

文章编号:0253-9993(2013)02-0284-04

煤层气水平井连通井组轨道设计与控制方法

乔 磊,孟国营,范 迅

(中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院,北京 100083)

摘 要:煤层气水平井组由一口或几口水平井与一口洞穴直井连通,共同利用该直井进行采气作业,因此煤层气水平井需进行两井连通作业。依据煤层气水平井组的特点,建立了以煤层气水平井为基准的坐标体系,并推出了两井坐标体系的转换公式;考虑到连通井段短和轨道控制要求高的特点,优选出增—增—稳设计剖面,并建立了分段轨道优化设计方法;以逐步缩小洞穴井与水平井相对位置的不确定性椭圆范围为目标,提出了煤层气水平井轨道测量的方法及稳斜扭方位的轨道控制模型。通过以上的基础研究,形成了较系统的水平井连通井组轨道设计与控制方法,并结合现场应用进行了连通轨道控制的分析。

关键词:煤层气;水平井;连通井组;轨道设计;控制方法

中图分类号:P618.11;TP028.8 **文献标志码:**A

Design and control methods of remote intersection wells for development of coal-bed methane

QIAO Lei, MENG Guo-ying, FAN Xun

(School of Mechanical Electronic & Information, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Coal-bed methane(CBM) well group consists of a horizontal well or a few horizontal wells with a vertical well. Horizontal wells connected together use the straight wells to operate in future. Based on the characteristics of CBM horizontal wells, coordinate system was established. And conversion formula of two wells coordinate system was launched; Taking into account the requirements of short trajectory and high precision for control, intersection of horizontal well was optimized, and a sub-orbital optimization method was established. To gradually reduce the relative position of the range of uncertainty ellipse between the caves and horizontal wells, measurement method and the orbit control model were proposed. On basis of the above study, track design and control method of horizontal well groups were formatted. Finally track control about field application was analyzed.

Key words: coal-bed methane; horizontal well; remote intersection well; track design; control method

我国煤层气藏普遍具有低压、低渗透、低含水的储层特性^[1-2],例如山西沁水盆地煤层渗透率一般小于 10^{-15} m^2 ,地层压力系数小于1^[3]。煤层气水平井通常需额外打一口直井,并将该井与水平井连通,以便于下入螺杆泵、有杆泵等排水采气。该类水平井组的连通需要引入旋转磁场定位技术,通过实时磁场测量修正钻头与洞穴的相对位置,并引导两井连通^[4]。与传统的MWD测量技术相比,旋转磁场定位技术可以在很大程度上消除靶点标定误差、MWD累积测量

误差等,提高了钻头中靶率。

笔者详细分析了连通井组坐标体系的建立、轨道优化设计方法、水平井轨道测量方法及稳斜扭方位的轨道控制模型,并结合现场应用进行了连通过程轨道控制的分析。

1 连通井组坐标体系的建立

煤层气水平井组通常由两口井组成,包括一口水平井和一口直井^[5],钻井的目标靶点位于洞穴直井

井底。设定水平井和洞穴直井井口大地坐标分别为 $(X, Y, H), (x, y, h)$; 建立如图 1 所示的坐标系 (O_1, N, E, D_{TV}^S) 和 (O_2, n, e, D_{TV}^V) 。由于钻井施工平台位于水平井, 因此需要将洞穴、传感器和靶点的坐标转换到水平井坐标系。以下为靶点坐标转换关系式, 洞穴位置和传感器坐标转换可以同样方式进行转换:

$$D_{BTV}^S = D_{BTV}^V + h - H \quad (1)$$

$$BN_S = BN_V + x - X \quad (2)$$

$$BE_S = BE_V + y - Y \quad (3)$$

式中, $D_{BTV}^S, BN_S, BE_S, D_{BTV}^V, BN_V, BE_V$ 分别为靶点垂深、北值和东值在水平井和洞穴直井两个坐标系下的数值, m。

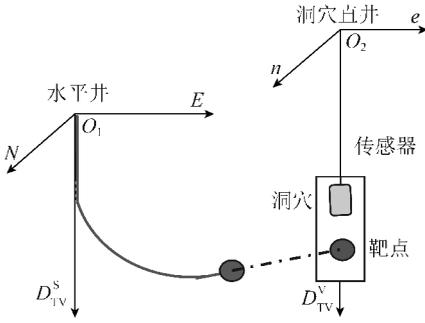


图1 连通井组坐标系

Fig. 1 Coordinate system between horizontal well and vertical well

2 连通井段钻井井轨迹优化设计

煤层气水平井距离洞穴直井通常只有 200 m 左右^[6], 考虑到近距离和穿针轨道控制的需要, 一般采用增—增—稳设计剖面^[7]。该设计轨迹剖面就是在单增圆弧剖面的基础上, 在第 1 个增斜圆弧达到接近水平时, 继续第 2 个增斜圆弧达到设计稳斜角后, 稳斜至靶点。该设计与圆弧剖面设计方法相比, 能够处理和应对连通测量方位偏差大的情况, 能够有条件实现全力扭方位作业。第 1 造斜段采用 1.5° 单弯螺杆, 第 2 造斜段可采用 1.25° 单弯螺杆。该设计方法对于地层造斜特性掌握程度不高的地区, 比较适合; 第 2 造斜段由于采用了较小的造斜率, 给前一段施工的定向调整提供了回旋余地。

首先建立如图 2 所示二维坐标系, 横坐标为水平位移 S , 纵坐标为垂深 H , A 点为造斜点; B 点为煤层气水平井二开着陆点。 O_1-A-B 段轨迹优化模型^[8] 为

$$H_B = H_A + R_A \sin \alpha_B \quad (4)$$

$$S_B = R_B \cos \alpha_B \quad (5)$$

辅助方程:

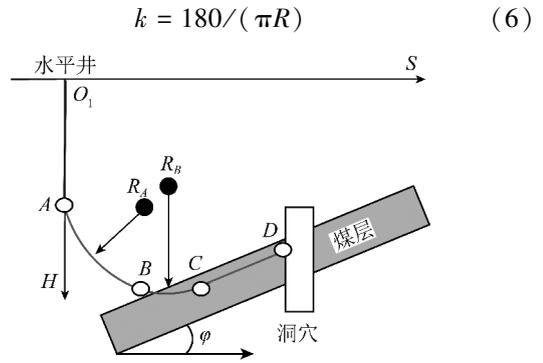


图2 连通井组井眼轨道设计模型

Fig. 2 Well path model for remote intersection wells

对于该段轨迹优化模型, 造斜点垂深、曲率半径 R_A 、 B 点井斜角 α_B 、 H_B, S_B 为方程(4)和(5)的未知变量, 若已知其中之三, 即可求解出其余两个变量。考虑到固井的需要, B 点通常位于煤层顶板以上 2 m 左右, 且煤层位置坐标已知, 因此 H_B 可定为已知参数; 由于剩余井段 $B-C-D$ 需进行连通施工作业, 主要进行扭方位作业, 一般选择 α_B 比 $90^\circ + \varphi$ 值小 $3^\circ \sim 5^\circ$; 目前远距离穿针工具的探测范围可达到 80 m, 为了保证足够的连通井段, 要求 $S_D - S_B \geq 80$ m, 根据具体工程的需要, S_B 也为已知变量。因此该井段优化的变量为造斜点位置和造斜率 k 。

$B-C-D$ 段为煤层气水平井三开井眼, 主要进行两井连通作业。该井段由 2 部分组成, 即造斜段 $B-C$ 和稳斜段 $C-D$ 。 $B-C-D$ 段轨迹优化模型为

$$\begin{cases} H_D - H_B = R_B (\sin \alpha_C - \sin \alpha_B) + L_{CD} \cos \alpha_C \\ S_D - S_B = R_B (\cos \alpha_B - \cos \alpha_C) + L_{CD} \sin \alpha_C \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} (\alpha_C \leq 90^\circ) \\ [H_B - H_D = R_B [\sin \alpha_B - \sin(\alpha_C - 90^\circ)] + L_{CD} \sin(\alpha_C - 90^\circ) \\ S_D - S_B = R_B [\cos \alpha_B + \sin(\alpha_C - 90^\circ)] + L_{CD} \cos(\alpha_C - 90^\circ) \end{cases} \quad (\alpha_C > 90^\circ) \quad (8)$$

对于该段轨迹优化模型, H_B, S_B, α_B 为上一段轨迹优化结果, 是已知变量; H_D, S_D 为目标靶点, 是给定值; α_C 为稳斜段井斜角, 其与煤层倾角的关系满足 $\alpha_C = 90^\circ \pm \varphi$; 因此该井段的优化变量为 R_B 和稳斜段长度 L_{CD} 。

3 井眼轨道测量与控制方法

煤层气水平井连通井组轨道测量与控制的目标是逐步缩小洞穴井与水平井相对位置的不确定性椭圆范围。传统的 MWD 测量技术主要有以下不足^[9]: ① MWD 测量传感器位于钻头后部 6 ~ 10 m, 实时测量参数远远滞后于钻头位置; ② MWD 测量误差偏

大,在50 m的钻井进尺中,误差椭圆半径可达到3 m以上;③由于洞穴直井采用多点侧斜仪进行标定,洞穴位置存在不确定性,通常靶点误差范围在1 m以上。由于洞穴直井所造洞穴直径约0.5 m,基于以上MWD的测量特点,其远不能满足煤层气水平井的轨道测控要求^[10]。因此煤层气水平井连通井组引入旋转磁场直接测量水平井钻头与洞穴井的距离和方位偏差^[11-12](图3),在明确两口井的相对位置关系后,调整水平井井眼轨迹,并与洞穴直井贯通。

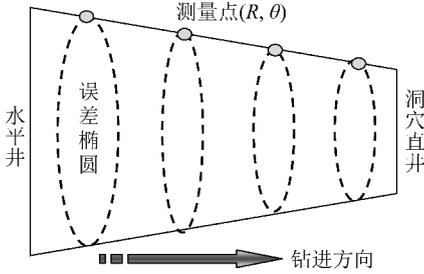


图3 连通井组井眼轨道控制模型

Fig. 3 Measurement method and the orbit control model for remote intersection wells

(1) 连通井段轨道测量方法。

水平井钻头与洞穴井的距离和方位偏差测量^[13-14]的计算公式为

$$R \cong K \sqrt[3]{\frac{I}{H}} \quad (9)$$

$$\theta \cong f(H_x, H_y, H_z) \quad (10)$$

式中, R, θ 为洞穴与水平井钻头间的距离(m)和方位偏差角($^\circ$); K 为比例系数; H_x, H_y, H_z 为磁场信号的3个分量,nT。

(2) 连通井段轨道控制模型与方法。

煤层气水平井连通井段60~80 m,考虑到该井段井斜已达到设计要求,轨道控制的主要参数为方位角,控制方式通常采用稳斜扭方位或全力扭方位模式^[8],基于连通井段所测得距离 R 和方位角偏差 θ 进行待钻井段轨道控制方案设计。以下是稳斜扭方位的轨道控制模型:

$$\varepsilon = \arccos(\cos^2 \alpha_1 + \sin^2 \alpha_1 \cos \theta) \quad (11)$$

$$\omega = \arccos\left(-\frac{\tan(\varepsilon/2)}{\tan \alpha_1}\right) \quad (\theta > 0) \quad (12)$$

$$\omega = 360 - \arccos\left(-\frac{\tan(\varepsilon/2)}{\tan \alpha_1}\right) \quad (\theta < 0) \quad (13)$$

$$\Delta L = C \frac{\varepsilon}{k} \quad (14)$$

式中, α_1 为当前测点的方位角($^\circ$); ε 为待钻圆弧井段的弯曲角($^\circ$); ω 为工具面角($^\circ$); ΔL 为待钻井

段长度,m; C 为常量系数。

以上模型中当前测点方位角 α_1 、靶点方位偏差角 θ 、工具造斜率 k 为已知参数。待定的参数为工具面角 ω 和待钻井段长度 ΔL ,其中 $\Delta L \leq R - M$,其中 M 为预留的井眼安全余量长度,通常要求达到20 m以上。

4 工程应用实例

郑平01-1水平井组由郑平01-1H井和郑平01V洞穴直井组成^[15]。连通作业采用磁导向仪器,井下导向工具造斜率为 $6^\circ/30$ m。该井的连通步骤如下:

(1)从距离洞穴井70 m处开始最早接收到磁场信号,但仅进行监测作业;

(2)在距离洞穴57 m处开始利用磁导向仪器进行导航,洞穴与钻头的距离和方位偏差的测量结果分别为57.12 m和 2.31° (偏右),利用轨道控制模型计算工具面角应设置为 90° ,理论上钻进11.55 m可将方位偏差角降为0;

(3)井深642 m处进行了磁测量导航,发现由于地层漂移等因素影响,方位偏差角仅降低到 1.21° ,与理论模型偏差较大;

(4)利用轨道控制模型进行计算,工具面角应设置为 90° ,理论上钻进6 m可将井眼方位调整为正对洞穴处,考虑到井下工具实际造斜能力,现场进行了18 m的扭方位作业,在距离洞穴27 m处方位偏差调整到 0.4° 左右;

(5)经过计算,复合钻进条件下的靶心距为0.1 m,小于半径为0.25 m的洞穴,决定将仪器起出洞穴直井,最终在井深687.03 m处实现直接中靶。

表1 郑平01-1井眼轨道控制过程

Table 1 Results of well path measurement and control for intersection between two wells

钻头位置/m	方位角 $\alpha_1/^\circ$	距离 R /m	方位偏差 $\theta/^\circ$
627.60	143.41		跟踪
630.10	144.35	57.12	2.31
633.50	146.00	53.80	2.15
642.00	147.50	45.22	1.21
660.03	148.30	27.00	0.40
687.03		中靶	

5 结 论

(1)煤层气水平井组的连通作业需要分别建立

以直井和水平井为基准的坐标系统,考虑到施工作业以水平井为作业平台,同时需要将洞穴直井下的坐标数据转换到水平井坐标系统。

(2)考虑到连通井段短和轨道控制要求高的特点,优选出增—增—稳设计剖面,并建立了分段轨道优化设计方法。

(3)以逐步缩小洞穴井与水平井相对位置的不确定性椭圆范围为目标,提出了煤层气水平井轨道测量的方法及稳斜扭方位的轨道控制模型,并进行了现场应用实例分析。

参考文献:

- [1] 黄洪春,申瑞臣. 用分支水平井开发煤层气技术探讨:21世纪中国煤层气产业发展与展望[M]. 北京:煤炭工业出版社,2003.
Huang Hongchun, Shen Ruichen. The technique research of multi-branched horizontal well in CBM exploration; development and forecast of CBM industry in 21th century[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2003.
- [2] 郑毅,黄洪春. 中国煤层气钻井完井技术发展现状与发展方向[J]. 石油学报,2002,23(3):81-85.
Zheng Yi, Huang Hongchun. Production performance analysis on horizontal wells with variable production index[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(3):81-85.
- [3] 郑力会,孟尚志,曹园,等. 绒囊钻井液控制煤层气储层伤害室内研究[J]. 煤炭学报,2010,35(3):439-442.
Zheng Lihui, Meng Shangzhi, Cao Yuan, et al. Laboratory studies on control coal bed methane formation damage by fuzzy-ball based drilling fluids[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3):439-442.
- [4] 徐云龙,马凤清,冯光通. 磁性导向钻井技术现状及发展趋势[J]. 钻采工艺,2012,35(2):35-37.
Xu Yunlong, Ma Fengqing, Feng Guangtong. Status and developmental trend of magnetic guidance drilling technique[J]. Drilling & Production Technology, 2012, 35(2):35-37.
- [5] 鲜保安,崔思华,蓝海峰,等. 中国煤层气开发关键技术及综合利用[J]. 天然气工业,2004,24(5):104-106.
Xian Baoan, Cui Sihua, Lan Haifeng, et al. Key techniques and integrative utilization of coal-bed gas development in China[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(5):104-106.
- [6] 张文波,路宗羽,王朝峰,等. SAGD平行水平井和直井连通钻井技术[J]. 石油机械,2011,39(6):8-11.
Zhang Wenbo, Lu Zongyu, Wang Chaofeng, et al. The drilling technology of connecting the SAGD parallel horizontal well and straight well[J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39(6):8-11.
- [7] 乔磊,申瑞臣,黄洪春,等. 煤层气多分支水平井钻井工艺研究[J]. 石油学报,2007,28(3):112-114.
Qiao Lei, Shen Ruichen, Huang Hongchun, et al. Drilling technology of multi-branch horizontal well[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(3):112-115.
- [8] 刘修善. 井眼轨道几何学[M]. 北京:石油工业出版社,2006:163-176.
Liu Xiushan. Geometry of wellbore trajectory[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006:163-176.
- [9] 刘大伟,王益山,虞海法,等. 煤层多分支水平井安全钻井技术[J]. 煤炭学报,2011,36(12):2109-2114.
Liu Dawei, Wang Yishan, Yu Haifa, et al. Safety drilling technology of multi-lateral horizontal wells in coalbed[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12):2109-2114.
- [10] Tracy L, Grills P. Magnetic ranging technologies for drilling steam assisted gravity drainage well pairs and unique well geometries—a comparison of technologies[J]. SPE 79005, 2001:1-8.
- [11] Neku A G, Kuckes A F, Pitzer R G. Rotating magnet ranging: a new drilling guidance technology[A]. SPE 8th One Day Conference on Horizontal Well Technology, Canadian, 2001[C]. Canadian, 2001.
- [12] Relative drill bit direction measurement vector magnetics, LLC [P]. U. S Patent:6736222B2, 2004-03-18.
- [13] 乔磊,孟国营,范迅,等. 煤层气水平井组远距离连通机理模型研究[J]. 煤炭学报,2011,36(2):199-202.
Qiao Lei, Meng Guoying, Fan Xun, et al. Mechanism model of remote intersection between horizontal well and vertical well for development of coal-bed methane[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2):199-202.
- [14] 田中兰,申瑞臣,乔磊. 煤层气水平井远距离穿针技术与装备研制[A]. 2011年煤层气学术研讨会论文集[C]. 2011.
Tian Zhonglan, Shen Ruichen, Qiao Lei. Remote intersection technology between horizontal well and vertical well for development of coalbed methane[A]. Coalbed Methane Scientific Seminar Treatise Collection of 2011[C]. 2011.
- [15] 田中兰,乔磊,苏义脑. 郑平01-1煤层气多分支水平井优化设计与实践[J]. 石油钻采工艺,2010,32(2):26-29.
Tian Zhonglan, Qiao Lei, Su Yinao. Optimum design and field practice of multi-branch horizontal CBM well ZHP01-1[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32(2):26-29.