

单弯双稳螺杆钻具组合防斜纠斜能力研究

童召军, 刘恒, 栾宝琨*, 乔洪国, 姜珊, 张海, 韩海亮

(山东省煤田地质局第一勘探队, 山东青岛 266400)

摘要:随着我国对深部地质资源勘探开发的不断深入,深部矿藏已成为地质找矿工作的重点。在深部找矿钻探过程中,高陡构造地层直井段保直问题,是一直困扰钻井技术人员的一个主要难题,严重影响深部矿藏的勘探效率。在易发生井斜段,单弯双稳螺杆钻具是最常用的防斜纠斜钻具组合。本文基于纵横弯曲梁法和平衡趋势原理建立底部钻具组合力学模型,通过模型分析各个因素对纠斜能力的影响规律,结合正交试验设计方法,确定主控因素;最后,基于多目标优化理论,建立防斜打快钻井控制参数多目标优化方法,获取最优参数组合。基于上述研究,形成一套防斜打直优化设计方法,提高高陡构造地层直井段钻探效率,推动深部矿藏的高效、低成本钻探和开发。

关键词:高陡构造;单弯螺杆;力学模型;正交试验;防斜打直

中图分类号:P634.7 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)05-0145-09

Research on the correction and anti-inclination capability of single bend double stable screw drilling tool combination

TONG Zhaojun, LIU Heng, LUAN Baokun*, QIAO Hongguo, JIANG Shan, ZHANG Hai, HAN Hailiang
(The First Exploration Team of Shandong Coalfield Geologic Bureau, Qingdao Shandong 266400, China)

Abstract: With the deepening of exploration and development of deep geological resources in China, deep mineral deposits have become the focus of geological prospecting work. In the process of deep prospecting and drilling, the problem of maintaining the straightness of the vertical well section in the high steep structure has been a major problem for drilling technicians, which seriously affects the exploration efficiency of deep mineral deposits. In the inclined section, the single bend bistable screw drill is the most commonly used anti-deviation and correction drill assembly. In this paper, a mechanical model of BHA is established based on the crossbar bending beam method and the principle of equilibrium trend. The influence law of each factor on the deviation correction ability is analyzed through the model, and the main control factor is determined by the orthogonal test design method. Finally, based on the theory of multi-objective optimization, a multi-objective optimization method for control parameters of fast drilling is established to obtain the optimal parameter combination. Based on the above research, a set of anti-skew and straightening optimization design method is developed to improve the drilling efficiency of the vertical well section of the high steep structure, and promote the efficient and low-cost drilling and development of deep mineral deposits.

Key words: high steep structure; single bend screw; mechanical model; orthogonal test; anti-slant straightening

0 引言

高陡构造地层防斜打快一直是困扰钻井工作

人员的一个主要难题^[1]。从国内外现有的技术来看,垂直钻井系统和导向钻井系统是井斜控制技术

收稿日期:2023-11-22;修回日期:2024-06-21 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.05.018

基金项目:山东省煤田地质局 2022—2023 年度科研专项“急倾斜地层防斜打快技术研究”(编号:鲁煤地科字[2022]24 号)

第一作者:童召军,男,汉族,1990 年生,工程师,主要从事水文地质、工程地质和环境地质方面的研究工作,山东省青岛市西海岸新区凤凰台路 169 号,1099973518@qq.com。

通信作者:栾宝琨,男,汉族,1988 年生,工程师,主要从事勘查技术与工程方面的研究工作,山东省青岛市西海岸新区凤凰台路 169 号,1349880215@qq.com。

引用格式:童召军,刘恒,栾宝琨,等.单弯双稳螺杆钻具组合防斜纠斜能力研究[J].钻探工程,2024,51(5):145-153.

TONG Zhaojun, LIU Heng, LUAN Baokun, et al. Research on the correction and anti-inclination capability of single bend double stable screw drilling tool combination[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5): 145-153.

的发展方向,但是该系统成本高且技术复杂,目前主要依赖进口,在国内尚未大面积推广应用^[2]。目前最常用的防斜纠斜钻具组合是单弯螺杆钻具,小弯度的单弯螺杆钻具配合转盘复合钻进可以有效地控制井斜,这种钻具组合可在小钻压、低转速条件下有效地控制井斜实现机械钻速的提高,且不会影响下部钻具组合的安全使用,达到了安全、高效、低成本控制井斜的目的^[3]。单弯螺杆钻具组合仅依靠螺杆转速进行连续滑动造斜钻进时,配合MWD随钻系统可以实现快速纠斜的目的^[4]。

在复杂的地层条件下,单弯螺杆钻具组合(以下简称BHA)的结构参数是制约钻进速度的关键因素。针对钻具防斜性能评价方法,有学者已经做了充分研究,如苏义脑、白家祉等^[5-7]共同建立了基于纵横弯曲梁法的底部钻具组合分析方法。龚伟安^[8]设计了一种压不弯钻铤装置,来减少钻柱弯曲,从而达到控制井斜的目的。狄勤丰等^[9]提出一种预弯曲动力学防斜打快技术。管志川、史玉才等^[10-11]提出用“井斜趋势角”指标来评价钻具组合。

本文基于纵横弯曲梁法和平衡趋势原理建立了单弯螺杆钻具组合的防斜纠斜能力评价模型,通过模型分析各个因素对纠斜能力的影响规律,结合正交试验设计方法,确定主控因素;最后,基于多目标优化理论,建立防斜打快钻井控制参数多目标优

化方法,获取最优参数组合。

1 底部钻具组合(BHA)力学模型

为求解钻进趋势角,需首先通过BHA受力分析计算出钻头侧向力和钻头转角。单弯双稳BHA的基本结构可以简化为“钻头+稳定器(欠尺寸)+弯螺杆+短钻铤+稳定器+长钻铤”,如图1所示。

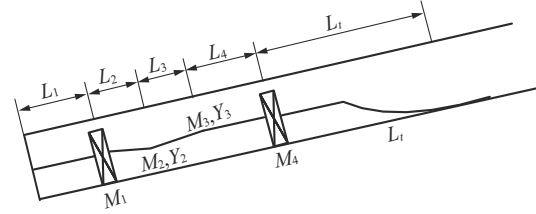


图1 单弯双稳BHA力学模型示意

Fig.1 Schematic diagram of single bend bistable BHA mechanical model

采用纵横弯曲连续梁法进行BHA受力分析^[12]。将螺杆从最大弯角和螺杆-短钻铤变截面处断开新增两跨,两截面处附加内弯矩,截面坐标未知。从钻头至上切点,钻柱可划分为五跨,其中 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 、 L_i 等7个量未知,根据连续性条件可列出6个三弯矩方程,边界条件为上切点处 $\theta_r = \theta_l = \sum_{i=1}^5 L_i K$ 。将边界条件代入连续性条件,即可求得个支座处的内弯矩。

$$(1) \theta_1^R = -\theta_2^L$$

$$2M_1 \left[Y(u_1) + \frac{I_1 L_2}{I_2 L_1} Y(u_2) \right] + \frac{L_2 I_1}{L_1 I_2} Z(u_2) M_2 - \frac{6EI_1}{L_1 L_2} Y_2 = -\frac{1}{4} q_1 L_1^2 X(u_1) - \frac{q_2 I_1 L_2^3}{4I_2 L_1} X(u_2) - \frac{6EI_1}{L_1} \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \right) Y_1 \quad (1)$$

$$(2) \theta_2^R = -\theta_3^L$$

$$M_1 Z(u_2) + 2M_2 \left[Y(u_2) + \frac{I_2 L_3}{I_3 L_2} Y(u_3) \right] + \frac{6EI_2}{L_2} \left(\frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} \right) Y_2 + \frac{L_3 I_2}{L_2 I_3} Z(u_3) M_3 - \frac{6EI_2}{L_2 L_3} Y_3 = -\frac{1}{4} q_2 L_2^2 X(u_2) - \frac{q_3 I_2 L_3^3}{4I_3 L_2} X(u_3) + \frac{6EI_2}{L_2} \left(\frac{Y_1}{L_2} - \gamma \right) \quad (2)$$

$$(3) Q_a = Q_b$$

$$\frac{M_1}{L_2} - \left(\frac{1}{L_3} + \frac{1}{L_2} \right) M_2 + \left(\frac{P_3}{L_3} + \frac{P_2}{L_2} \right) Y_2 + \frac{M_3}{L_3} - \frac{P_3 Y_3}{L_3} = -\frac{(q_3 L_3 + q_2 L_2)}{2} + \frac{P_2 Y_1}{L_3} \quad (3)$$

$$(4) \theta_3^R = -\theta_4^L$$

$$M_2 Z(u_3) - \frac{6EI_3}{L_3} \frac{Y_2}{L_3} + 2M_3 \left[Y(u_3) + \frac{I_3 L_4}{I_4 L_3} Y(u_4) \right] + \frac{6EI_3}{L_3} \left(\frac{1}{L_3} + \frac{1}{L_4} \right) Y_3 + \frac{L_4 I_3}{L_3 I_4} Z(u_4) M_4 =$$

$$-\frac{1}{4} q_3 L_3^2 X(u_3) - \frac{q_4 I_3 L_4^3}{4I_4 L_3} X(u_4) + \frac{6EI_3}{L_3} \frac{Y_4}{L_4} \quad (4)$$

$$(5) Q_c = Q_d$$

$$\frac{M_2}{L_3} - \frac{P_3 Y_2}{L_2} - \left(\frac{1}{L_3} + \frac{1}{L_4} \right) M_3 + \left(\frac{P_3}{L_3} + \frac{P_4}{L_4} \right) Y_3 + \frac{M_4}{L_4} = -\frac{(q_3 L_3 + q_4 L_4)}{2} + \frac{P_4 Y_4}{L_4} \quad (5)$$

$$(6) \theta_4^R = -\theta_5^L$$

$$M_3 Z(u_4) - \frac{6EI_4}{L_4} \frac{Y_3}{L_4} + 2M_4 \left[Y(u_4) + \frac{I_4 L_5}{I_5 L_4} Y(u_5) \right] = -\frac{1}{4} q_4 L_4^2 X(u_4) - \frac{q_5 I_4 L_5^3}{4I_5 L_4} X(u_5) -$$

$$\frac{L_5 I_4}{L_4 I_5} Z(u_5) M_5 + \frac{6EI_4}{L_4} \left(\frac{Y_5 - Y_4}{L_5} - \frac{Y_4}{L_4} \right) \quad (6)$$

$$(7) \theta_T = \theta_R = \sum_{i=1}^5 L_i K$$

$$\frac{1}{4} q_5 L_5^4 X(u_5) + L_5^2 (2M_5 Y(u_5) + M_4 Z(u_5)) = 6EI_5 \left(\sum_{i=1}^5 L_i K L_5 - Y_5 + Y_4 \right) \quad (7)$$

式中: L_i ——第 i 跨梁柱的长度, m; I_i ——第 i 跨梁柱的惯性矩, cm^4 ; P_i ——第 i 跨梁柱的轴向力, kN; q_i ——第 i 跨梁柱的线重, kg/m; E ——钻柱弹性模量, Pa; M_i ——为第 i 个支座处的内弯矩, $\text{kN}\cdot\text{m}$; Y_i ——第 i 个支座的坐标, m; $X(u_i)$ 、 $Y(u_i)$ 、 $Z(u_i)$ ——分别为第 i 跨梁端部转角的放大因子, 无量纲; θ_T ——上切点处的端部转角, rad; T ——切点, 无量纲; K ——井眼曲率, rad/m。

将式(1)~(6)联立求出 M_1 、 Y_i , 即可计算出钻头处的侧向力和转角:

$$N_b = -\left(\frac{P_b Y_1}{L_1} + \frac{q_1 L_1}{2} + \frac{M_1}{L_1} \right) \quad (8)$$

$$A_a = \frac{q_1 L_1^3}{24EI_1} X(u_1) + \frac{M_1 L_1}{6EI_1} Z(u_1) - \frac{Y_1}{L_1} \quad (9)$$

式中: N_b ——钻头侧向力, N; A_a ——钻头转角, ($^\circ$)。

2 基于钻进趋势角的 BHA 防斜评价模型

图 2 为 BHA 钻进趋势示意图, 在钻头处建立一个井底坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$, 以钻头的实际钻进方向为 X_1 轴正向, 以井眼高边方向为 Z_1 轴正向。向量 e_r 为钻进趋势方向单位向量(即钻头合速度方向), e_f 为钻头合力方向单位向量, e_a 为钻头轴线方向单位向量, e_d 为地层法向单位向量, A_r 为钻进趋势方向与实际钻进方向之间的夹角, 称为钻进趋势角^[13]。

假设地层为横向各向同性, 钻头与地层相互作用的 NL 模型可以表示为:

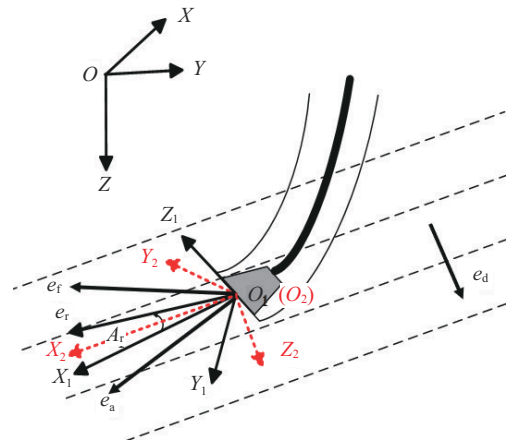


图 2 BHA 钻进趋势示意

Fig.2 Schematic diagram of BHA drilling trend

$$r_N e_r = I_b I_r e_f + I_r (1 - I_b) \cos A_{af} e_a + (1 - I_r) r_N \cos A_{rd} e_d \quad (10)$$

式中: I_b 、 I_r ——钻头、地层各向异性指数, 无量纲; A_{af} ——钻头合力方向和钻头轴向方向的夹角, ($^\circ$); A_{rd} ——钻进方向和地层层面法线方向的夹角, ($^\circ$); r_N ——一般状态下的钻进效率, 无量纲; e_r 、 e_f 、 e_a 、 e_d ——分别为钻进趋势方向、钻头合力方向、钻头轴线方向及地层层面法线方向的单位矢量。

通过求解钻头与地层相互作用的 NL 模型, 即可求得钻进趋势角 A_r ^[14-16]。如图 2 所示为建立钻头参数和地层参数的转换关系, 在井底坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 的基础上建立井口坐标系 $O-XYZ$ 和地层

坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$, 以正北方向为 X 轴的轴正向, 以正东方向为 Y 轴的轴正向; 以地层下倾方向为 X_2 轴的轴正向, 地层层面的法线方向向下为 Z_2 轴的轴正向, Y_2 轴的正向由右手定则确定。为了确定坐标

轴的转换关系, 须确定井底坐标系 $O-X_1Y_1Z_1$ 的方向余弦 lA 、 mA 、 nA 和地层坐标系 $O-X_2Y_2Z_2$ 的方向余弦 lB 、 mB 、 nB :

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \alpha \cos \varphi & \sin \alpha \sin \varphi & \cos \alpha \\ \sin \varphi & -\cos \varphi & 0 \\ \cos \alpha \cos \varphi & \cos \alpha \sin \varphi & -\sin \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = [K_1] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \beta \cos \theta & \sin \beta \sin \theta & \cos \beta \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\cos \beta \cos \theta & -\cos \beta \sin \theta & \sin \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = [K_2] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: α 、 φ ——分别表示井底井斜角和方位角, ($^\circ$); β ——地层倾角, ($^\circ$); θ ——地层倾向, ($^\circ$)。

令 $[K] = [K_1] \cdot [K_2] - 1$, 在井底坐标系中, e_f, e_a, e_r, e_d 可分别表示为:

$$e_f = \cos \alpha_f e_1' + \cos \beta_f e_2' + \cos \gamma_f e_3' = \frac{P_b}{\sqrt{P_b^2 + N_{ba}^2 + N_{b\varphi}^2}} e_1' - \frac{N_{b\varphi}}{\sqrt{P_b^2 + N_{ba}^2 + N_{b\varphi}^2}} e_2' + \frac{N_{ba}}{\sqrt{P_b^2 + N_{ba}^2 + N_{b\varphi}^2}} e_3' \quad (14)$$

$$e_a = \cos \alpha_a e_1' + \cos \beta_a e_2' + \cos \gamma_a e_3' = \cos A_a \cos A_\varphi e_1' + \sin A_\varphi e_2' + \sin A_a \cos A_\varphi e_3' \quad (15)$$

$$e_r = [\cos \alpha_r, \cos \beta_r, \cos \gamma_r] \begin{bmatrix} e_1'' \\ e_2'' \\ e_3'' \end{bmatrix} = \cos \alpha_r e_1'' + \cos \beta_r e_2'' + \cos \gamma_r e_3'' \quad (16)$$

$$e_d = e_3'' = [K] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = [K_{13}, K_{23}, K_{33}] \begin{bmatrix} e_1' \\ e_2' \\ e_3' \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: e_1', e_2', e_3' ——表示井底坐标系的基向量; $\alpha_f, \beta_f, \gamma_f$ ——分别为钻头合力矢量 e_f 与坐标轴 X_1, Y_1, Z_1 的夹角; $\alpha_a, \beta_a, \gamma_a$ ——分别为钻头轴向方向矢量 e_a 与坐标轴 X_1, Y_1, Z_1 的夹角; e_1'', e_2'', e_3'' ——表示地层坐标系的基向量; $\alpha_r, \beta_r, \gamma_r$ ——分别表示钻进方向矢量 e_r 与坐标轴 x'', y'' 和 z'' 的夹角, 为待求参数。

将上述 4 个单位矢量代入 NL 模型得:

$$[K] \begin{bmatrix} \cos \alpha_r \\ \cos \beta_r \\ I_r \cos \gamma_r \end{bmatrix} = \frac{1}{r_N} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中:

$$S_1 = I_b I_r \cos \alpha_f + I_r (1 - I_b) \cos A_{af} \cos \alpha_a$$

$$S_2 = I_b I_r \cos \beta_f + I_r (1 - I_b) \cos A_{af} \cos \beta_a$$

$$S_3 = I_b I_r \cos \gamma_f + I_r (1 - I_b) \cos A_{af} \cos \gamma_a$$

求解 $\cos \alpha_r$ 并转换至井底坐标系即可求得钻进

趋势角 A_r 。 A_r 为正时有增斜趋势, A_r 为负时有降斜趋势, 绝对值越大增/降斜能力越强。

3 BHA 纠斜能力影响因素敏感性分析

影响钻具组合防斜能力的因素可以分为 2 类, 即地质因素和结构因素^[17]。地质因素包括地层倾角层状结构、各向异性、岩性的软硬交错以及断层等; 结构因素主要包括钻井参数、钻头选型、BHA 结构设计等, 这类因素是可调控的。为分析各个因素对钻具组合防斜纠斜能力的影响, 以 $\varnothing 215.9$ mm 井眼为例, 选取最常用的单弯双稳螺杆钻具组合 (图 3): $\varnothing 215.9$ mm 牙轮钻头 $\times 0.25$ m + $\varnothing 172$ mm 螺杆 (1° 弯角, $\varnothing 212$ mm 扶正器) 4×8.10 m + $\varnothing 177.8$ mm 短钻铤 $\times 2$ m + $\varnothing 214$ mm 扶正器 + $\varnothing 177.8$ mm 钻铤 $\times 81.71$ m + $\varnothing 127$ mm 钻杆, $L_1 = 0.484$ m, $L_2 = 0.594$ m, $L_3 = 7.272$ m。相关参数设计见表 1。

首先分析地层倾角、地层各向异性、井斜角和

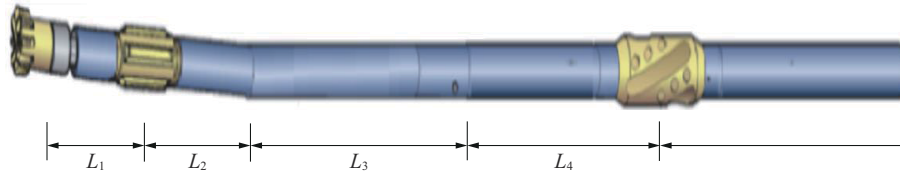


图3 单弯双稳螺杆钻具组合

Fig.3 Single-bend double-stabilized screw drilling tool combination

表1 影响钻具组合纠斜能力的参数取值
Table 1 The value of the parameter that affects the combined delinquency correction ability of the drilling tool

参数项	模拟取值
地层倾角/(°)	5
地层各向异性 I_r	0.98
井斜角/(°)	3
钻压 P_0 /kN	40
钻头各向异性 I_b	0.20

井斜趋势角的关系(图4~6),结果表明,地层倾角、地层各向异性、井斜角对井斜趋势角的影响并不大,这说明单弯双稳螺杆钻具组合对不同的地层条件具有很强的适应性,在不同的地层条件下均具有很强的防斜纠斜能力。

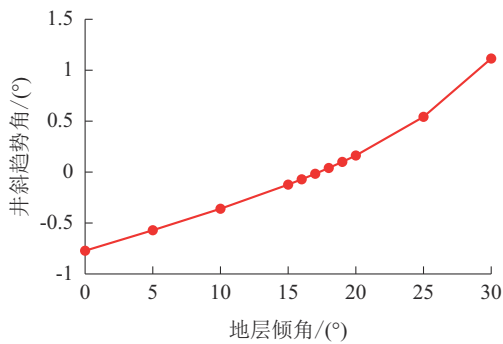


图4 地层倾角对井斜趋势角的影响

Fig.4 Effect of formation dip angle on well deviation trend angle

图7为钻压对井斜趋势角的影响,随钻压增大,上述钻具组合复合钻进时防斜打直能力逐渐减弱,综合考虑复合钻进防斜打直和螺杆钻具额定钻压要求,推荐钻压40~60 kN,井斜角较大时可适当降低钻压提高纠斜能力。

钻头方面,常用钻头各向异性指数来描述不同类型钻头的切削特性,钻头各向异性指数越大,代

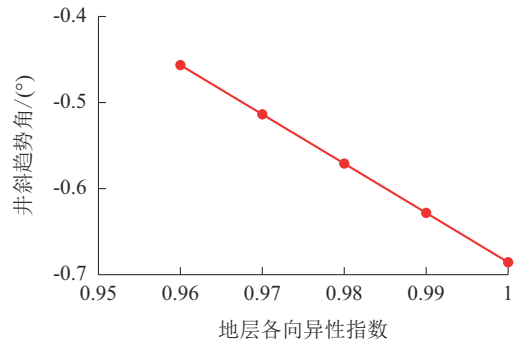


图5 地层各向异性对井斜趋势角的影响

Fig.5 Effect of formation anisotropy on well deviation trend angle

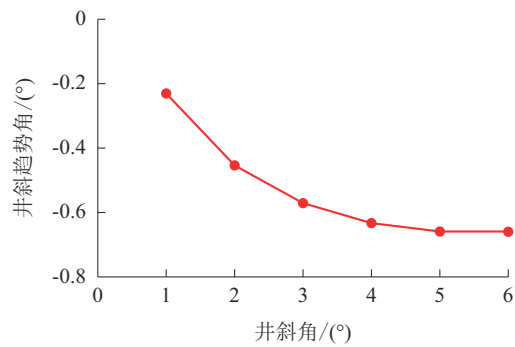


图6 井斜角对井斜趋势角的影响

Fig.6 Effect of well deviation angle on well deviation trend angle

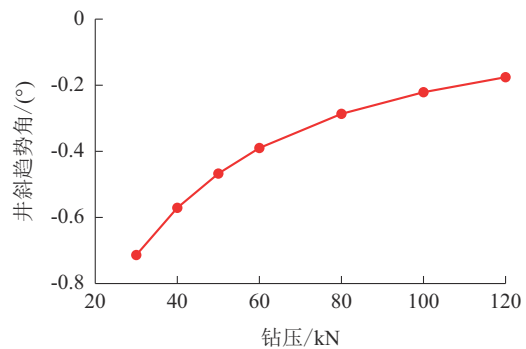


图7 钻压对井斜趋势角的影响

Fig.7 Effect of drilling pressure on well inclination trend angle

表钻头侧向切削能力越强。图8为钻头各向异性对井斜趋势角的影响,随钻头各向异性指数逐渐增大,上述钻具组合复合钻进纠斜能力逐渐增强,说明选择侧向切削能力强的钻头更有助于复合钻进防斜打直。

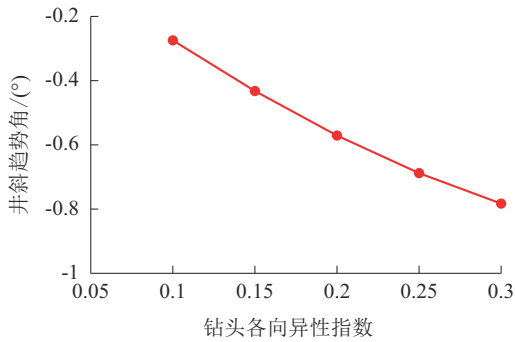


图8 钻头各向异性对井斜趋势角的影响

Fig.8 Effect of bit anisotropy on well deviation trend angle

图9为螺杆稳定器外径对井斜趋势角的影响,从图中可以看出,随着螺杆钻具自身稳定器外径减小,复合钻进的井斜趋势角变化不大,这是因为螺杆稳定器距钻头较近,其对井壁的支撑作用有限,在井下情况复杂时,综合考虑防卡和防斜要求,可相对缩小螺杆稳定器外径。

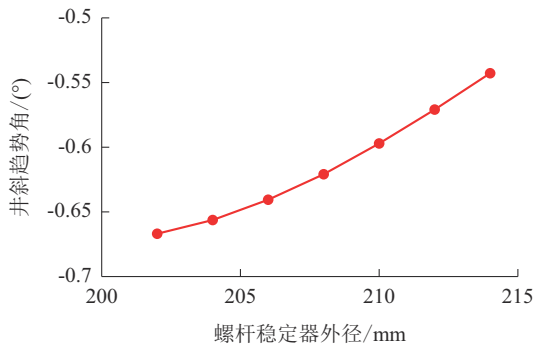


图9 螺杆稳定器外径对井斜趋势角的影响

Fig.9 Effect of outer diameter of screw stabilizer on well deviation trend angle

从图10可以看出,随钻柱稳定器外径逐渐变小,单弯双稳钻具组合复合钻进时防斜打直能力逐渐减弱,当上稳定器直径小于213 mm时复合钻进钻具组合失去纠斜能力。

从图11可以看出,当上扶正器离钻头太近时复合钻进无纠斜能力,随着钻柱稳定器位置继续变

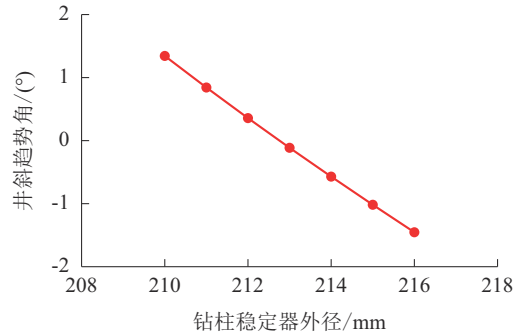


图10 钻柱稳定器外径对井斜趋势角的影响

Fig.10 Effect of outer diameter of drill string stabilizer on well inclination trend angle

远,复合钻进的纠斜能力逐渐变差,当稳定器位置超过14 m时复合钻进无纠斜能力。通过调节短钻铤长度调节上扶正器位置。钻头加上螺杆长度通常为8.35 m,扶正器中点到其断面长度按照1.65 m计算,扶正器中点到钻头最短距离为10 m。因此,在螺杆上方直接安装接扶正器防斜纠斜效果较好。

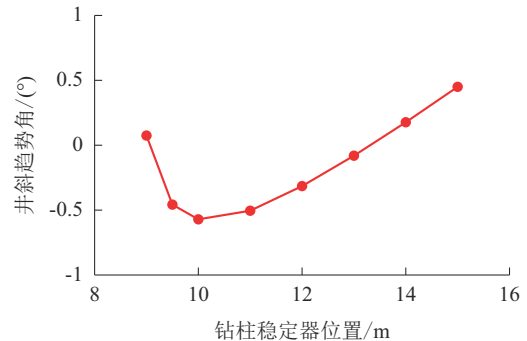


图11 钻柱稳定器位置对井斜趋势角的影响

Fig.11 Effect of drill string stabilizer position on well inclination trend angle

螺杆钻具弯角对井斜趋势角的影响规律见图12。可以看出,在当前条件下,井斜趋势角随弯角度数变化始终为负值,说明上述弯螺杆钻具在复合时一直处在降斜状态,能够实现防斜打直;而且,增大弯角度数井斜趋势角减小,并不利于防斜打直。

4 正交试验优化设计

正交试验设计是一种研究多因素多水平的试验设计方法,最初由日本统计学家田口玄一(Taguchi Gen'ichi)提出,主要用于研究多个因素多个水平

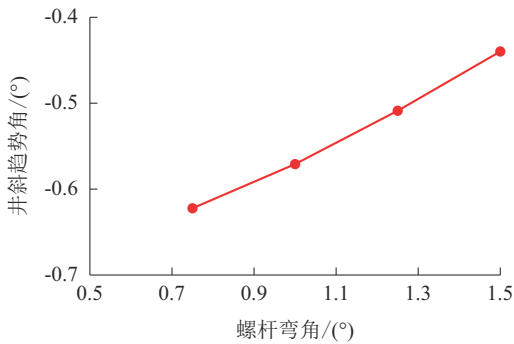


图 12 螺杆弯角对井斜趋势角的影响

Fig.12 Effect of screw bending angle on well inclination trend angle

对实验结果的影响,依据正交性选出有代表性的组合,这些组合分布均匀,相互之间可比^[18-19]。

对单弯双稳螺杆钻具组合的研究发现,螺杆钻具稳定器外径对复合钻进的纠斜能力影响十分微弱,同时地层倾角、地层各向异性指数和初始井斜角等因素又无法通过人为调控,因此,下面将采用正交试验方法分析其他 5 个因素对单弯双稳螺杆钻具组合的纠斜能力的影响规律,从而筛选主控因素,为现场钻具组合的选取和钻井参数的设定提供依据。这 5 个因素包括:钻柱稳定器位置、钻柱稳定器外径、螺杆钻具弯角、钻压和钻头各向异性指数,研究因素为五因素,每个因素为四水平,试验因素水平表如表 2 所示。

表 2 正交试验因素水平表

Table 2 Orthogonal Test Factor Level Table

因素	水平			
	一	二	三	四
A: 钻柱稳定器位置/m	8	10	12	14
B: 钻柱稳定器外径/m	210	212	214	216
C: 螺杆钻具弯角/°	0.75	1	1.25	1.5
D: 钻压/kN	20	40	60	80
E: 钻头各向异性指数	0.1	0.2	0.3	0.4

默认钻具组合: $\text{O}215.9 \text{ mm}$ 牙轮钻头 $\times 0.25 \text{ m} + \text{O}172 \text{ mm}$ 螺杆 (1° 弯角, $\text{O}212 \text{ mm}$ 扶正器) $\times 8.10 \text{ m} + \text{O}177.8 \text{ mm}$ 短钻铤 $\times 2 \text{ m} + \text{O}214 \text{ mm}$ 扶正器 $+ \text{O}177.8 \text{ mm}$ 钻铤 $\times 81.71 \text{ m} + \text{O}127 \text{ mm}$ 钻杆。默认计算参数: 井斜角 5.0° ; 钻井液密度 1.20 g/cm^3 , 地层各向异性指数 0.98, 地层倾角 5° 、与当前井眼方向相反, 螺杆扶正器外径 212 mm。

根据表 2 中的因素及水平,设计正交实验表。正交表决定实验次数和各组实验的组合,本次数值模拟实验共有五因素,均为四水平。在五个因素之间可能存在着交互作用,所以必须选用包含相互作用列的正交表。本着减少实验量的原则,本实验选用 L16(45) 正交表(表 3)进行实验,恰好能安排下五因素四水平,用该表共需做 16 组实验,模拟实验结果见表 3。

表 3 正交试验模拟结果

Table 3 Simulation Results of Orthogonal Experiments

序号	钻柱稳定器位置/m	钻柱稳定器外径/m	螺杆钻具弯角/°	钻压/kN	钻头各向异性指数	复合钻进趋势角/°
1	8	210	0.75	20	0.1	1.8536
2	8	212	1	40	0.2	0.768
3	8	214	1.25	60	0.3	-0.1125
4	8	216	1.5	80	0.4	-0.766
5	10	210	1	60	0.4	1.6885
6	10	212	0.75	80	0.3	0.4398
7	10	214	1.5	20	0.2	-0.2037
8	10	216	1.25	40	0.1	-0.4326
9	12	210	1.25	80	0.2	0.7218
10	12	212	1.5	60	0.1	0.275
11	12	214	0.75	40	0.4	-0.5566
12	12	216	1	20	0.3	-1.8629
13	14	210	1.5	40	0.3	1.5472
14	14	212	1.25	20	0.4	0.849
15	14	214	1	80	0.1	0.0769
16	14	216	0.75	60	0.2	-0.4899

从表 3 正交试验模拟结果可以看出,16 组钻具组合仅有 7 组在复合钻进时具有纠斜能力。

极差分析是用同一个因素中不同水平的平均值的极差 R ,来反映出各个因素水平变动时对于钻具组合纠斜能力的影响程度。当因素所处水平互为矛盾时,优先考虑显著因素,如果其极差大说明该影响因素水平变动时对所计算的结果影响大。反之,就是对计算结果影响程度小。因此,可以使用极差分析方法对单弯双稳钻具组合的各参数进行影响效果分析。单弯双稳钻具组合的各个因素在不同水平下复合钻进趋势角均值的极差计算结果见表 4。

根据表 4 各个因素不同水平下的极差结果分

表4 各因素极差分析表

因素	钻柱稳定器位置 A	钻柱稳定器外径 B	螺杆钻具弯角 C	钻压 D	钻头各向异性指数 E
均值1	0.436	1.453	0.312	0.159	0.443
均值2	0.373	0.583	0.168	0.332	0.199
均值3	-0.356	-0.199	0.256	0.340	0.003
均值4	0.496	-0.888	0.213	0.118	0.304
极差 R	0.852	2.341	0.144	0.222	0.440

析,复合钻进趋势角在4个水平下的钻柱稳定器位置 A、钻柱稳定器外径 B、螺杆钻具弯角 C、钻压 D、钻头各向异性指数 E 对应的极差分别为 0.852、2.341、0.144、0.222、0.440,因此,依据极差的定义可知,各因素对复合钻进趋势角的影响程度由大到小依次为: B(钻柱稳定器外径)→A(钻柱稳定器位置)→E(钻头各向异性指数)→D(钻压)→C(螺杆钻具弯角)。

其中钻柱稳定器外径和钻柱稳定器位置是影响单弯双稳螺杆钻具复合钻进纠斜能力的主要因素。某因子最佳均值对应的水平编号即为该因子的最佳水平,因此,最优组合为 A3B4C2D4E3,即钻柱稳定器位置为 12 m,钻柱稳定器外径为 216 mm,螺杆钻具弯角为 1°,钻压为 80 kN,钻头各向异性指数为 0.3。

5 现场应用及效果评价

结合分析上述各因素对单弯双稳螺杆钻具组合复合钻进防斜纠斜能力的影响,并通过正交试验方法筛选出主控因素,对某煤田大角度定向井稳斜段下部钻具组合及钻进参数进行了优化设计。设计结果为 $\varnothing 215.9$ mm 钻头 + $\varnothing 172$ mm × 1.25° 螺杆(带 $\varnothing 214$ mm 稳定器) + $\varnothing 214$ mm 稳定器 + $\varnothing 127.0$ mm 无磁承压钻杆 + $\varnothing 165.0$ mm MWD 短节 + $\varnothing 127.0$ mm 加重钻杆 15 根 + $\varnothing 127.0$ mm 普通钻杆。钻进参数:钻压为 40~80 kN、排量为 30~35 L/s、转速为螺杆 + 60 r/min。实钻井眼轨迹见表 5。

从表 5 可以看出,该井稳斜段采用优化后的单弯双稳螺杆钻具组合复合钻进稳斜效果很理想,复合钻进井斜稍微增大,符合设计要求,减少了滑动钻进,提高了井身质量,保证了下一步施工的顺利进行。

表5 测斜结果

井深/m	井斜角/(°)	方位角/(°)
1067.43	74.4	190.0
1139.89	75.0	190.3
1212.36	75.2	189.9
1284.83	75.4	190.0
1357.29	75.6	189.7
1400.00	76.0	189.9
1502.24	75.8	190.5
1545.00	76.2	190.7

6 结论

(1) 本文基于纵横弯曲梁模型和钻进趋势角模型建立了单弯双稳螺杆钻具组合的防斜纠斜能力评价模型,该模型定量地描述了各因素对该钻具组合防斜纠斜能力之间的相互关系。

(2) 通过模拟计算分析,单弯螺杆钻具弯角度数、钻柱稳定器位置和直径、钻压、钻头各向异性对复合钻进防斜打直效果影响显著,地层倾角、地层各向异性、井斜角对防斜打直效果影响较小。

(3) 通过正交试验分析,得出单弯螺杆钻具各结构因素对复合钻进防斜纠斜能力的影响程度,进一步分析得到各因素的最佳水平,即单弯双稳螺杆最优钻具组合。

(4) 通过力学模型计算以及正交试验分析,可以得到不同井眼条件下的单弯双稳螺杆钻具的最优参数,现场应用效果较好。

参考文献(References):

- [1] 伍贤柱,刘德平.川东高陡构造钻探技术[J].天然气工业,1999(3):64-67,8-9.
WU Xianzhu, LIU Deping. Drilling techniques for high and steep structures in eastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 1999(3):64-67,8-9.
- [2] 郑锋辉,韩来聚,杨利,等.国内外新兴钻井技术发展现状[J].石油钻探技术,2008,160(4):5-11.
ZHENG Fenghui, HAN Laiju, YANG Li, et al. Development status of emerging drilling technologies at home and abroad[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008,160(4):5-11.
- [3] 陈养龙,魏风勇,王宏杰,等.螺杆加PDC钻头复合钻进技术[J].断块油气田,2002(4):57-60,92.
CHEN Yanglong, WEI Fengyong, WANG Hongjie, et al. Combined drilling technology of screw and PDC bit[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2002(4):57-60,92.
- [4] 李焱,梁升平,居迎军,等.国外钻井工具与仪器新进展及国内

- 发展建议[J]. 钻探工程, 2022, 49(5): 145-155.
- LI Yao, LIANG Shengping, JU Yingjun, et al. New advances in drilling tools and instruments abroad and suggestions for domestic development [J]. Drilling Engineering, 2022, 49 (5) : 145-155.
- [5] 苏义脑. 求解井底钻具组合大变形的纵横弯曲法及其在导向钻具组合分析中的应用[J]. 石油钻采工艺, 1994(6): 1-6, 97.
- SU Yinao. Solution of BHA under large deformation by beam-column theory and its use in steerable bha analysis[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1994(6): 1-6, 97.
- [6] 苏义脑, 白家祉. 用纵横弯曲法对弯接头——井下动力钻具组合的三维分析[J]. 石油学报, 1991(3): 110-120.
- SU Yinao, BAI Jiazhi. Three-dimensional analysis of downhole dynamic drilling assembly with vertical and horizontal bending method[J]. Acta Petrolei Sinica, 1991(3): 110-120.
- [7] 白家祉, 黄惠泽, 刘玉石. 纵横弯曲法对钻具组合的三维分析[J]. 石油学报, 1989(2): 60-66.
- BAI Jiazhi, HUANG Huize, LIU Yushi. Three-dimensional analysis of drill assembly by vertical and horizontal bending method[J]. Acta Petrolei Sinica, 1989(2): 60-66.
- [8] 龚伟安. 压不弯钻铤装置的理论探索[J]. 石油学报, 1997(3): 117-120, 149.
- GONG Weian. Theoretical exploration of non-bending drill collar device[J]. Acta Petrolei Sinica, 1997(3): 117-120, 149.
- [9] 狄勤丰, 吴玉禄, 石向前. 预弯曲动力学防斜打快技术初探[J]. 石油学报, 2003(3): 86-89.
- DI Qinfeng, WU Yulu, SHI Qianqian. Preliminary study on anti-skew beating technology with prebending dynamics[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003(3): 86-89.
- [10] 管志川, 史玉才, 夏焱, 等. 底部钻具组合运动状态及钻进趋势评价方法研究[J]. 石油钻探技术, 2005(5): 27-30.
- GUAN Zhichuan, SHI Yucai, XIA Yan, et al. Research on evaluation method of motion state and drilling trend of BHA [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005(5): 27-30.
- [11] 史玉才, 管志川, 夏焱, 等. 以井斜趋势角为指标优化防斜钻具设计[J]. 石油钻探技术, 2004(5): 10-12.
- SHI Yucai, GUAN Zhichuan, XIA Yan, et al. Optimization of anti-deviation drilling tool design with inclination trend Angle as the index [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2004 (5) : 10-12.
- [12] 白家祉, 苏义脑. 井斜控制理论与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990.
- BAI Jiazhi, SU Yinao. Theory and Practice of Well Deviation Control[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990.
- [13] 史玉才, 管志川, 赵洪山, 等. 底部钻具组合造斜率预测新方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(1): 85-89.
- SHI Yucai, GUAN Zhichuan, ZHAO Hongshan, et al. A new method of BHA construction slope prediction [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(1): 85-89.
- [14] 高德利, 聂翠平, 刘希圣. 钻头各向异性钻井特性的理论分析和实验[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1991, 15(6): 28-31.
- GAO Deli, NIE Cuiping, LIU Xisheng. Theoretical analysis and experimental study of anisotropic drilling characteristics of drill bit[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1991, 15(6): 28-31.
- [15] 高德利. 钻头和地层各向异性钻井特性的一种表达方法[J]. 石油学报, 1994, 15(2): 126-132.
- GAO Deli. A diagrammatic method for drilling characteristics of formation anisotropy and drill bit [J]. Acta Petrolei Sinica, 1994, 15(2): 126-132.
- [16] 高德利. 井眼轨迹控制问题的力学分析方法[J]. 石油学报, 1996, 17(1): 115-121.
- GAO Deli. A mechanical model for prediction and control of the wellbore trajectory [J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(1) : 115-121.
- [17] 赵新瑞, 姜敬华, 奚艳红, 等. 井斜控制理论及防斜钻井技术综述[J]. 钻采工艺, 2000(1): 6-11.
- ZHAO Xinrui, JIANG Jinghua, XI Yanhong, et al. Review of well inclination control theory and anti-inclination drilling technology [J]. Drilling & Production Technology, 2000(1): 6-11.
- [18] 徐仲安, 王天保, 李常英, 等. 正交试验设计法简介[J]. 科技情报开发与经济, 2002(5): 148-150.
- XU Zhongan, WANG Tianbao, LI Changying, et al. Introduction of orthogonal experimental design method [J]. Science and Technology Information Development and Economy, 2002 (5): 148-150.
- [19] 曹小军. 复杂工况下顺煤层空气定向钻进应用研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(2): 150-154.
- CAO Xiaojun. Research on application of in-seam air directional drilling under complex working conditions [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2): 150-154.

(编辑 荐华)