi$ 、相对与井口的二维坐标值、垂深 TVD 等数据。依据综合分析获知施工井井眼延伸方位煤层倾角为  $\theta$ ,那么实钻中要确定钻头的上下倾钻进方向可按煤层上倾和下倾 2 种情况进行分析。当沿顺时针方向从铅垂线到煤层顶界面的角度大于  $90^\circ (90^\circ + \theta)$  时煤层下倾,当小于  $90^\circ (90^\circ - \theta)$  时煤层上倾见图 4。



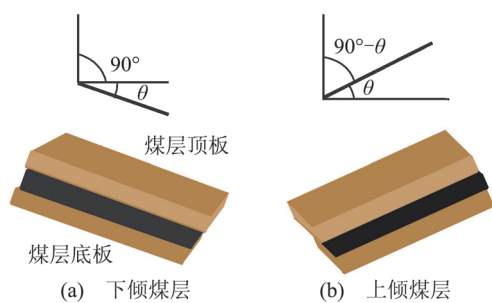


图 4 煤层上、下倾图

Fig.4 Coalbeds upper, lower dip direction

倾斜煤层钻井预测：从井深  $MD_1$  ( $TVD_1$  为此点垂深) 钻进至  $MD_2$  ( $TVD_2$  为此点垂深) 时, 井眼轨迹相对与煤层有 3 种情况, 当井眼轨迹变化沿着平行于煤层展布方向钻进时可认为平行钻进, 当井眼钻进轨迹线相交与煤层顶板变化时可认为煤层顶板方向钻进, 反之可认为煤层底板方向钻进。

3.2.1 下倾煤层 钻井方向煤层倾角为  $\theta$  时, 井眼轨迹连线与煤层顶板界面方向不平行即成相交状态。 $MD_1$  和  $MD_2$  两点的连线与水平线的夹角为  $\alpha_{12}$  ( $\alpha_{12}$  与井斜角  $\alpha$  的关系为  $\alpha_{12}=90^\circ-\alpha$ , 若  $\alpha$  大于  $90^\circ$ , 那么  $\alpha_{12}=180^\circ-\alpha$ )。

$$\sin \alpha_{12} = (TVD_2 - TVD_1) / (MD_2 - MD_1)$$

$$\alpha_{12} = \arcsin \{ (TVD_2 - TVD_1) / (MD_2 - MD_1) \}$$

当  $\alpha_{12} < \theta$  时, 钻进井眼轨迹相对于煤层上倾方向钻进; 若此时调整井眼轨迹, 动力钻具工具面应摆放在井眼高边  $180^\circ$  方位滑动钻进;

当  $\alpha_{12} > \theta$ , 且  $TVD_2 - TVD_1 < 0$  时, 井眼轨迹趋势线在煤层上倾方向钻进; 若此时调整井眼轨迹有 3 种情况, 当钻进轨迹方位小于设计方位时, 动力钻具工具面摆放在相对于井眼高边  $135^\circ$  左右滑动钻进, 当钻井轨迹方位大于设计方位时, 动力钻具工具面摆放在相对于井眼高边  $225^\circ$  左右滑动钻进。钻进方位等于设计方位时, 动力钻具工具面摆放在相对于井眼高边  $180^\circ$  滑动钻进。

当  $\alpha_{12} > \theta$ , 且  $TVD_2 - TVD_1 > 0$  时, 井眼轨迹趋势线在煤层下倾方向钻进; 若此时调整井眼轨迹有 3 种情况, 当钻进轨迹方位小于设计方位时, 动力钻具工具面摆放在相对于井眼高边  $45^\circ$  左右滑动钻进, 当钻井轨迹方位大于设计方位时, 动力钻具工具面摆放在相对于井眼高边  $315^\circ$  左右滑动钻进, 钻进方位等于设计方位时, 动力钻具工具面摆放在相对于井眼高边  $0^\circ$  滑动钻进。

当  $\alpha_{12} = \theta$ , 井眼轨迹趋势线沿煤层展布方向钻进; 此时方位符合设计方位时, 可按原井眼轨迹复

合钻进。

3.2.2 水平煤层 煤层倾角处于水平时, 即  $\theta=0$  时, 依据两点垂深变化可判断井眼钻进趋势。

当  $TVD_2 - TVD_1 > 0$  时, 井眼轨迹趋势线在煤层下倾方位钻进; 若此时调整井眼轨迹有 2 种情况, 当钻进轨迹方位小于设计方位时, 动力钻具工具面摆放在相对于井眼高边  $45^\circ$  左右滑动钻进, 当钻井轨迹方位大于设计方位时, 动力钻具工具面摆放在相对于井眼高边  $315^\circ$  左右滑动钻进。

当  $TVD_2 - TVD_1 < 0$  时, 井眼轨迹趋势线在煤层上倾方位钻进; 若此时调整井眼轨迹有 2 种情况, 当钻进轨迹方位小于设计方位时, 动力钻具工具面摆放在相对于井眼高边  $135^\circ$  左右滑动钻进, 当钻井轨迹方位大于设计方位时, 动力钻具工具面摆放在相对于井眼高边  $225^\circ$  左右滑动钻进。

当  $\alpha_{12} = \theta = 0$  时, 钻进井眼轨迹沿煤层方向钻进, 此时按原井眼轨迹线复合钻进。

3.2.3 上倾煤层 当  $\alpha_{12} < \theta$  时, 钻进井眼轨迹相对于煤层下倾钻进。

当  $\alpha_{12} > \theta$ , 且  $TVD_2 - TVD_1 < 0$  时, 井眼轨迹趋势线在煤层上倾方向钻进。

当  $\alpha_{12} > \theta$ , 且  $TVD_2 - TVD_1 > 0$  时, 井眼轨迹趋势线在煤层下倾方向钻进。

当  $\alpha_{12} = \theta$  时, 井眼轨迹趋势线沿煤层展布方向钻进。

上倾煤层井眼轨迹控制动力钻具摆放几何原理与前面相同, 在实钻过程中要在综合分析井眼轨迹控制相关的各种资料基础上结合随钻解释信息调整动力钻具安置方位和工具面, 才能达到羽状水平井设计钻井轨迹控制目的。

## 4 结论和建议

### Conclusions and suggestions

(1) 准确的地质剖面参数和一些必要的工程参数, 能够更正确地实时监测和跟踪地质目标以及在三维地质环境中调整或修正井眼轨迹, 使钻头沿着煤储层物性最佳的层位钻进, 同时可避免或减少钻进过程中由于岩性解释判断误差而导致某一井段反复造斜修正井眼引起的井下垮塌等复杂事故, 降低风险成本。

(2) 随钻电阻率、自然伽马测井是煤层气羽状井在井眼轨迹与地层穿越关系方面应用的核心技术, 井眼轨迹常会在煤层标志层界面上下波动, 结合煤

(3)地层倾角与井斜角之间的变化关系对于井眼轨迹的有效控制也至关重要。钻进过程中即使煤层倾角变化不大,但若倾向判断失误,井眼轨迹有可能钻穿或钻过煤层。在钻进过程中依据两点垂深变化可判断井眼钻进趋势,结合随钻解释信息调整动力钻具安置方位和工具面,通过增斜或降斜、改变钻进方位实时调整三维井身轨迹变化,可有效控制钻头始终处于目标层中最佳层位延伸钻进。

## References:

- [4] 鲍清英, 鲜保安. 我国煤层气多分支井钻井技术可行性研究[J]. 天然气工业, 2004, 24(5): 54-56.
- BAO Qingying, XIAN Baoan. Feasibility study on coalbed methane multi-branch drilling techniques of China [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(5): 54-56.
- [5] 任冬梅, 张烈辉, 陈军, 等. 煤层气藏与常规天然气藏地质及开发特征比较[J]. 西南石油学院学报, 2001, 23(5): 29-32.
- REN Dongmei, ZHANG Liehui, CHEN Jun, et al. Comparison of geological and production characteristics between coal bed methane and conventional natural gas reservoir [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2001, 23(5): 29-32.
- [6] 李五忠, 赵庆波, 吴国干, 等. 中国煤层气开发与利用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- LI Wuzhong, ZHAO Qingbo, WU Guogan, et al. Exploitation and utilization of coal bed methane in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [7] 张彦平, 何湘清, 金建新, 等. 国外煤层甲烷气开发技术译文集[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- ZHANG Yanping, HE Xiangqing, JIN Jianxin, et al. Symposium of foreign coal bed methane development technologies [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [8] 王斌. 定向钻井测量仪器[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990.
- WANG Bin. Measuring implements for directional drilling [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990.

〔编辑 薛改珍〕



有利勘探区块,2个重点目标区,即和顺区块和延川南区块。延川南区块位于鄂尔多斯盆地的东南缘,主要含煤地层为二叠系、石炭系,主要目的煤层为山西组2号煤层,煤层平均厚度5.97 m,含气量8.89 m<sup>3</sup>/t。延川南区块煤层气勘探的重大突破,是实施中石化非常规资源战略的初步成果,目前,华东分公司煤层气选区评价工作全面展开。为加快非常规油气勘探步伐,华东石油局所属的物探、钻井、测井、录井、固井、测试、井下作业等队伍全面投入到非常规工程的攻关与作业。一支非常规勘探开发专业化工程队伍正在形成。

(供稿 石 艺)