

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2023008

引用格式: 白彬珍, 曾义金, 芦鑫, 等. 钻头破岩能量与岩石自适应匹配提速技术 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(3): 30-36.

BAI Binzhen, ZENG Yijin, LU Xin, et al. An ROP improvement technology based on adaptive matching between the rock-breaking energy of bits and rock features [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(3): 30-36.

钻头破岩能量与岩石自适应匹配提速技术

白彬珍^{1,2,3}, 曾义金^{1,2,3}, 芦鑫^{2,3}, 张进双^{2,3}, 陶亮⁴

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249; 2. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 102206; 3. 中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206; 4. 西北工业大学航空学院, 陕西西安 710119)

摘 要: 针对深层、超深层和复杂地层等对钻井提速的要求, 考虑深层岩体可钻性变化, 提出了基于钻头破岩能量与岩石特征自适应匹配的钻井提速技术。在分析钻头破岩过程中扭矩特征的基础上, 研制了自适应匹配工具, 利用行星齿轮和扭簧结构进行能量存储与释放, 钻进岩性均质地层过程中提前蓄能, 钻遇砾石层或非均质地层时释放能量进行辅助破岩。通过静力学和动力学性能测试, 验证了自适应匹配工具结构的可靠性和实现提速的可行性。自适应匹配工具在深层页岩气井进行了现场试验, 结果表明: 与使用常规方法的邻井相比, 机械钻速提高了 83%, 验证了该工具提速的有效性和稳定钻头工作状态的效果。钻头破岩能量与岩石自适应匹配提速技术, 为深层、超深层和复杂地层钻井提速提供了理论支撑和新的技术途径。

关键词: 提速工具; 自适应匹配; 深层; 性能测试; 现场试验

中图分类号: TE21

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2023)03-0030-07

An ROP Improvement Technology Based on Adaptive Matching Between the Rock-Breaking Energy of Bits and Rock Features

BAI Binzhen^{1,2,3}, ZENG Yijin^{1,2,3}, LU Xin^{2,3}, ZHANG Jinshuang^{2,3}, TAO Liang⁴

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 2. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing, 102206, China; 3. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering Co., Ltd., Beijing, 102206, China; 4. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi, 710119, China)

Abstract: In view of the demand for the rate of penetration (ROP) improvement in deep, ultra-deep, and complex formations, a ROP improvement technology based on adaptive matching between rock-breaking energy of bits and the rock features was proposed considering the change in the drillability of deep rock. Based on the analysis of torque characteristics of bit during rock breaking, an adaptive matching tool was developed. The energy could be stored and released by the planetary gear and torsion spring in the tool, and could be stored in advance during drilling in lithologically homogeneous formations. In addition, energy could be released during drilling in gravel layers or heterogeneous formations to help rock breaking. The statics and dynamics performance tests verified the structural reliability of the tool and the feasibility of realizing the ROP improvement mechanism. Field test results in a deep shale gas well show that the ROP by the proposed technology is increased by 83% compared with that by conventional methods used in adjacent wells. The effectiveness of the tool in improving ROP and stabilizing bit performance is verified. As a result, the successful development of the tool and ROP improvement technology based on adaptive matching between rock-breaking energy of bits and rock features provides effective theoretical support and alternative technical approaches for improving ROP in deep, ultra-deep, and complex formations.

Key words: tool for ROP improvement; adaptive matching; deep formation; performance test; field test

收稿日期: 2022-03-16; 改回日期: 2023-03-30。

作者简介: 白彬珍 (1981—), 男, 山东沂水人, 2004 年毕业于石油大学 (华东) 石油工程专业, 油气井工程专业在读博士研究生, 高级工程师, 主要从事深井、超深井、定向井、水平井钻井技术研究及相关管理工作。E-mail: baibz.sripe@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技攻关项目“钻井破岩能量与岩石自适应匹配工具研究”(编号: P18006-5) 部分研究内容。

我国深层、超深层和复杂地层的油气勘探展现出巨大的开发潜力,但机械钻速低制约了勘探开发进程。现场实践表明:西北哈山地区火成岩地层单只钻头进尺不足 20 m,机械钻速约为 0.20 m/h;顺北古生界侵入体地层岩石硬度大、易破碎,平均机械钻速仅为 0.85 m/h^[1-4]。深层、超深层钻井机械钻速低的原因复杂多样,其中钻柱振动,尤其粘滑振动是导致钻头破岩效率低、机械钻速低的重要原因之一,钻头破岩能量与工况特征不匹配是导致粘滑振动的关键。目前,主要采用以下 3 种方式抑制粘滑振动,实现钻井提速^[5-8]:第一种是井下破岩能量与钻头振动自动匹配,如软扭矩钻井系统、井下变阻尼振动器等;第二种是强化破岩能量,如扭力冲击器、旋转冲击器等;第三种是稳定钻头状态的方式,如随钻恒扭器、恒压恒扭工具等。从提速机理、设计理念、能量驱动来源和控制方式等方面分析认为,第一种方式可实现破岩能量与工况特征自适应匹配,所需外部能量最小,效果最佳,但响应时间长,在深井、超深井中可靠性差;其余 2 种方式需研制利用水力能量驱动的井下工具来实现,深部复杂地层多存在井壁失稳、井漏等问题,提速工具易堵塞。另外,深层、超深层钻井循环压耗大,井底水力能量有限,影响提速效果^[9-14]。

为此,笔者提出了钻头破岩能量与岩石特征相匹配提速的技术思路,并研制了自适应匹配提速工具。该工具采用纯机械结构,无测控元件,根据岩石特征自适应匹配钻头破岩能量,不占用井下水力能量,不影响钻井液正常循环。自适应匹配提速工具性能测试和现场试验结果表明,钻头破岩能量与岩石特征相匹配的提速方法为深层、超深层和复杂地层钻井提速提供了新的技术途径。

1 钻头破岩过程的扭矩特征分析

1.1 井底钻头扭矩预测模型

将钻杆视为有一定刚度的扭簧,钻井液对钻杆的转动有阻尼作用;钻头和钻铤可看成一个质量集中的转动盘,钻头转动时,破岩过程中产生阻力扭矩。钻头处扭矩与轴向力的变化规律是分析钻头破岩输出能量的关键问题,将钻柱系统当作一个扭摆模型^[15-19],考虑钻头位置处钻井液至环空不稳定流动黏性阻尼和井底钻头与岩石间静态加库仑阻尼等因素对钻头处扭矩与轴向力的影响,建立了钻头轴向和扭转动力学的耦合瞬态响应二阶集总多单元模

型。假设井筒是垂直的,底部钻具组合分为若干节点,各节点间由无质量弹簧连接。

根据钻柱受力平衡条件,轴向动力学方程可以表示为:

$$M \frac{d^2 u}{dt^2} - D \frac{du}{dt} + K u - G = t_1 F(t) - t_2 f_{bit}(t) \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad F(t) = k_1 U(t) \quad (2)$$

$$f_{bit} = W_c + W_f \quad (3)$$

$$M = \text{diag}(m_1, \dots, m_n) \quad (4)$$

$$D = \text{diag}(d_1, \dots, d_n) \quad (5)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & -k_{n-1} & k_{n-1} + k_n & -k_n \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & -k_n & k_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$G = \begin{bmatrix} g m_1 F_{b,1} \\ \vdots \\ g m_n F_{b,n} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$t_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0_{n-1,1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$t_2 = \begin{bmatrix} 0_{n-1,1} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$m_i = \rho_s A_i h \quad (10)$$

$$k_i = \frac{E A_i}{h} \quad (11)$$

式中: u 为钻柱位移, m; $F(t)$ 为钻柱初始受力, kN; $f_{bit}(t)$ 为钻头受力, N; k_1 为钻柱顶部单元的刚度, MPa·m; U 为钻柱顶部单元长度, m; W_c 为岩屑作用在钻头上的力, N; W_f 为钻头磨损平面与底部接触产生的摩阻, N; m_i 为钻柱单元质量, kg; d_i 为环空摩阻系数; k_i 为钻柱单元截面的刚度, MPa·m; g 为重力加速度, m/s²; L 为钻柱长度, m; $F_{b,n}$ 为每单元格的浮力系数; n 为单元格的数目; u_i 为第 i 个单元格的上端面位置; ρ_s 为材料密度, kg/m³; A_i 为单元体横截面积, m²; h 为钻柱单元高度, m; E 为弹性模量, MPa。

考虑管道的表面摩擦,并假设管道周围的层流剖面为牛顿环形 Couette-Poiseuille 流,轴向环空摩阻系数可表示为^[17]:

$$d_i = 2\pi h \mu \left(\frac{1 + \alpha_i^2}{1 - \alpha_i^2} \ln \alpha_i^{-1} - 1 \right)^{-1} \quad (12)$$

$$\text{其中} \quad \alpha_i = \frac{r_{o,i}}{r_{bh}} \quad (13)$$

式中: μ 为钻井液黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; α_i 为环空外径与内径之比; $r_{o,i}$ 为井眼半径, m ; r_{bh} 为钻杆外径, m 。

根据钻柱扭矩平衡条件, 扭转动力学方程可表示为:

$$J \frac{d^2\phi}{dt^2} + C \frac{d\phi}{dt} + \zeta\phi(t) - g = t_1 T(t) - t_2 T_{bit}(t) \quad (14)$$

$$\text{其中} \quad T(t) = \kappa_1 \phi(t) \quad (15)$$

$$T_{bit} = T_c + T_f \quad (16)$$

$$J = \text{diag}(J_1, \dots, J_n) \quad (17)$$

$$C = \text{diag}(c_1, \dots, c_n) \quad (18)$$

$$\zeta = \begin{bmatrix} \zeta_1 + \zeta_2 & -\zeta_2 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ -\zeta_2 & \zeta_2 + \zeta_3 & -\zeta_3 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & -\zeta_{n-1} & \zeta_{n-1} + \zeta_n & -\zeta_n \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & -\zeta_n & \zeta_n \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$c_i = 2\pi r_{bh} h \mu \left(\frac{\alpha_i^4 + \alpha_i^2}{1 - \alpha_i^2} \right) \quad (20)$$

式中: $T(t)$ 为钻柱初始扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$; $T_{bit}(t)$ 为钻头扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$; κ_1 为钻柱顶部单元的扭转刚度, $\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$; ϕ 为钻柱顶部单元扭转角度, rad ; T_c 为钻头切削扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$; T_f 为钻头处摩擦扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$; J_i 为钻柱单元的转动惯量, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$; c_i 为钻柱单元扭转阻尼系数; ζ_i 为钻柱单元的扭转刚度, $\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 。

位于钻柱底部的钻头通过钻压以及转盘或顶驱提供的扭矩, 确保有效切削地层岩石。因井底扭转摩阻的存在, 钻头切削刀片每旋转一个周期, 钻头轴向位移滞后时间为 $t_n(t)$, 根据钻头当前和过去的轴向位移可得:

$$d(t) = u_n(t) - u_n(t - t_n(t)) \quad (21)$$

式中, d 为钻头轴向滞后位移, m 。

钻头与地层岩石的相关作用包括了钻头上的切削力 W_c 和扭矩 T_c , 以及摩擦阻力 W_f 和摩擦扭矩 T_f , 分别表示为:

$$W_c = n_b r_b \varepsilon d(t) \sin \partial \quad (22)$$

$$W_f = n_b r_b l_w \sigma h_f \frac{du_n}{dt} \cos \partial \quad (23)$$

$$T_c = \frac{1}{2} n_b r_b^2 \varepsilon d(t) \sin \partial \quad (24)$$

$$T_f = \frac{1}{2} r_b \mu_f \gamma W_f \cos \partial \quad (25)$$

式中: n_b 为钻头刀翼切削齿数量; r_b 为钻头直径, m ; ∂ 为切削齿切割面与地层夹角, $(^\circ)$; ε 为切割一定体积岩石所需的机械比能, J ; l_w 为切削齿与岩石接触时的磨损平面长度, m ; σ 为磨损平面处的平均接触应力, N ; μ_f 为与 W_f 和 T_f 有关的摩擦系数, 代表磨平力是否有效。

1.2 不同钻进方式的钻头扭矩特征

由于破岩方式和不同层段岩石的特征不一致性, 在钻进过程中钻头载荷会发生变化。将钻头扭矩视为正弦波动^[20], 以其变化作为研究对象, 采用门限扭矩代替岩石破裂强度。利用上述钻头扭矩预测模型, 对常规钻进、复合钻进、冲击类钻进及钻头破岩能量与岩石自适应钻进进行评价分析, 为提速工具研制提供指导。模型参数: 井眼直径 215.9 mm, 井深 3 000 m, 钻头初始钻压 40 kN, 钻柱扭转刚度 700 $\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$, 钻柱刚度 120 $\text{MPa}\cdot\text{m}$, 钻柱转动惯量 130 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。

1.2.1 常规钻进

常规钻进中 PDC 钻头钻遇砾石夹杂和各向异性的地层, 其钻头扭矩表现得极不稳定。钻进过程中钻头扭矩增大, 并在上部钻柱积聚, 但破岩能量补存慢, 响应时间超过 1 s (见图 1), 此时易产生粘滑、跳钻等现象, 影响破岩效率。

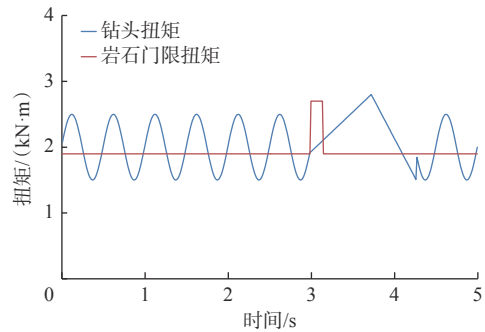


图 1 岩石破裂强度与常规钻进载荷特征

Fig.1 Rock fracture strength and load characteristics of conventional drilling

1.2.2 复合钻进

复合钻进钻遇夹层及非均质地层时, 钻头扭矩增大, 钻头遇阻力随之增大, 粘滑和跳钻现象较少, 钻头的运动相对稳定, 但钻头扭矩超出螺杆钻具输出扭矩时, 会出现钻头滞动及憋泵现象 (见图 2)。

1.2.3 冲击类钻进

钻头加装冲击类提速工具后, 冲击破岩能量充足, 切削运动稳定, 冲击频次较高, 达 10~20 Hz (见

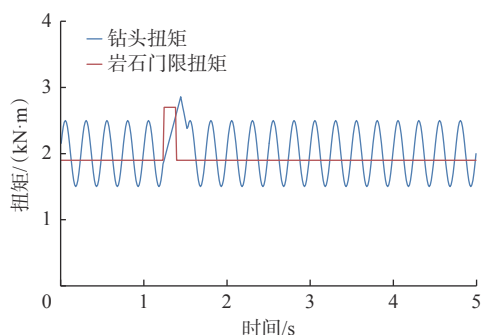


图 2 岩石破裂强度与螺杆钻具钻进载荷特征

Fig.2 Rock fracture strength and drilling load characteristics of screw motor

图 3)。但此类工具多依靠水力能量驱动,在水力能量不足的深层和易漏易塌的复杂地层使用时受限。

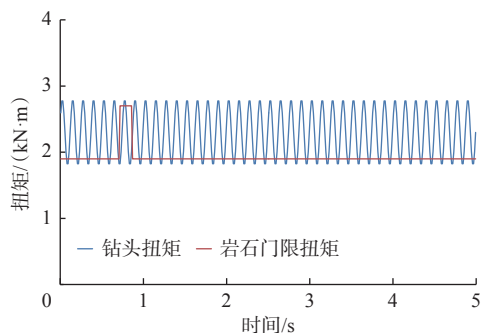


图 3 岩石破裂强度与扭力冲击钻进载荷特征

Fig.3 Rock fracture strength and drilling load characteristics of torsional impact

1.2.4 钻头破岩能量与岩石自适应钻进

由上述扭矩特征分析可知,最佳的模式应是破岩能量可与岩石及工况特征自适应匹配。钻头钻遇砾石层或难钻地层后,破岩能量随之增大,迅速破岩;钻穿砾石层后,破岩能量降低,恢复正常状态(见图 4)。

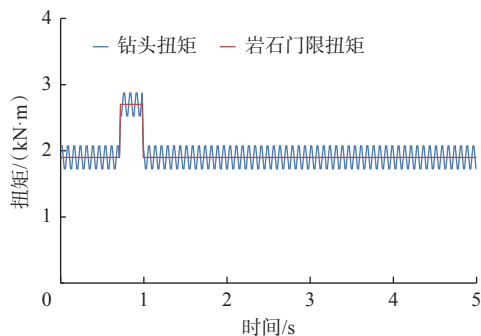


图 4 岩石破裂强度与诱导钻进载荷特征

Fig.4 Rock fracture strength and induced drilling load characteristics

2 自适应匹配工具设计

2.1 提速原理

根据上述 4 种破岩模式的分析结果,提出了井底自适应闭环控制设计思路。钻柱将破岩能量传输到系统内,系统内设置的蓄能机构提前蓄能,蓄能能量为当前破岩能量的 2~3 倍;当钻遇砾石等难钻岩石时,利用触发机构与钻头的速度差驱动蓄能机构迅速释放储存的能量,释放能量约为存储能量的 10%~20%,即破岩能量的 30%~60%,实现破岩能量与工况及岩石特征的自适应分配(见图 5);完成破岩后,系统内的能量再次重新分配,进行蓄能。

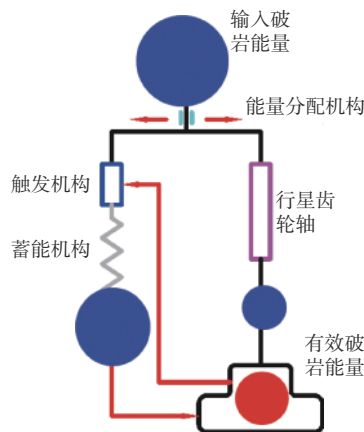


图 5 工作过程中能量分配原理

Fig.5 Principle of energy distribution in working process

2.2 工具结构与工作过程

基于上述设计思路,设计了自适应匹配工具。该工具主要包括惯性回旋体、行星齿轮系和弹性扭转体(见图 6)。行星齿轮系为能量分配机构;弹性扭转体为蓄能机构;惯性回旋体为触发机构,可触发蓄能机构释放能量。其中,惯性回旋体内部与行星齿轮系啮合,下部设计为凹槽结构,与弹性扭转体配合,实现速度差信号的惯性传递;齿轮系由太阳轮及行星轮共同构成,实现输入扭矩的放大;弹性扭转体为高刚度扭簧结构,上部为凹凸槽,与惯性回旋体配合,用于存储能量。

其中,行星齿轮系太阳轮的中空通道为钻井液流道;钻压则通过行星齿轮系内部轴承端面传递到钻头;扭矩由上部钻具通过行星齿轮系内的太阳轮传递到行星轮,行星轮传递到惯性回旋体,再由惯性回旋体传递到下部弹性扭转体,最后传递到钻头。钻头与惯性回旋体间存在速度差时,在惯性力

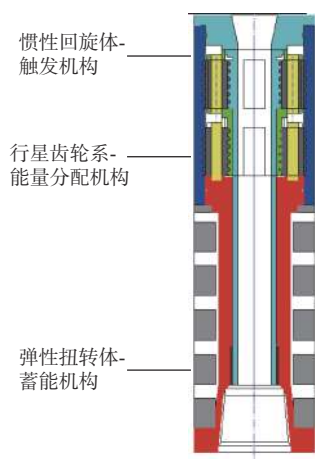


图6 钻井破岩能量与岩石自适应匹配工具结构

Fig.6 Structure of tool based on adaptive matching between rock breaking energy of bits and rock features

的作用下,惯性回旋体与弹性扭转体间产生相对转动,达到调控能量存储和释放的效果。

工具工作时,上部钻柱将扭矩传递给工具,弹性扭转体反向蓄能,将2~3倍破岩扭矩储存起来,可存储势能约1~3 kJ;钻遇均质岩性岩石时,工具为平稳钻进状态,一旦钻遇夹层,所需破岩能量增大,此时钻头转速降低,钻头与惯性回旋体间的速度差驱使弹性扭转体释放蓄能,实现难钻地层破岩;破岩结束后,钻头持续加速旋转,惯性回旋体与钻头间产生反向速度差,惯性回旋体牵制钻头,避免钻头破岩后加速旋转,保持钻头稳定。同时,上部钻柱输入的扭矩再次存储到弹性扭转体内。

该工具具有以下技术优势:1)采用动力学设计理念,实现钻头破岩能量与岩石特征自适应匹配,可有效抑制粘滑振动,实现钻头平稳钻进;2)钻压、扭矩分开传递,可以减轻钻头扭矩波动对上部钻柱的扰动;3)采用纯机械结构设计,无橡胶件、测控元件等易损器件,可靠性高;4)不依赖水力能量,不影响钻井液正常循环。

3 自适应匹配工具性能评价

静力学和动力学测试是测试提速工具性能的必要手段,为此分别在扭转机上开展了静力学测试,在全尺寸钻井装置上开展了动力学测试,以验证工具的可靠性、弹性特征、蓄能特性和提速有效性。

3.1 静力学测试

利用全自动360°扭转上扣机开展了自适应匹配工具的静力学测试,被测试工具外径为185.0 mm。强度测试结果表明,该工具可承受扭矩大于30 kN·m,

最大抗拉强度800 kN,可满足工程要求;弹性性能测试结果表明,该工具的扭转刚度为7~9 kN·m/rad,与设计值基本吻合;该工具最多可以储存11 kJ的弹性势能,满足设计要求。

3.2 动力学测试

为验证自适应匹配工具的有效性,利用全尺寸钻井装置和模拟地层开展了性能测试,分析了其工作时相关参数的变化情况。全尺寸钻井装置的钻机为小尺寸钻机。

常规钻井和加装自适应匹配工具后在相同转速(60 r/min)和相同钻压(30 kN)下钻进相同岩性地层时的钻头扭矩波动情况如图7、图8所示。取置信区间90%的数据进行分析,常规钻井钻头扭矩波动范围为1 430~1 960 N·m,加装自适应匹配工具后钻头扭矩波动范围为1 550~1 840 N·m;加装自适应匹配工具后钻头扭矩波动幅度为常规钻井的55%。试验结果表明,加装自适应匹配工具后可降低钻头扭矩波动幅度,可稳定钻头工作状态。

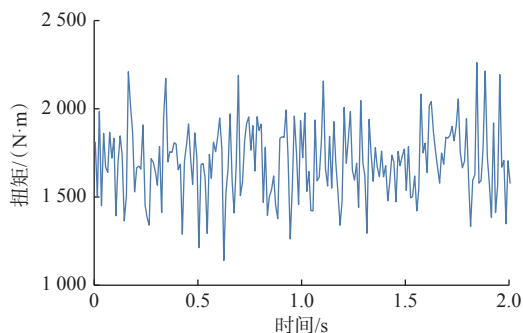


图7 常规钻井钻头扭矩随时间的变化

Fig.7 Variation of conventional drilling bit torque with time

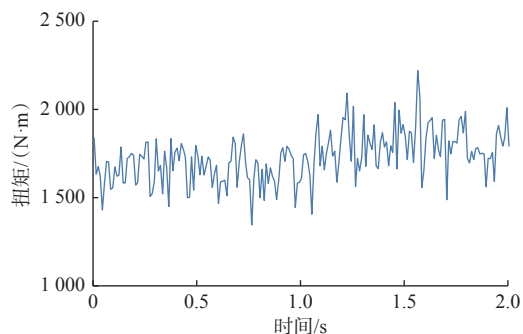


图8 加装自适应匹配工具后钻头扭矩随时间的变化

Fig.8 Variation of bit torque after tool addition with time

试验岩样为花岗岩,采用恒定钻速0.25 m/min进行钻进试验,试验转速为60 r/min,常规钻井和加

装自适应匹配工具钻井条件下钻压-扭矩分布如图 9、图 10 所示。由图 9 和图 10 可看出：常规钻井的钻头扭矩均值为 1 820 N·m，钻压为 41.3 kN；加装自适应匹配工具后钻头扭矩均值为 1 500 N·m，钻压为 35.2 kN。这说明加装自适应匹配工具可降低破岩所需能量。

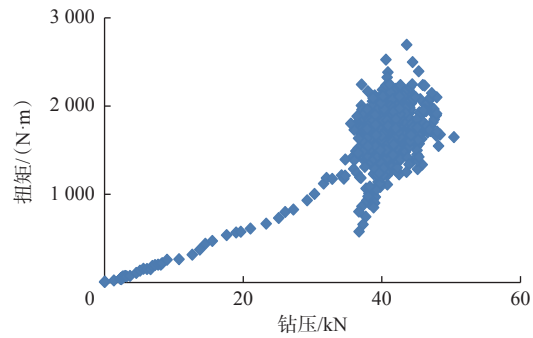


图 9 常规钻井钻压、扭矩分布散点图

Fig.9 Scatter diagram of weight on bit and torque distribution in conventional drilling

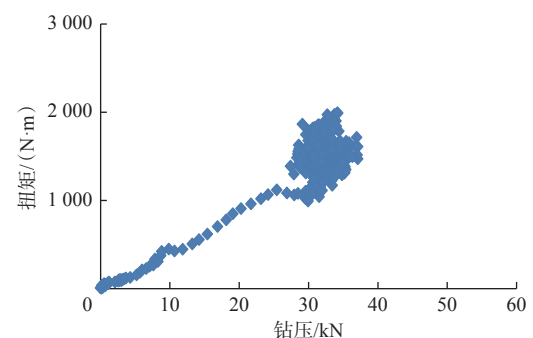


图 10 加装自适应匹配工具后钻压、扭矩分布散点图

Fig.10 Scatter diagram of weight on bit and torque distribution in drilling after tool addition

4 现场试验

JYX8HF 井位于川东高陡褶皱带万县复向斜白马向斜带白马向斜核部，试验井段 4 664.00~4 694.00 m，试验地层为涧草沟组、宝塔组；钻具组合为：φ215.9 mm 钻头+自适应匹配工具+411×4A10+φ158.0 mm 钻铤×3 根+φ127.0 mm 加重钻杆×24 根+φ127.0 mm 钻杆+φ139.5 mm 钻杆；钻进参数：钻压 40~120 kN，排量 24~28 L/s，泵压 12~14 MPa，转速 70~85 r/min，扭矩 17~24 kN·m；水基钻井液密度 1.42 kg/L，黏度 55~60 mPa·s；钻头型号 KMD1652ADGR，为 φ16.0 mm 复合片、双排齿五刀翼钻头。

试验结果表明，自适应匹配工具的井口扭矩波动幅度 3~5 kN·m，邻井相同井段应用 PDC 钻头+螺杆钻具的扭矩波动幅度为 6~10 kN·m。现场试验表明，自适应匹配工具的提速效果对钻压较为敏感，4 662~4 688 m 井段钻压小于 80 kN，机械钻速 2.55 m/h；4 688.00~4 689.00 m 井段钻压 90 kN，机械钻速 3.33 m/h；4 689.00~4 694.00 m 井段钻压 100~120 kN，机械钻速 7.50 m/h。与邻井采用常规钻具相比，使用自适应匹配工具后，机械钻速提高 83% 以上（见表 1）。

表 1 JYX8HF 井与邻井机械钻速对比
Table 1 Comparison of ROP between Well JYX8HF and adjacent well

井号	井段/m	地层	机械钻速/(m·h ⁻¹)
JYX8HF	4 664.00~4 694.00	涧草沟组、宝塔组	2.77
焦页X6HF井	3 581.20~3 595.00	涧草沟组	1.17
	3 595.00~3 622.00	宝塔组	1.01
焦页X7HF井	3 982.30~4 021.00	涧草沟组	1.47
	4 021.00~4 048.00	宝塔组	1.51

5 结论与建议

1) 基于钻柱扭转振动模型，在分析现有提速工具提速机理的基础上，提出了能量自动存储与释放的钻井提速技术思路。基于该思路设计了钻头破岩能量与岩石自适应匹配工具，可实现钻头输出破岩能量与岩石及工况特征相匹配；该工具尤其适用于深层和复杂地层，不占用水力能量，不影响钻井液正常循环。

2) 通过静力学和动力学性能测试验证了钻头破岩能量与岩石自适应匹配工具结构的安全可靠性和实现提速的可行性。

3) 现场试验表明，钻头破岩能量与岩石自适应匹配工具能够提高机械钻速、稳定钻头工作状态，且其提速效果与钻压密切相关。

4) 建议进一步开展匹配钻头优选，选择强攻击性钻头，充分发挥钻头破岩能量与岩石自适应匹配工具稳定钻头工作状态的作用。

参 考 文 献
References

[1] 刘湘华, 刘彪, 杜欢, 等. 顺北油气田断裂带超深水平井优快钻井

- 技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(4): 11–17.
- LIU Xianghua, LIU Biao, DU Huan, et al. Optimal and fast drilling technologies for ultra-deep horizontal wells in the fault zones of the Shunbei Oil & Gas Field[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(4): 11–17.
- [2] 韩烈祥. 川渝地区超深井钻完井技术新进展[J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(5): 555–561.
- HAN Liexiang. New progress of drilling and completion technologies for ultra-deep wells in the Sichuan-Chongqing Area[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2019, 41(5): 555–561.
- [3] 张瑞端, 文涛, 蒲磊, 等. “垂直钻井工具+等壁厚螺杆”提速钻具组合先导性试验: 以库车山前高陡构造克深A井为例[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(6): 684–690.
- ZHANG Duanrui, WEN Tao, PU Lei, et al. Pilot test on the ROP-improvement BHA of vertical drilling tool & screw rod with equal wall thickness: A case study on Well Keshen A in the high-steep structure of Kuqa piedmont area[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2020, 42(6): 684–690.
- [4] 于洋, 南玉民, 李双贵, 等. 顺北油田古生界钻井提速技术[J]. 断块油气田, 2019, 26(6): 780–783.
- YU Yang, NAN Yumin, LI Shuanggui, et al. Technology for increasing drilling speed of Paleozoic stratum in Shunbei Oilfield[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2019, 26(6): 780–783.
- [5] DENNEY D. Mitigating torsional stick/slip vibrations in oilwell drilling through PDC-bit design: Putting theories to the test[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2015, 63(12): 79–80.
- [6] 毛良杰, 马茂原, 刘立鹏, 等. 扭力冲击器对钻柱黏滑振动的影响分析[J]. 断块油气田, 2022, 29(4): 545–551.
- MAO Liangjie, MA Maoyuan, LI Lipeng, et al. Influence of torsional impactor on stick-slip vibration of drillstring[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2022, 29(4): 545–551.
- [7] 汪伟, 柳贡慧, 李军, 等. 脉动式扭转冲击钻井工具工作特性分析与测试[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(5): 63–69.
- WANG Wei, LIU Gonghui, LI Jun, et al. Analysis and testing of the working characteristics of a pulsating torsional impact drilling tool[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(5): 63–69.
- [8] 陈会娟. 井下钻柱振动信号的测量及振动激励源研究[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(5): 57–63.
- CHEN Huijuan. Measurement of the downhole drill string vibration signal and analysis of the vibration excitation sources[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(5): 57–63.
- [9] 殷召海, 李国强, 王海, 等. 克拉苏构造带博孜1区块复杂超深井钻完井关键技术[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(1): 16–21.
- YIN Zhaohai, LI Guoqiang, WANG Hai, et al. Key technologies for drilling and completing ultra-deep wells in the Bozi 1 Block of Kelasu Structure[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(1): 16–21.
- [10] 于洋, 李双贵, 高德利, 等. 顺北5-5H超深 $\phi 120.65$ mm小井眼水平井钻井技术[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(3): 276–281.
- YU Yang, LI Shuanggui, GAO Deli, et al. Drilling techniques used in Well Shunbei 5-5H, an ultradeep slim-hole $\phi 120.65$ mm horizontal well[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2020, 42(3): 276–281.
- [11] 贾利春, 李枝林, 张继川, 等. 川南海相深层页岩气水平井钻井关键技术与实践[J]. 石油钻采工艺, 2022, 44(2): 145–152.
- JIA Lichun, LI Zhilin, ZHANG Jichuan, et al. Key technology and practice of horizontal drilling for marine deep shale gas in southern Sichuan Basin[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2022, 44(2): 145–152.
- [12] 张昕, 乔东宇, 王新, 等. 旋转冲击钻井提速装置的研制与应用[J]. 钻采工艺, 2022, 45(5): 106–111.
- ZHANG Xin, QIAO Dongyu, WANG Xin, et al. Development and application of a rotary percussion drilling apparatus for improving rate of penetration[J]. *Drilling & Production Technology*, 2022, 45(5): 106–111.
- [13] 李飞. PDC钻头切削深度对抑制黏滑振动和提高钻进速度的影响[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(5): 566–573.
- LI Fei. Effect of depth-of-cut control (DOC) of PDC bits on stick-slip suppression and rate of penetration improvement[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2021, 43(5): 566–573.
- [14] 穆总结, 李根生, 黄中伟, 等. 振动冲击钻井提速技术现状及发展趋势[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(3): 253–260.
- MU Zongjie, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Status and development trend of vibration-impact ROP improvement technologies[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2020, 42(3): 253–260.
- [15] GERMAY C, VAN DE WOUW N, NIJMEIJER H, et al. Nonlinear drillstring dynamics analysis[J]. *SIAM Journal on Applied Dynamical Systems*, 2009, 8(2): 527–553.
- [16] 李美求, 李嘉文, 李宁, 等. 周向冲击扭矩作用下PDC钻头的黏滑振动分析[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(3): 287–292.
- LI Meiqiu, LI Jiawen, LI Ning, et al. Analysis on the stick-slip vibration of PDC bit under the effect of circumferential torque impact[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2018, 40(3): 287–292.
- [17] WANG Ningyu, CHENG Zaibin, LU Yingjie, et al. A multibody dynamics model of contact between the drillstring and the wellbore and the rock penetration process[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, 7(5): 1–12.
- [18] 张奇志, 吴永强. 抑制钻柱黏滑振动和钻头反弹的建模与控制[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(5): 553–558.
- ZHANG Qizhi, WU Yongqiang. Modeling and control of restraining stick slip vibration of drill strings and bounce of drill bits[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2018, 40(5): 553–558.
- [19] CHENG Zaibin, JIANG Wei, REN Gexue, et al. A multibody dynamical model for full hole drillstring dynamics[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 378: 91–96.
- [20] 吴泽兵, 郭龙龙, 潘玉杰. 水平井钻井过程中井底钻压预测及应用[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(1): 9–13.
- WU Zebing, GUO Longlong, PAN Yujie. Bottom hole WOB prediction in the process of horizontal well drilling and its application[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2018, 40(1): 9–13.

[编辑 滕春鸣]