

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2014.01.013

基于机械比能理论的复合钻井参数优选方法

崔 猛¹, 李佳军¹, 纪国栋¹, 陈永恒²

(1. 中国石油集团钻井工程技术研究院, 北京 100195; 2. 中国石油塔里木油田分公司塔北勘探开发项目经理部, 新疆库尔勒 841000)

摘要: 为了进一步提高深部地层钻井速度, 利用机械比能理论对复合钻井参数进行优化。从岩石力学和能量守恒角度出发, 分析了基于机械比能理论的钻井优化机理, 得出了钻进参数与机械钻速之间的相互关系。在 Teale 机械比能模型的基础上, 引入钻头滑动摩擦系数和钻头破岩效率系数, 将扭矩表示为钻压的函数, 解决了常规钻井中扭矩难以直接测量的问题, 建立了基于比能理论的复合钻井参数优化模型, 并开发了钻井优化系统。该系统在实钻过程中可以进行钻井参数的动态监测, 实时反馈钻井参数优劣, 提示井下复杂情况。现场试验应用后, 优化井段平均机械钻速提高 20%~30%, 钻头使用寿命延长。研究结果表明, 机械比能理论能够用于钻进参数优化, 达到深层提速和降低钻井成本的目的。

关键词: 机械比能 复合钻井 优选方法 钻进参数 优化系统

中图分类号: TE21 文献标识码: A 文章编号: 1001-0890(2014)01-0066-05

Optimize Method of Drilling Parameter of Compound Drilling Based on Mechanical Specific Energy Theory

Cui Meng¹, Li Jiajun¹, Ji Guodong¹, Chen Yongheng²

(1. CNPC Drilling Research Institute, Beijing, 100195, China; 2. Tabei Exploration and Development Management Department of Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang, 841000, China)

Abstract: With the drilling targets going increasingly deeper, a new drilling parameters optimization method based on mechanical specific energy (MSE) theory was investigated to continually improve the rate of penetration in deep formations. From the perspectives of rock mechanics and conservation of energy, the relationship between drilling parameters and ROP has been derived from comprehensive analysis of optimized drilling mechanism based on MSE. Based on the R. Teale MSE model, by introducing the sliding friction coefficient and rock-broken efficiency of the bit, the torque was expressed as the function of drilling weight to solve the difficulty of measuring torque directly in conventional drilling, the optimized models were built on the basis of specific energy theory for different drilling modes, and a real-time drilling optimization system was developed. The system can monitor all dynamic drilling parameters during drilling operation, and feed back the performance of drilling parameters and downhole situation in real time. A pilot test shows the average ROP increased by 20% to 30% compared with offset wells, and prolonged the service life of bit. The research results indicate that specific energy optimized drilling technique can optimize drilling parameters in real time, which can be used to drilling design, parameter optimization and analysis, so as to raise the ROP in deep formations and reduce drilling cost.

Key words: mechanical specific energy; compound drilling; optimization method; drilling parameter; optimization system

目前, 常用机械钻速与同区块邻井的机械钻速进行偏差分析来评价钻井效率, 虽然能体现出钻井的相对效率, 但无法在钻井设备和地质条件一定情况下, 给出钻井参数的优化方法, 且具有地域限制。近年来, 随着各类钻头在导向系统和旋转导向系统的应用, 以及钻井深度、难度的不断增大, 如何提高

收稿日期: 2013-05-02; 改回日期: 2014-01-09。

作者简介: 崔猛(1980—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 2006 年毕业于悉尼大学信息与软件工程专业, 2011 年获中国石油大学(北京)油气井工程专业博士, 工程师, 主要从事钻井信息处理、过程优化研究工作。

联系方式: cuimengdri@cncpc.com.cn。

基金项目: 中国石油天然气股份公司科学与技术开发项目“逆推覆带优快钻完井技术研究”(编号: 2012E-3308) 资助。

钻井效率变得日益重要。Teale 比能模型将破碎单位体积岩石所需能量与钻头的破岩效率关联起来, 将钻头输出的功整合成一个综合参数, 称为机械比能, 利用这一参数来描述钻头破岩效率, 从而实现钻井效率的量化评价。笔者在 Teale 比能模型的基础上, 建立了复合钻进条件下的破岩比能模型, 并开发了配套的实时优化软件, 现场应用表明, 机械比能理论能够用于钻井参数优化, 从而提高钻井速度, 并及时识别井下复杂情况。

1 机械比能概念及基础模型

钻头破碎岩石所需能量与岩石强度有关, 是通过钻头做功实现的。R. Teale^[1]提出了在钻进岩石过程中机械比能的概念, 即钻头在钻压和扭矩作用下破碎单位体积岩石做的功(所需要的机械能量)。这一概念将破碎单位体积岩石所需能量与钻头的破岩效率关联起来, 提供了一种评价钻井效率的方法, 比能越大, 说明钻头破岩效率越低, 钻头与地层适应性越差, 钻井参数有待优化。该机械比能模型为^[1]:

$$E = \frac{4W}{\pi d_B^2} + \frac{480nT}{d_B^2 v} \quad (1)$$

式中: E 为机械比能, MPa; W 为钻压, kN; T 为扭矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$; n 为转速, r/min ; v 为机械钻速, m/h ; d_B 为钻头直径, mm。

Teale 通过试验证实了理想条件下, 机械比能与岩石的抗压强度相等。然而, 在实际钻井过程中, 受井筒摩阻、井下振动等不利因素的影响, 能量利用率很低, 通常为 30%~40%。钻头破岩效率低, 导致实际比能是岩石强度的 3 倍左右, 因此为了满足现场实际需要, 使比能更接近岩石的真实强度, 将钻头有效能量利用率定义为 E_f , 则修正后的机械比能模型为^[2]:

$$E_m = E_f \left(\frac{4W}{\pi d_B^2} + \frac{480nT}{d_B^2 v} \right) \quad (2)$$

式中, E_m 为修正机械比能, MPa。

为了便于现场应用, E_f 通常取 0.35。

2 优化机理分析

钻进过程中, 钻压作用于钻头的切削齿使其切入岩石, 利用钻头旋转产生的横向运动粉碎岩石, 实现破岩。典型的机械比能和机械钻速的关系曲线如图 1 所示。段 1 表示钻压过低, 钻头切屑齿切入

地层的深度浅, 能量不足导致钻头破岩效率低, 机械钻速较低。进入段 2, 随着钻压的提高, 钻头切屑齿切入足够深, 钻头输出能量稳定, 比能和机械钻速呈正比线性关系, 破岩能量充分应用。随后进入段 3, 受井下各种因素的影响钻井过程中的不稳定点出现, 钻速不再同机械比能呈线性关系, 不稳定点处已经接近当前钻井系统可能获得的最高钻速。

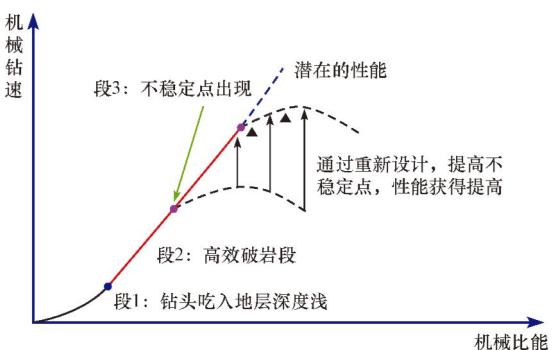


Fig. 1 Relationship of mechanical specific energy and penetration rate

段 3 中导致不稳定点出现的因素主要包括钻头泥包、井底泥包及钻具振动。钻头泥包和井底泥包阻碍了机械能量的有效传输, 尽管消耗的破碎比能很大, 但破岩效率降低, 机械钻速低。钻进过程中若出现不稳定点, 在设备允许的情况下, 为进一步提高钻速, 需要重新设计和优化钻井参数, 提高不稳定点位置。钻井过程中无法彻底消除不稳定点的出现, 只能尽可能延迟稳定点的出现。

3 复合钻进条件下的比能模型

3.1 机械比能修正模型

Teale 比能模型中, 扭矩是一个主要的变量。在实验室或者通过 MWD 可以很容易地获得。然而, 在实际钻进过程中, 地表记录的主要数据有钻压、转速和机械钻速等, 往往缺乏井下钻头上真实扭矩的测量值, 需要用测量数据来计算扭矩, 即利用钻头滑动摩擦系数和钻压计算钻头扭矩。

依据二重积分相关定理, 钻井过程中扭矩可以表示为^[3]:

$$T = \frac{1}{1000} \int_0^{d_B} \int_0^{2\pi} l^2 \frac{4\mu W}{\pi d_B^2} d\theta dl = \frac{\mu W d_B}{3000} \quad (3)$$

式中: l 为钻头半径微元长度, mm。

将式(3)带入式(2)可得:

$$E_m = E_f W \left(\frac{4}{\pi d_B^2} + \frac{0.16 \mu n}{d_B v} \right) \quad (4)$$

式中: μ 为钻头滑动摩擦系数, 一般牙轮钻头取 0.25, PDC 钻头取 0.50。

3.2 复合钻进条件下的机械比能模型

复合钻井是指在井下钻具组合中加入井下动力钻具, 将钻井液循环时的水力能量转换为钻头的机械能, 从而破岩钻进, 其转速可以通过钻井液流量的变化在一定范围内进行调整。在复合钻进过程中, 钻头的驱动由地面驱动(转盘或顶驱)和地下驱动(一般为螺杆钻具)组成, 其中地下驱动作为钻头的主要动力。

螺杆钻具(动力钻具)的主要性能参数是扭矩和转速, 螺杆的理论转速只与流经钻具的流量和钻具每转排量有关, 而与工况(钻压、扭矩等)无关, 即^[4]:

$$R_L = \frac{60Q}{q} = K_N Q \quad (5)$$

式中: R_L 是螺杆钻具输出的理论自转转速, r/min ; Q 为总流量, L/s ; q 为钻具每转排量, 是一个结构参数, 仅与定子和转子的线型和几何尺寸有关, L/r ; K_N 为动力钻具的转速流量比, r/L 。

如果地面转速为 R_s , 则钻头的理论总转速为:

$$R_T = R_s + R_L = R_s + K_N Q \quad (6)$$

假定螺杆的理论扭矩为 T_L 。在不计能量损失时, 根据容积式马达工作过程中的能量守恒, 在单位时间内钻头输出的机械能量 $T_L \omega_T$ 应该等于螺杆钻具输入的水力能量 $\Delta p_P Q_P$, 进行单位换算后, 则有:

$$T_L \omega_T = \Delta p_P Q_P \quad (7)$$

其中 $\omega_T = \frac{\pi R_T}{30}$ (8)

式中: ω_T 为钻头理论角速度, rad/s ; Δp_P 为钻具进出口的压力降, MPa 。

由式(5)—(8)可得:

$$T_L = \frac{1}{2\pi} q \Delta p_P \quad (9)$$

式中: T_L 为螺杆钻具的理论扭矩, $kN \cdot m$ 。

因此, 钻头理论总扭矩可表示为:

$$T_T = \frac{1}{2\pi} q \Delta p_P + T_s \quad (10)$$

式中: T_s 为地面测量扭矩, $kN \cdot m$ 。

如果已知螺杆钻具的最大额定扭矩 T_m (又称制动扭矩)以及最大额定压差 Δp_m , 根据螺杆钻具的

扭矩与压力降成正比, 则螺杆钻具的理论输出扭矩还可以表示为:

$$T_L = \frac{T_m}{\Delta p_m} \Delta p_P \quad (11)$$

将式(6)和式(9)分别代入机械比能原始模型(2)和修正模型(4), 可得:

$$E = E_f \left[\frac{4W}{\pi d_B^2} + \frac{240(R_s + 60Q)(q \Delta p_P + 2\pi T_s)}{\pi q d_B^2 v} \right] \quad (12)$$

$$E_m = E_f W \left[\frac{4}{\pi d_B^2} + \frac{0.16 \mu (q R_s + 60 Q)}{d_B v} \right] \quad (13)$$

将式(6)和式(11)分别代入机械比能原始模型(2)和修正模型(4), 可得:

$$E = E_f \left[\frac{4W}{\pi d_B^2} + \frac{480(R_s + K_N Q) \left[\frac{T_m}{\Delta p_m} \Delta p_P + T_s \right]}{d_B^2 v} \right] \quad (14)$$

$$E_m = E_f W \left[\frac{4}{\pi d_B^2} + \frac{0.16 \mu (q R_s + K_N Q)}{d_B v} \right] \quad (15)$$

3.3 比能基线的确定

比能基线是优化钻井过程中所能达到的最高破岩效率的对照线, 是观测比能曲线的基准线, 将其与实际钻井过程中的比能曲线进行对比, 就可以知道钻井参数优化的效果, 实际比能曲线与比能基线偏离越大, 说明破岩效率越低, 需对钻井参数进行调整。根据 Teale 的实验结果, 理想情况下的比能应该与岩石强度相等, 因而可利用围压下岩石强度作为参照, 对比分析实际比能, 确定破岩效率的高低。目前, 钻井工程主要利用现场测井资料, 并结合室内单轴抗压试验得到的经验公式, 来连续评价地层无围压条件的岩石强度分布情况, 该方法只适用于清水钻进的渗透性地层(无滤饼形成), 仅代表了钻井施工的一部分情况。当渗透性地层用钻井液钻进和地层为非渗透性岩石时, 必须选择合理的岩石强度模型。

目前, 被广泛采用和认可的岩石强度计算模型为^[5]:

$$S = S_u + p_e + \frac{2 p_e \sin \theta}{(1 - \sin \theta)} \quad (16)$$

式中: S_u 为无围压岩石强度, MPa ; p_e 为井底围压, MPa ; θ 为岩石内摩擦角, $(^\circ)$ 。

对于渗透性很高的地层, 通常取

$$p_e = p_E - p_p \quad (17)$$

式中: p_p 为原始孔隙压力, MPa ; p_E 为井底压力, MPa 。

对于低渗透率地层, 通常取

$$p_e = p_E - p_s \quad (18)$$

$$p_s = p_p - \frac{p_o - p_E}{3} \quad (19)$$

式中: p_o 为上覆岩层压力, MPa; p_s 为 Skepton 孔隙压力, MPa。

3.4 优化准则

在保证井眼净化效果的基础上,首先优化水力参数,再考虑水力能量在破岩方面的辅助作用。计算发现,钻头压降为 0.1~0.4 MPa 时,在所有破岩

能量中,水力能量可以忽略不计,即在目前的排量条件下,水力能量基本不参与直接破岩,因而排量只需要满足携岩要求即可。实时优化钻井参数的原则是,在合理范围内,先调钻压后调转速,如图 2 所示。基本思路是采用钻压先降后升+转速先降后升的方法。只要钻井参数改变后得到的比能接近或等于比能基线,就说明优化后的钻井参数满足需要,否则钻井参数就恢复原值。钻压和转速的变化范围原则上不能超过 10%。

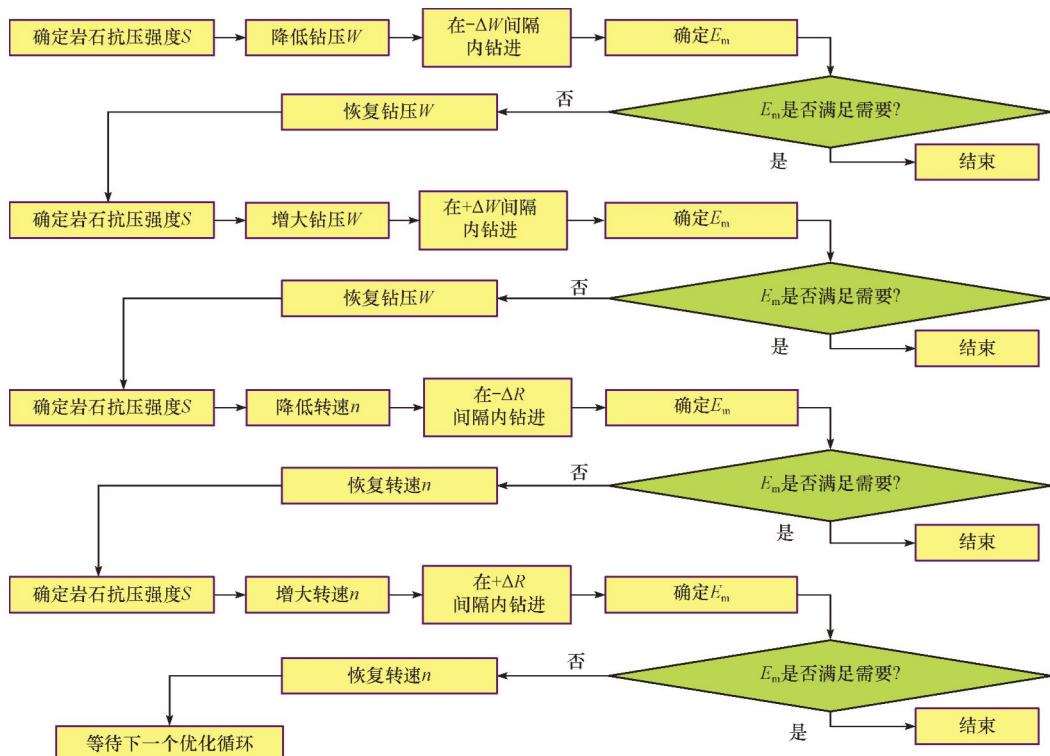


图 2 比能优化钻井流程

Fig. 2 Flow chart of optimized drilling with specific energy theory

4 应用实例

大港油田庄海 12-24 井 1 900.00~2 800.00 m 井段为东营组和沙河街组地层, 岩性以棕红色泥岩及浅灰色细砂岩为主, 地层研磨性强, 岩石可钻性差。该井采用螺杆+PDC 钻头复合钻进, 采用上述优化方法对复合钻进参数进行优化, 优化后的平均机械钻速 8.25 m/h, 与邻井相比, 平均机械钻速提高 23.11%。图 3 为庄海 12-24 井实时优化分析结果。

1) 在 1 900.00~2 275.00 m 井段, 岩石抗压强度略有增大, 但比能相对较低, 破岩效果良好。由于存在硬夹层, 该井段比能优化曲线偶尔有高

值, 钻穿硬夹层后, 比能显著降低, 说明该井段钻井参数匹配合理。

2) 钻至井深 2 275.00 m 之后, 随着岩石强度继续增大, 继续保持高钻压, 但排量从 35 L/s 降至 30 L/s, 在 2 275.00~2 460.00 m 井段比能呈波动性增大, 该井段地层为砂泥岩互层, 但以泥岩为主, 推测该井段井底可能发生泥包, 钻至井深 2 460.00 m 之后将排量提高至 35 L/s, 比能呈递减趋势, 破岩效率提高, 表明泥包消除。

3) 从井深 2 500.00 m 开始, 岩石强度较低, 井深 2 600.00 m 以后开始岩石强度略有增大。2 500.00~2 700.00 m 井段的岩石强度较低, 钻压仍然保持 100 kN 以上, 转速 120 r/min, 比能曲线呈现剧烈波动的态势, 过高的钻压导致钻头磨

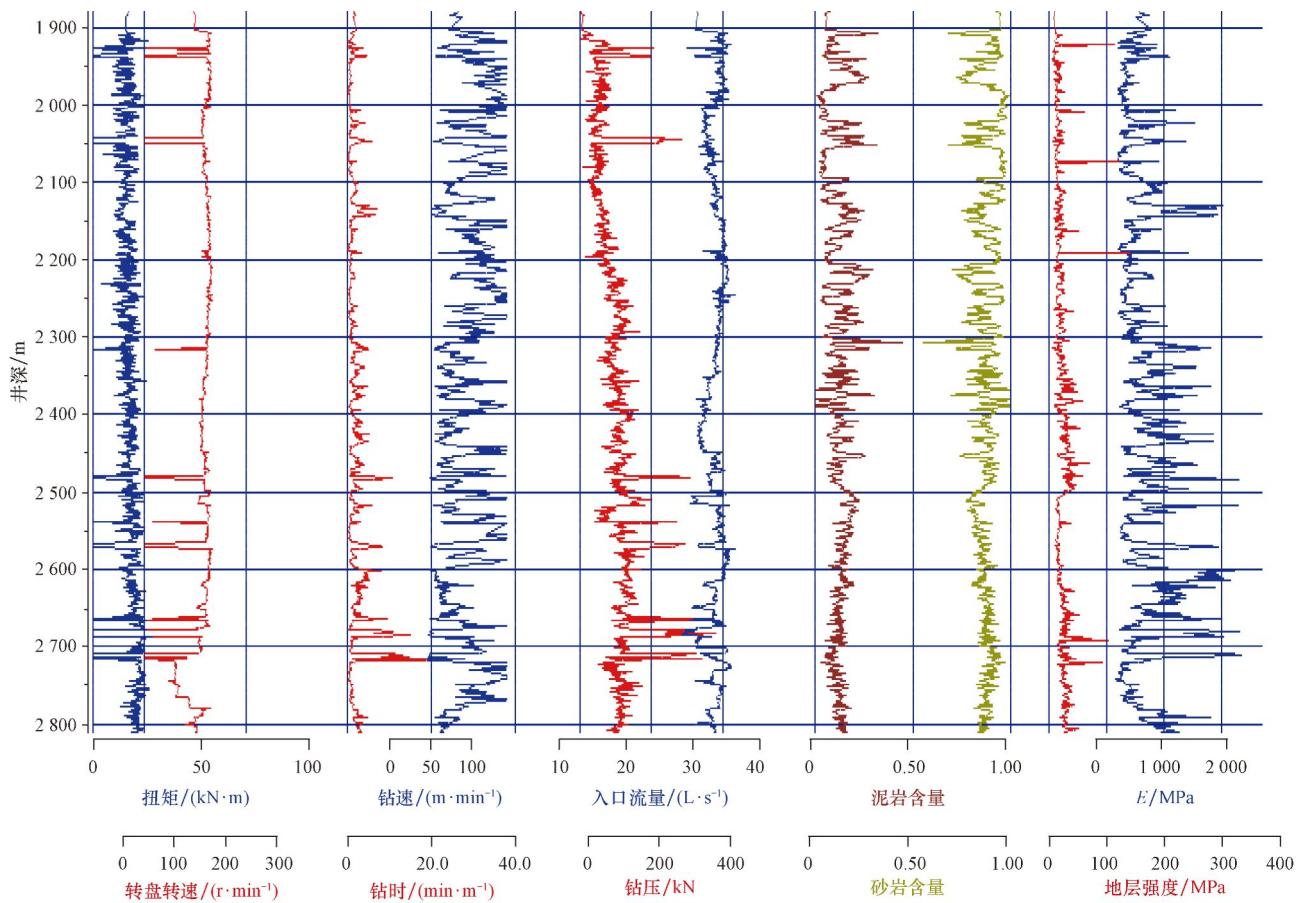


图 3 庄海 12-24 比能实时优化钻井分析

Fig. 3 Analysis result of optimizing drilling with specific energy theory for Well Zhuanghai 12-24 in realtime

损严重,现场起钻后,钻头新度 65%。

4) 钻至井深 2 700.00 m,随着岩石强度增大,钻压保持在 100 kN 左右,但顶驱转速降至 60 r/min,比能显著降低,机械钻速明显提高。说明在中硬以较硬地层中,PDC 钻头对高钻压的响应效果比高转速要好,高转速一般对钻速的影响不大,应该适当增大钻压而恒定中等转速。

5 结 论

1) 建立了复合钻进条件下的比能模型,能够更加精确地评价复合钻进过程中的钻头破岩效率。

2) 现场试验结果证实了比能理论用于钻井提速的可行性,并能实时有效地识别钻进过程中影响钻头破岩效率的主要因素,为深层提速和降低钻井成本探寻了一条有益途径,可以在钻井设计、优化与分析的各个环节中推广应用。

3) 为进一步提高机械比能法实时优化钻井参数的现场应用效果,需建立地面综合录井数据与井下随钻信息的融合和评价方法,更加真实地反应井

下真实工况。

参 考 文 献

References

- [1] Teale R. The concept of specific energy in rock drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1965, 2(1): 57-73.
- [2] Fred E Dupriest, William L Koederitz. Maximizing drill rates with real-time surveillance of mechanical specific energy[R]. SPE 92194, 2005.
- [3] 孟英峰, 杨谋, 李皋, 等. 基于机械比能理论的钻井效率随钻评价及优化新方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2012, 36(2): 110-114, 119. Meng Yingfeng, Yang Mou, Li Gao, et al. New method of evaluation and optimization of drilling efficiency while drilling based on mechanical specific energy theory[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2012, 36(2): 110-114, 119.
- [4] 苏义脑. 螺杆钻具的工作特性[J]. 石油钻采工艺, 1998, 20(6): 11-15, 67. Su Yinao. Performance screw drill tools[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1998, 20(6): 11-15, 67.
- [5] Caicedo H U, Calhoun W M, Ewy R T. Unique ROP predictor using bit-specific coefficient sliding friction and mechanical efficiency as a function of confined compressive strength impacts drilling performance[R]. SPE 92576, 2005.

[编辑 滕春鸣]