

煤层气水平井磁导向钻井理论与实践

乔磊¹, 高德利¹, 代继樑², 车阳¹

(1. 中国石油大学(北京), 北京 102249; 2. 西南石油大学, 四川 成都 610500)

摘要:基于磁导向钻井理论研究和现场实践,建立了井下钻头与靶点间的相对距离和方位定位模型,提出了距离校正方法及微弱磁信号卡尔曼定位方法,解决了煤层气水平井复杂工况环境下的远距离、高精度磁定位难题。现场试验和应用结果表明:距离校正算法能够良好地逼近无干扰下的测量值,可有效解决井下磁矩干扰带来的测量误差;单次测量值受到噪声及杂波的影响起伏波动较大,经过卡尔曼滤波后测量精度远高于单点定位算法,在距离40.06 m处可将测量误差从1.9 m降低至0.41 m;煤层气U型水平井磁导向钻井连通靶区可有效控制在排采直井 \varnothing 177.8 mm井筒范围内。

关键词:煤层气;水平井;磁导向钻井;远距离穿针;定向钻井;两井连通

中图分类号:TD713;P634.7 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)06-0001-06

Magnetic ranging theory and practices in CBM horizontal well drilling

QIAO Lei¹, GAO Deli¹, DAI Jiliang², CHE Yang¹

(1. China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500, China)

Abstract: Based on the theoretical study and field practices in magnetic ranging in well drilling, a model has been constructed for determination of the relative distance and direction between the downhole drill bit and target with the distance correction method and the Kalman filtering method for weak magnetic signals proposed; thus solving the problem with long distance and high precision magnetic ranging in CBM horizontal well drilling in the complex operation environment. The field test and application results showed that the calculation method for distance correction can obtain the value well approximate to the one measured in the interference-free environment; thus eliminating effectively the measurement error caused by downhole magnetic moment. The noise and clutter had a significant influence on the value of single measurement; however, through Kalman filtering, the measurement value was more accurate than the one from single positioning calculation with the measurement error reduced from 1.9m to 0.14m at the distance of 40.06m. In magnetic ranging for the "U" type CBM horizontal well intersection, the effective target can be controlled within 177.8mm of the vertical extraction well.

Key words: CBM; horizontal wells; magnetic ranging drilling; intersection guidance; directional drilling; connection of two wells

0 引言

我国拥有丰富的煤层气资源,但煤层渗透率一般小于1 mD,地层压力系数0.9~1.0。从提高采收

率和经济效益方面考虑,煤层气水平井、多分支水平井是最佳的开发模式^[1-3]。另外考虑到低含水特性,螺杆泵或“抽油机+有杆泵”是排水采气的最

收稿日期:2020-10-27; 修回日期:2021-04-07 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.06.001

基金项目:国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”课题4“煤层气新型水平井钻完井关键技术与工具研究”(编号:2016ZX05022-004); 中国石油重大科技专项项目“煤炭地下气化关键技术与先导试验”[编号:2019E-25(JT)]

作者简介:乔磊,男,满族,1980年生,中国石油大学(北京)博士后,油气井工程专业,研究方向为非常规钻井新技术与新方法,北京市昌平区黄河街5号院1号楼,qiaoleidri@cnpc.com.cn。

引用格式:乔磊,高德利,代继樑,等.煤层气水平井磁导向钻井理论与实践[J].钻探工程,2021,48(6):1-6.

QIAO Lei, GAO Deli, DAI Jiliang, et al. Magnetic ranging theory and practices in CBM horizontal well drilling[J]. Drilling Engineering, 2021,48(6):1-6.

佳方式。基于以上煤层气开发的特殊性,我国煤层气水平井通常需额外打1口直井,并将该井与水平井/多分支水平井连通(如图1所示),以便于下入螺杆泵、有杆泵等排水采气,并通过U型井筒间断性清洗井底沉积的煤粉,保证排采期间井筒的畅通性。煤层气水平井两井连通的特殊工艺对井眼轨道测量与控制提出了更高的要求。由于随钻测量技术(MWD)测量滞后和定位精度低等问题^[4-7],传统的MWD技术在水平井1700 m井深处累积综合误差达31.55 m(图1中红色线条表示累积误差与井深的关系),因此该技术远不能满足煤层气水平井两井连通的精确轨道测控要求。

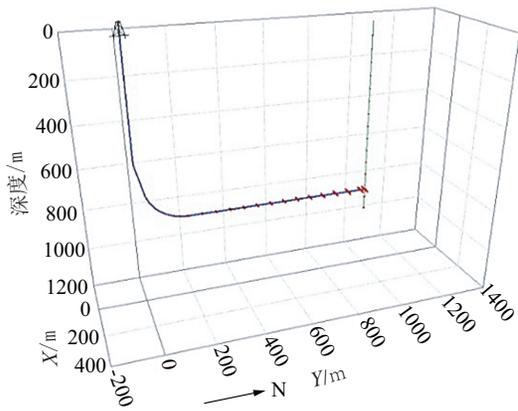


图1 煤层气U型水平井MWD测量误差分布
Fig.1 Distribution of MWD measurement errors for CBM U horizontal wells

基于煤层气特殊的轨迹测控需求,美国VM公司提出了利用近钻头旋转磁场测量技术(RMRS),基本解决了煤层气水平井两井对接难题^[8-11],但存在连通成功率低、测量范围小等问题。2020年笔者深入研究了近钻头磁场测量原理和煤层气对接水平井钻井工艺,形成系统的磁导向钻井理论,并分析了钻头、地磁等干扰因素对磁定位精度的影响机制,提出了基于微弱磁场信号的卡尔曼定位方法等有效措施,成功解决了煤层气U型水平井远距离(110~1 m)精确磁导向技术难题,连通靶区可有效控制在排采直井 $\varnothing 177.8$ mm井筒范围内。

1 煤层气U型水平井磁导向钻井理论

磁导向钻井技术通过实时检测地下近千米处的人工旋转磁场的分布特征,经软件处理、控制,实现

在钻井过程中对邻井井眼空间位置进行高精度定位与导航(如图2所示),实时调整水平井井眼轨迹,达到两井的精确连通^[12-13]。

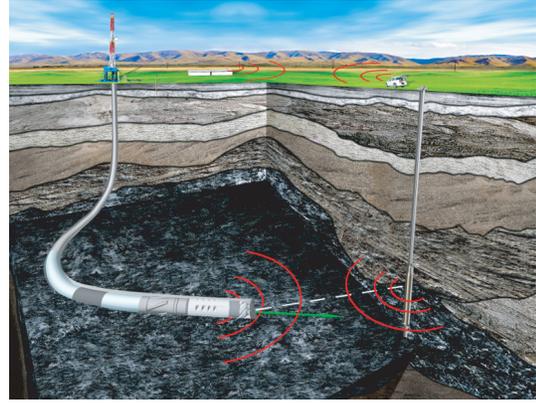


图2 磁导向钻井工艺原理
Fig.2 Drilling with magnetic ranging

依据ISCWSA国际标准误差测量模型^[14-15],水平井钻进至距离排采直井100 m处MWD水平方向累积误差最大为28.37 m,垂深误差为3.17 m,方位偏差预测最大为15.64°。煤层气对接水平井在距离靶区约100 m范围开始进行磁导向作业,实时测量的参数包括钻头与直井的距离(R)、方位偏差(φ),利用磁导向高精度定位数据校准水平井轨迹参数,并进行扭方位作业,最终将井眼轨迹水平方向偏差控制在0.17 m以内,实现煤层气水平井与排采直井的精确连通,如表1所示。

在图2中,近钻头的磁源发射装置在钻井过程产生三维旋转磁场(H_x, H_y, H_z);在排采直井的玻璃钢管或洞穴中放置一组动态磁场信号采集传感器,实时采集传感器位置三维动态磁场参数,基于以下磁导测量模型^[16-17]进行定位计算:

$$R = \mu \sqrt{1/(H_x^2 + H_y^2 + H_z^2)} \quad (1)$$

$$\varphi = a \tan [3 \tan \theta / (1 - 2 \tan^2 \theta)] \quad (2)$$

$$\theta = a \tan [H_y / (2H_x)] \quad (3)$$

式中: μ ——校正系数,需地面标定,无量纲; a ——定义向量与钻进方向的夹角; θ ——钻进方向与洞穴直井的偏差角。

基于以上磁导向测量模型,设计出用于煤层气水平井连通作业的DRMTS型远距离穿针测量系统^[18]。该装备主要由磁源发射装置、旋转磁场采集

表 1 煤层气 U 型水平井磁导向钻井方案

Table 1 Magnetic ranging plan for "U" type CBM horizontal well intersection

井深/m	井斜角/(°)	垂深/m	最大水平误差/m	最大垂深误差/m	方位角偏差/(°)	测控模式
100	0	100	0.19	0.71		传统 MWD 测控
500	0	500	1.09	0.91		传统 MWD 测控
1000	90	800	9.39	1.32	0.76	传统 MWD 测控
1500	90	800	25.19	2.83	7.18	传统 MWD 测控
1600	90	800	28.37	3.17	15.64	传统 MWD 测控
1700	90	800	0.17	1.00	1.00	磁导向

系统、地面工控机、提升绞车等组成,具体如图 3 所示。磁源发射装置本体由无磁钢棒料加工制成,并在其上镶嵌一些强磁圆柱体,主要作用是在钻柱旋转时形成一个“旋转磁场”,频率与钻柱旋转频率相同,约为 2~5 Hz;阵列磁通门传感器主要用来探测旋转磁场信号(H_x, H_y, H_z),并将测量的信号采集、放大,通过电缆传输到洞穴井井口;采集到的磁场信号通过地面无线传输系统从直井发送到水平井接收终端,最后通过以上建立的磁场测量模型和工程软件实时计算钻头与目标井间的距离和方向偏差。

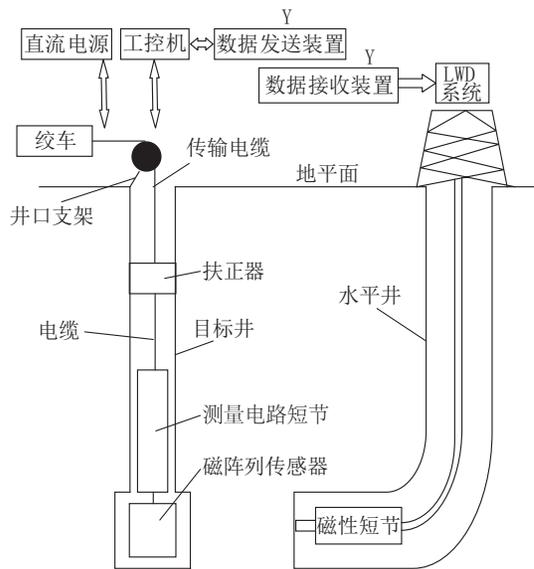


图 3 远距离穿针测量系统组成及原理示意

Fig.3 Schematic diagram of the long distance ranging system for well intersection

2 磁导向钻井测量精度的影响因素分析及对策

2.1 井下磁矩降低带来的误差及消除算法

在磁导向钻井距离测量算法中,距离 R 与该位置磁场大小(H_x, H_y, H_z)呈对应反比关系,其中 μ 需

在地面进行准确标定。但是设备入井后,由于磁场受地层、钻头、套管等的干扰,下井后的标定系数 μ 的数值与地面不同,为距离测量带来误差。

煤层气水平井的井眼轨迹由一系列离散测点的连线组成,在 2 个测量点之间的距离小于 5 m 情况下,定义测点间的连线为一条直线。建立如图 4 所示的三角形,其中 L_1 为 2 个相邻测点的连线, R_1 为第一个测点与洞穴的连线, R_2 为第二个测点与洞穴的连线。

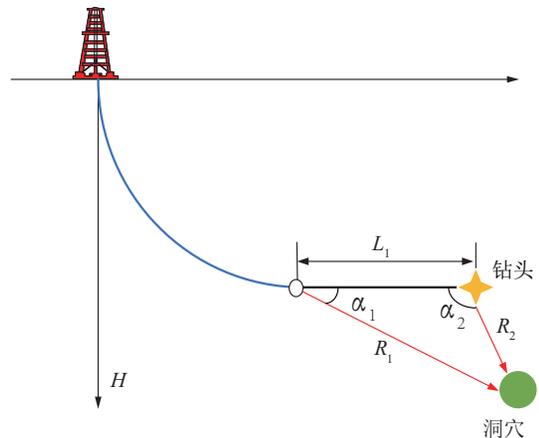


图 4 距离校正算法示意

Fig.4 Schematic diagram of iterative approximation algorithm

由于在第一个和第二个测点的测量中,我们可以实时测量钻进方向 L_1 与 R_1 及 R_2 连线的角度偏差,根据三角形的正弦原理,可得 R_2 计算公式:

$$R_2 = L_1 \sin \alpha_1 / \sin (\alpha_2 - \alpha_1) \quad (4)$$

式中: α_1, α_2 ——分别为 L_1 与 R_1, R_2 的夹角。

2.2 远距离微弱磁场信号条件下的高精度定位方法

在地面测试实验中,我们发现在微弱磁场条件

下仪器测量的距离始终不稳定,即使在定转速条件下仍然不稳定。导致测量不稳定因素的关键是磁场采集传感器精度与信号达到了同一量级,即0.1~1 nT,干扰磁场对测量结果的稳定性造成了非常大的影响。针对这一问题,开发了基于卡尔曼算法的井下定位方法,以消除远距离条件下弱磁场信号的影响,解决了测量的稳定性和可靠性。

钻进过程中,测取钻进标记点测量参数(即距离和方位偏差),通过对所测标记点之前所形成的多个连续所测磁场信号进行综合分析,然后对所测得的各标记点的测量参数进行卡尔曼滤波计算,通过对各标记点的测量参数进行卡尔曼滤波计算后,消除了各种噪声、干扰的影响,使滤波输出逐渐收敛,大幅提高远场定位精度。图5为测点与洞穴位置关系图。

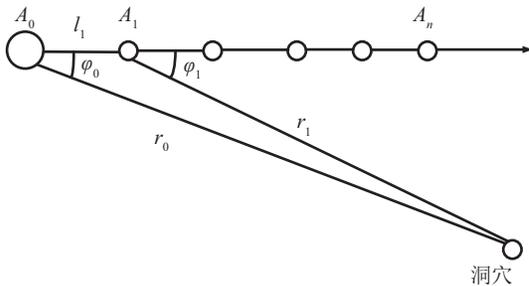


图5 连续测量过程测点与洞穴位置关系

Fig.5 Relationship between the survey station and the target cavity during continuous survey

连续测量过程的卡尔曼定位测量计算主要包括以下3个步骤:

(1)数据采集。设定水平井钻头的钻进标记点 $[A_0, A_1, \dots, A_n]$;采集钻头在相邻两标记点所形成的磁场信号 $[S_1, S_2, \dots, S_n]$ 。

(2)单点计算。根据单点定位测量模型计算各标记点 $[A_0, A_1, \dots, A_n]$ 所对应的测量参数 $[Z_0, Z_1, Z_2, \dots, Z_n]$ 。

(3)连续测量数据的卡尔曼滤波。对各标记点的测量参数 $[Z_0, Z_1, Z_2, \dots, Z_n]$ 进行卡尔曼滤波计算,得到钻头当前位置的最优估计值。

3 煤层气水平井磁导向钻井现场试验与应用

3.1 距离校正算法现场试验

试验采用在磁源发射装置前端加装铁质圆盘的

方法,模拟井下钻头等铁磁物质对旋转磁场的干扰。圆盘的直径为0.5 m,材料为普通钢材。

图6中X轴25 m处的点是校正逼近的起始值,由于圆盘的干扰,距离测量结果较未干扰情况下的值大近2 m;从20 m的位置开始迭代逼近。从图6可看出,当钻头前进5 m进尺后,距离测量结果经过迭代能够良好地逼近无干扰下的测量值,后续的钻井测量可完全消除井下工况带来的定位干扰。

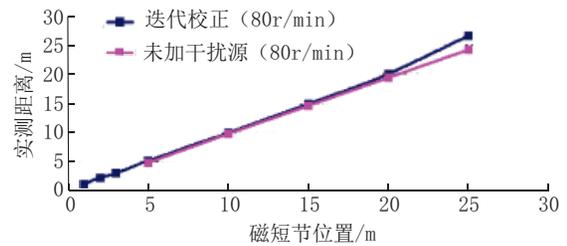


图6 迭代逼近校正算法计算结果对比

Fig.6 Results of interference-free measurement vs those by iterative approximation correction algorithm

3.2 卡尔曼定位算法现场应用

煤层气水平井井下穿针测量结果受到磁场采集环境、Butter滤波带宽设置等因素影响,在某一井深位置单次测量的洞穴与钻头间距离及角度测量结果波动幅值超过了5%。为了提高单点测量精度,去除测量中的噪声问题,引入卡尔曼滤波方法降低了测量值的波动,利用卡尔曼滤波后,消除了各种噪声、干扰的影响,使滤波输出逐渐收敛,水平钻井导向角度测量精度小于1°的技术要求,大幅提高远场定位精度,取得了较好应用效果。

下面以ZP02井的实测数据为例进行卡尔曼滤波测量模型的评价。在该井的连续钻进过程中,在某一时刻 t ,钻头洞穴的位置参数的标定值分别为:距离40.47 m,方位角164.34°,井斜角90.23°。由单点定位算法计算得到测量位置参数为:距离38.57 m,方位角162.66°,井斜角88.37°。采用连续测量的卡尔曼滤波模型的计算结果如图7所示。从图7中可以看出,单次测量值受到噪声及杂波的影响起伏波动较大,而经过卡尔曼滤波后,滤波输出逐渐收敛。输出距离40.06 m,误差为0.41 m。由上述计算结果可知,井下卡尔曼滤波算法精度远高于单点定位算法精度。

另外在该井距离靶点75~65 m范围进行了微

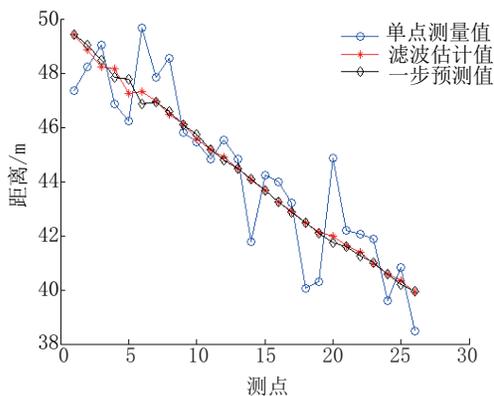


图 7 距离洞穴 40.47 m 处的卡尔曼滤波结果
Fig.7 Kalman filtering results at distance of 40.47m to the cavity

弱磁场定位试验,如图 8 所示。从图中可以看出,由于磁场信号的迅速减弱,单次测量误差波动十分剧烈,距离的均方根误差分别达到 6 m 以上,此时直接根据单次测量结果进行定位没有实际意义。而卡尔曼滤波方法在信号微弱的情况下依然具有较好的收敛性质。

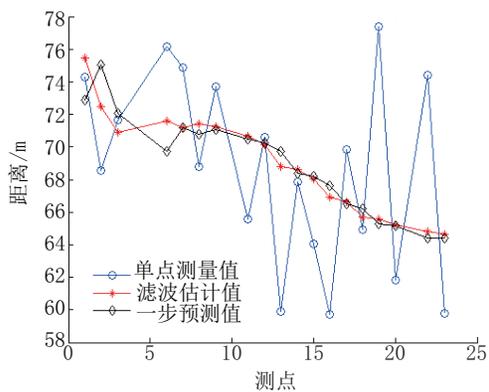


图 8 距离洞穴 75 m 处的卡尔曼滤波结果
Fig.8 Kalman filtering results at distance of 75m to the cavity

3.3 磁导向钻井技术现场试验与应用

下面以 ZP-H1 井磁导向钻井现场应用为例,论述煤层气水平井磁导向钻井工艺。DRMTS 远距离穿针工具在 951.5~999 m 深的井段进行了磁导向定位作业,完成了钻头和洞穴井的距离和方位偏差等测量多项工作。仪器入井后即发现磁场信号,并开始导向,此时测量的方位偏差为 9.2°,图 9 中的红点为 MWD 常规定向钻井时设定的靶点,十字靶点为

磁导向定位靶点;通过 11 次磁导向钻井测控作业,在距离洞穴 1.5 m 时方位偏差调整为 -0.72°,靶心距为 19 mm,成功击中煤层顶部 1.4 m 处的玻璃钢套管,实现了击中小靶区的预期目标。

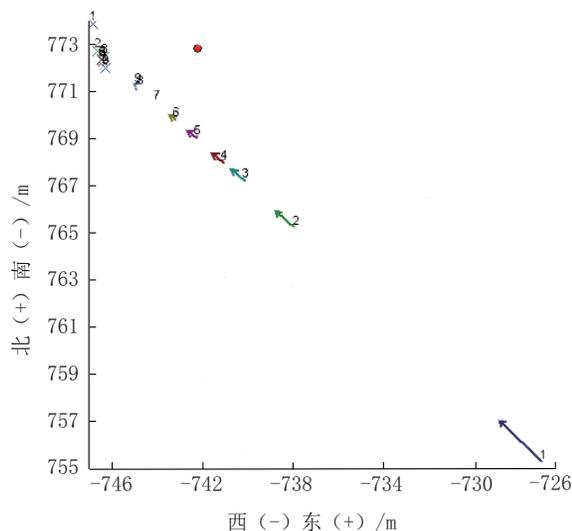


图 9 DRMTS 磁导向钻井过程
Fig.9 Guidance process with the DRMTS magnetic ranging system

4 结论

(1)通过测量井下人工旋转磁场(H_x, H_y, H_z)的分布特征,利用建立的磁定位模型实现对邻井井眼空间位置进行高精度定位与导航,达到两井精确连通的目标。

(2)距离校正方法可良好地逼近无干扰下的测量值,完全消除了井下磁场受地层、钻头、套管等干扰对磁定位的影响。

(3)远场条件下磁信号与传感器精度达到了同一量级,测量的稳定性和重复性不能够有效保证。基于卡尔曼的定位算法可解决弱磁场环境下测量值的可靠性难题。

(4)在磁导向钻井的实践中,验证了磁导向钻井理论在煤层气 U 型水平井的精确对接领域应用的可行性,定向连通靶区可控制在 $\varnothing 177.8$ mm 以内。

参考文献 (References):

[1] 黄洪春, 卢明, 申瑞臣. 煤层气定向羽状水平井钻井技术研究 [J]. 天然气工业, 2004, 24(5): 76-78.
HUANG Hongchun, LU Ming, SHEN Ruichen. Study on pinnate horizontal directional drilling technique of coal-bed gas [J].

- Natural Gas Industry, 2004, 24(5):76-78.
- [2] 赵凌云, 易同生. 煤层气水平井井型结构分析及钻完井技术优化[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(3):221-226.
ZHAO Lingyun, YI Tongsheng. Analysis on well type structure and optimization of associated drilling technology of CBM horizontal wells[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(3):221-226.
- [3] 王植锐. 煤层气多分支水平井钻井技术实践[J]. 钻采工艺, 2015, 38(6):105-108.
WANG Zhirui. Coal bed multi-lateal well dilling technology and its application[J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(6):105-108.
- [4] 石元会, 刘志申, 葛华. 国内随钻测量技术引进及现场应用[J]. 国外测井技术, 2009(169):9-13.
SHI Yuanhui, LIU Zhishen, GE Hua. Introduction and field application of measurement while drilling (MWD) technology[J]. World Well Logging Technology, 2009(169):9-13.
- [5] 郝世俊, 张晶. 我国煤层气钻井技术及装备现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(4):16-21, 32.
HAO Shijun, ZHANG Jing. Status and prospect of coalbed methane drilling technique and equipment in China[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(4):16-21, 32.
- [6] 黄勇, 姜军. U型水平连通井在河东煤田柳林地区煤层气开发的适应性分析[J]. 中国煤炭地质, 2009, 21(S1):32-36, 43.
HUANG Yong, JIANG Jun. Adaptability analysis of U shaped horizontal connected wells in CBM exploitation in Liulin area, Hedong Coalfield[J]. Coal Geology of China, 2009, 21(S1):32-36, 43.
- [7] 董胜伟, 申瑞臣, 乔磊, 等. 煤层气水平井连通工具测量误差分析[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(2):56-58, 62.
DONG Shengwei, SHEN Ruichen, QIAO Lei, et al. Measuring errors analysis in communicating operation for CBM horizontal wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(2):56-58, 62.
- [8] 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.
- [9] A.G.Nekut, A.F.Kuckes, R.G.Pitzer. Rotating magnet ranging—A new drilling guidance technology[C]//SPE 8th One Day Conference on Horizontal Well Technology. Canadian: 2001.
- [10] D. L. Jones. Improved magnetic model for determination of range and direction to a blowout well[J]. SPE 14388, 1985.
- [11] C.K.Pratt. A magnetostatic well tracking technique for drilling of horizontal parallel wells[J]. SPE 28319, 1994.
- [12] 商敬秋, 武程亮, 刘汪威, 等. 无建槽直井的定向中靶作业[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(1):13-16.
SHANG Jingqiu, WU Chengliang, LIU Wangwei, et al. Oriented target-hitting operation for vertical well without cavity building[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(1):13-16.
- [13] 岳盈括. 大汶口盆地岩盐对接井钻探施工工艺研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(3):31-37, 43.
YUE Yingkuo. Study on drilling technology of rock salt butting well in Dawenkou Basin[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(3):31-37, 43.
- [14] 周聪. 基于ISCWSA模型的井眼轨迹测量误差计算与可视化[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
ZHOU Cong. Calculation and 3D visualization of well trajectory measurement error based on the ISCWSA model[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.
- [15] 唐宁, 熊祖根, 王贵刚. 定向随钻测量误差分析及应用[J]. 钻采工艺, 2016, 39(5):22-25, 101.
TANG Ning, XIONG Zugen, WANG Guigang. Error analysis for directional measurement while drilling and its application[J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(5):22-25, 101.
- [16] 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.
- [17] 乔磊, 孟国营, 范迅, 等. 煤层气水平井连通井组轨道设计与控制方法研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(2):284-287.
QIAO Lei, MENG Guoying, FAN Xun, et al. Design and control methods of remote intersection wells for development of coal-bed methane[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(2):284-287.
- [18] 罗亮, 王继峰, 顾黎明, 等. DRMTS煤层气远距离穿针装备及现场应用[J]. 长江大学学报(自科版), 2015, 12(8):51-52.
LUO Liang, WANG Jifeng, GU Liming, et al. Long distance needling equipment and field application of DRMTS coalbed methane[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2015, 12(8):51-52.

(编辑 李艺)