

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2021101

引用格式: 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 the pulsating torsional impact drilling tool [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(5): 63-69.

脉动式扭转冲击钻井工具工作特性分析与测试

汪 伟¹, 柳贡慧^{1,2}, 李 军^{1,3}, 查春青², 连 威¹, 夏铭莉⁴

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249; 2. 北京工业大学, 北京 100124; 3. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区, 新疆克拉玛依 834000; 4. 中国石油集团西部钻探工程有限公司吐哈钻井公司, 新疆鄯善 838200)

摘 要: 为抑制 PDC 钻头钻进硬地层时的粘滑振动, 设计了一种可以为 PDC 钻头提供周向冲击载荷的脉动式扭转冲击钻井工具, 并在介绍其结构设计和分析其工作原理的基础上, 建立了计算其周向扭矩、直井工况下冲击功的数学模型, 通过算例分析了其工作特性。分析结果表明: 脉动式扭转冲击钻井工具的周向扭矩随排量增大而增大, 随节流喷嘴直径增大而减小; 在直井中的冲击功随钻柱扭矩和扭转角度增加而增大, 随钻压增大而减小。脉动式扭转冲击钻井工具样机性能室内测试结果表明, 该钻井工具能实现高频扭转冲击, 且其工作频率、周向腔体压差和周向扭矩均随排量增大而增大。研究和测试结果表明, 脉动式扭转冲击钻井工具的结构设计合理, 能够为 PDC 钻头提供周期性扭转冲击载荷, 抑制 PDC 钻头的粘滑振动。

关键词: 脉动; 扭转冲击; 钻井工具; 粘滑振动; 结构设计; 工作特性; 性能参数

中图分类号: TE921⁺.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2022)05-0063-07

Analysis and Testing of the Working Characteristics of a Pulsating Torsional Impact Drilling Tool

WANG Wei¹, LIU Gonghui^{1,2}, LI Jun^{1,3}, ZHA Chunqing², LIAN Wei¹, XIA Mingli⁴

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing, 102249, China; 2. Beijing University of Technology, Beijing, 100124, China; 3. China University of Petroleum-Beijing at Karamay, Karamay, Xinjiang, 834000, China; 4. Tuha Drilling Company, CNPC Xibu Drilling Engineering Company Limited, Shanshan, Xinjiang, 838200, China)

Abstract: A pulsating torsional impact drilling tool was designed to provide a polycrystalline diamond compact (PDC) bit with a circumferential impact load to suppress the stick-slip vibration of the bit when it drills into hard formations. First, the structural design of the drilling tool was introduced, and its working principle was analyzed. Then, on this basis, mathematical models were established for calculating its impact energy in vertical wells and circumferential torque. Finally, the working characteristics of the drilling tool were analyzed. The analysis results showed that the circumferential torque of the pulsating torsional impact drilling tool increased with the increase in flow rate and decreased with the increase in the diameter of the throttle nozzle. Its impact energy in vertical wells became higher with the increase in the torque and rotation of the drill string; however it declined as the weight on bit (WOB) increased. The performance of the pulsating torsional impact drilling tool prototype was explored through laboratory tests. The test results were positive and indicated that the drilling tool could achieve high-frequency torsional impact, and its operating frequency, circumferential cavity pressure difference, and circumferential torque were all enhanced with the increase in flow rate. The research and test results demonstrate that the pulsating torsional impact drilling tool has an acceptable structural design, which can provide periodic torsional impact loads for PDC bits and suppress the stick-slip vibration.

收稿日期: 2021-12-10; 改回日期: 2022-05-15。

作者简介: 汪伟 (1992—), 男, 安徽桐城人, 2014 年毕业于中国石油大学 (北京) 石油工程专业, 2017 年获中国石油大学 (北京) 油气井工程专业硕士学位, 在读博士研究生, 主要从事井下提速工具设计研究。E-mail: cupwangwei53@163.com。

通信作者: 柳贡慧, lgh_1029@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项“复合冲击破岩技术研究及工具研制”(编号: 2016ZX05021-003) 和中国石油天然气集团有限公司-中国石油大学 (北京) 战略合作科技专项“准噶尔盆地玛湖中下组合和吉木萨尔陆相页岩油高效勘探开发理论及关键技术研究”(编号: ZLZX2020-01) 联合资助。

Key words: pulsation; torsional impact; drilling tools; stick-slip vibration; structural design; working characteristics; performance parameter

随着钻井深度增加,地层岩石硬度增大、研磨性增强、可钻性变差。钻井过程中 PDC 钻头易产生粘滑振动,造成钻头切削齿崩坏、钻柱过早疲劳破坏等井下复杂情况,导致钻井效率低,严重影响了油气资源的勘探开发进度和成本^[1-3]。国内外研究人员为了抑制粘滑振动提出了多种措施,其中扭转冲击钻井技术对减轻 PDC 钻头的粘滑振动效果尤为明显^[4-13]。扭转冲击钻井是利用钻头上端安装的扭转冲击工具持续给钻头施加周期性冲击,辅助 PDC 钻头破坏岩石,以减轻钻头的振动^[14]。TorkBuster 扭力冲击器是利用高压钻井液驱动摆锤冲击与钻头相连的砧体为钻头提供扭转冲击载荷,在国内外深部硬地层的应用中取得了很好的提速效果^[15-18]。玄令超等人^[19]研制了射流式扭转冲击工具,通过射流发生器切换摆锤高低流道。祝效华等人^[20]设计了一种具有棘轮机构的扭转冲击器,通过涡轮驱动棘轮轴持续敲击钻头中心轴为钻头提供扭转冲击载荷。查春青等人^[21]设计了旋转配流式扭转冲击工具,通过涡轮驱动中心轴来切换摆锤两端的高低压流道,实现摆锤的往复运动。以上扭转冲击工具均是通过高压钻井液推动摆锤冲击砧体为钻头施加冲击能量,而摆锤运动过程中易产生磨损导致压力腔体密封失效,影响工具的使用寿命。为此,笔者设计了一种脉动式扭转冲击工具,在分析其工作原理的基础上,结合钻井工况参数与钻柱结构参数建立了冲击功计算模型,通过室内测试验证了该工具的可行性和性能参数。研究表明,脉动式扭转冲击工具能够为钻头提供周期性扭转冲击载荷,为钻井提速工具的研究提供参考。

1 脉动式扭转冲击工具结构与工作原理

1.1 工具结构

脉动式扭转冲击工具主要由驱动结构和扭转冲击结构 2 部分组成。驱动结构包括涡轮副和轴承组,安装在旋转轴上端;扭转冲击结构位于旋转轴下端,由周向腔体、节流喷嘴和钻头座等组成(见图 1)。该工具长度 800 mm,外径 178.0 mm,工作排量 15~40 L/s,采用 411×410 扣。

1.2 工作原理

钻井过程中,高压钻井液驱动涡轮旋转,带动转轴旋转。在喷嘴节流作用下,旋转轴中心孔内钻

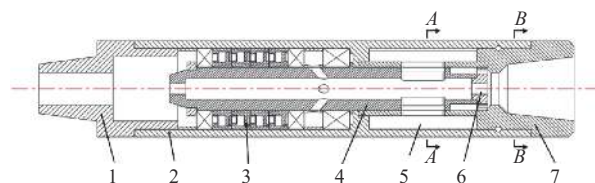


图 1 脉动式扭转冲击钻井工具的基本结构

Fig.1 Structure of the pulsating torsional impact drilling tool

1.上接头; 2.外壳体; 3.涡轮动力总成; 4.旋转轴; 5.周向腔体;
6.节流喷嘴; 7.钻头座

井液压力升高,在旋转轴中心孔流道与旋转轴外环空流道间产生正压差。旋转轴转动过程中,周向腔体交替与旋转轴中心孔高压流道、旋转轴外环空低压流道连通,工作状态如图 2 所示。

周向腔体 I 与旋转轴中心孔高压流道连通、周向腔体 II 与旋转轴外环空低压流道连通(见图 2(a))时,腔体 I 端面受高压流体作用,腔体 II 端面受低压流体作用,高压区与低压区的压差作用在钻头座凸台端面,对钻头产生一正向脉冲压力。当两端腔体内压差产生的扭矩大于上部钻柱对钻头产生的扭矩与牙轮端面摩擦扭矩之和时,作用在外壳体凸台端面的扭矩推动上部钻柱产生逆时针转动。

周向腔体 I 与旋转轴中心孔流道关闭(见图 2(b))时,上部钻柱旋转带动工具外壳牙轮冲击钻头座,对钻头座产生正向扭转冲击载荷。当周向腔体 II 与旋转轴中心孔高压流道连通、周向腔体 I 与旋转轴外环空低压流道连通(见图 2(c))时,高压区与低压区的压差作用在外壳体凸台,对工具外壳体产生正向脉冲压力,从而增大钻柱作用在钻头上的扭矩。

1.3 工具特点

脉动式扭转冲击工具产生的冲击作用包括 2 种形式: 1) 周向腔体内高低压钻井液的压差为钻头座提供一个正向的液压冲击作用力; 2) 在钻进过程中,反向的液压作用能够推动上部钻柱反向偏转一定角度,上部钻柱的旋转作用导致该工具外壳体与钻头座的牙轮间会产生一个正向的冲击作用力。该工具与文献[21-23]中的扭转冲击钻井工具相比,没有旋转摆锤部件,减少了由于摆锤运动摩擦造成的能量损失,能够提高钻井液能量的转化效率。此外,该工具的换向机构由涡轮动力总成驱动连续转动,对钻头座形成了往复的扭转冲击载荷,能够延长工具的使用寿命。

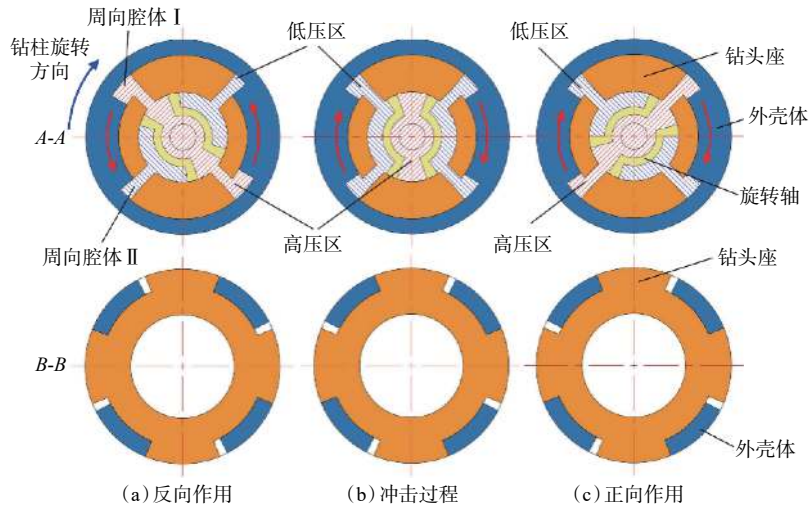


图 2 工作状态示意

Fig.2 Working state diagram

2 工作特性分析

2.1 周向扭矩

由脉动式扭转冲击工具工作原理, 得到旋转轴中心孔流道压力与旋转轴外环空流道压力的关系:

$$p_1 = p_2 + \Delta p_p \quad (1)$$

式中: p_1 为旋转轴中心孔流道压力, Pa; p_2 为旋转轴外环空流道压力, Pa; Δp_p 为该工具节流喷嘴产生的压降, Pa。

工具节流喷嘴产生的压降为:

$$\Delta p_p = \frac{1}{2} \xi_p \rho \left(\frac{4Q}{\pi d_p^2} \right)^2 \quad (2)$$

式中: ξ_p 为节流喷嘴压力损耗系数, 一般取 0.8~1.1; ρ 为钻井液密度, kg/m^3 ; Q 为钻井泵排量, L/s; d_p 为节流喷嘴直径, m。

根据所设计工具结构, 可计算得到工具在图 2(a)和图 2(c)状态下产生的周向扭矩:

$$T_t = (p_1 - p_2) A_3 d_c = \frac{1}{4} \Delta p_p l_c (d_{c1}^2 - d_{c2}^2) \quad (3)$$

式中: T_t 为钻井液作用在周向腔体端面的扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; A_3 为周向腔体承压面积, m^2 ; d_c 为周向腔体承压面中径, m; l_c 周向腔体轴向长度, m; d_{c1} 为周向腔体外径, m; d_{c2} 为周向腔体内径, m。

2.2 冲击功

脉动式扭转冲击钻井工具工作过程中, 钻杆和钻铤所组成的钻柱处于弹性变形状态。在直井情况下, 当该工具产生的周向扭矩能够推动上部钻柱沿周向逆时针运动时, 上部钻柱扭转发生变形, 钻井

液的压能转化为钻柱的弹性势能; 当周向腔体 I 的高压流体通道关闭后, 钻柱弹性势能释放, 冲击钻头座, 产生扭转冲击载荷。假设整个钻柱只由钻杆和钻铤组成, 两端均为固定约束, 钻杆和钻铤只产生弹性变形。图 3 为直井钻柱的变形简化模型。

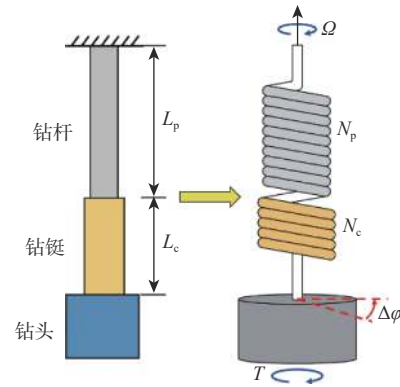


图 3 直井钻柱的变形简化模型

Fig.3 Simplified model of drill string deformation in vertical wells

脉动式扭转冲击钻井工具在反向作用过程中将钻井液的压能转化为钻柱的弹性势能, 在正向冲击过程中将钻柱的势能转化为工具的周向冲击功。假设正常钻进时, 钻柱对钻头施加的扭矩为 T_b , 钻井液压差作用在周向端面上的力矩为 T_t , 脉动式扭转冲击钻井工具外壳体与钻头座端面间的摩擦扭矩为 T_f , 钻柱逆时针扭转角为 $\Delta\varphi$ 。

上部钻柱在周向扭转力矩作用下的扭转角为:

$$\Delta\varphi = \frac{T_t - T_b - T_f}{N} \quad (4)$$

$$\text{其中 } T_f = \frac{1}{3} \mu W \frac{d_{m1}^2 + d_{m1}d_{m2} + d_{m2}^2}{d_{m1} + d_{m2}} \quad (5)$$

$$N = \frac{N_p N_c}{N_p + N_c} \quad (6)$$

$$N_p = \frac{GI_p}{L_p} \quad (7)$$

$$N_c = \frac{GI_c}{L_c} \quad (8)$$

式中: $\Delta\varphi$ 为钻柱扭转角, rad; T_b 为钻柱施加在钻头上的扭矩, N·m; T_f 为工具外壳体与钻头座端面产生的摩擦扭矩, N·m; N 为钻柱等效弹性系数, N·m; N_p 和 N_c 分别为钻杆和钻铤的扭转系数, N·m; I_p 和 I_c 分别为钻杆和钻铤截面的极惯性矩, m^4 ; L_p 和 L_c 分别为钻杆组合钻杆和钻铤的长度, m; G 为钻柱材料的剪切弹性模量, Pa; W 为钻压, N; d_{m1} 为工具摩擦面外径, m; d_{m2} 为工具摩擦面内径, m; μ 为摩擦系数, 一般取 0.20。

从式(4)可以看出, 钻柱结构确定时, 上部钻柱扭转角为工具产生周向扭矩与钻柱扭矩、摩擦扭矩之差的函数。当周向扭矩大于钻柱扭矩与摩擦扭矩之和时, 上部钻柱产生扭转变形。正向作用过程中, 工具对钻头产生的周向冲击功为钻柱扭矩、摩擦扭矩做功与钻柱内累积弹性势能之和:

$$E = \frac{1}{2} (T_b - T_f) \Delta\varphi + \frac{1}{2} N \Delta\varphi^2 \quad (9)$$

式中: E 为工具对钻头产生的周向冲击功, J。

2.3 冲击频率

脉动式扭转冲击钻井工具设计有 2 个高压流体配流通孔, 涡轮马达驱动配流筒旋转一周时周向腔体 I 的高压通道打开 2 次, 则工具冲击频率可以表示为:

$$f = \frac{2n}{60} \quad (10)$$

式中: f 为脉动式扭转冲击钻井工具的冲击频率, Hz; n 为涡轮马达的转速, r/min。

2.4 算例分析

脉动式扭转冲击钻井工具应用于 $\phi 215.9$ mm 直井, 假设钻柱的长度为 3 000.00 m, 其中钻杆的长度为 2 900.00 m, 外径为 127.0 mm, 内径为 101.6 mm; 钻铤的长度为 100.00 m, 外径为 165.1 mm, 内径为 76.2 mm。钻柱钢材的弹性模量 206 GPa, 剪切模量 81.4 GPa。脉动式扭转冲击钻井工具的外径 178.0 mm, 外壳体内径 150.0 mm; 周向腔体承压端面

内径 100.0 mm, 外径 150.0 mm, 腔长 200.0 mm, 钻井液密度 1.00 kg/L。

利用式(3)分析节流喷嘴和钻井液排量对脉动式扭转冲击钻井工具周向扭矩的影响, 结果如图 4 所示。从图 4 可以看出: 在节流喷嘴直径相同的条件下, 脉动式扭转冲击钻井工具周向扭矩随钻井液排量升高而增大, 两者呈二次函数关系; 在排量相同的条件下, 随着节流喷嘴直径增大, 周向扭矩不断减小。

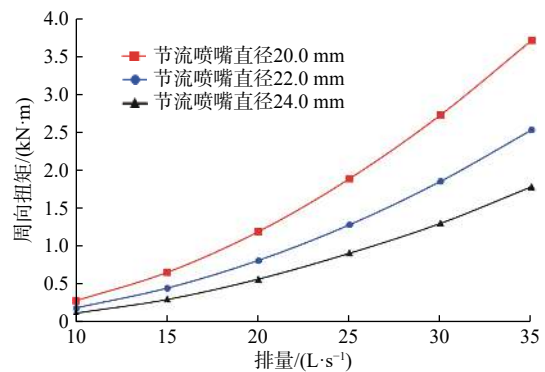


图 4 不同直径节流喷嘴下脉动式扭转冲击钻井工具周向扭矩与排量的关系

Fig.4 Variation of circumferential torque with flow rate of pulsating torsional impact drilling tools with different diameters of throttle nozzles

利用式(4), 计算钻柱周向扭转为 5° 、不同井深时的脉动式扭转冲击钻井工具周向扭矩与钻柱扭矩、摩擦扭矩的差(下面简称扭矩差), 结果如图 5 所示。从图 5 可以看出, 随着井深增加, 扭矩差随井深增加不断减小。在给定的钻柱组合条件下, 当井深大于 200.00 m、上部钻柱周向扭转 5° 时, 扭矩差小于 40 N·m。现场应用时可以结合图 4 与图 5 的计算结果优选脉动式扭转冲击钻井工具的结构参数。

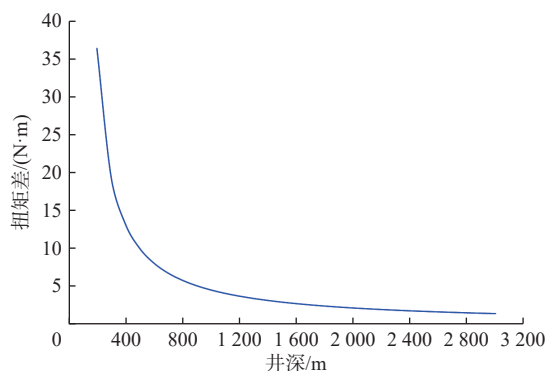


图 5 钻柱周向扭转 5° 时不同井深下的扭矩差
Fig.5 Torque difference at different well depths with the drill string circumferential rotation of 5°

利用式(7), 分析了钻压 30 kN 条件下钻柱扭矩和扭转角对脉动式扭转冲击钻井工具周向冲击功的影响和钻柱周向扭转 5° 条件下钻柱扭矩和钻压对脉动式扭转冲击钻井工具周向冲击功的影响, 结果如图 6 和图 7 所示。从图 6 和图 7 可以看出: 钻柱周向扭转角一定时, 脉动式扭转冲击钻井工具的周向冲击功随钻柱扭矩增大而增大; 钻柱扭矩一定时, 脉动式扭转冲击钻井周向冲击功随钻柱周向扭转角增大而增大, 随钻压增大而减小。

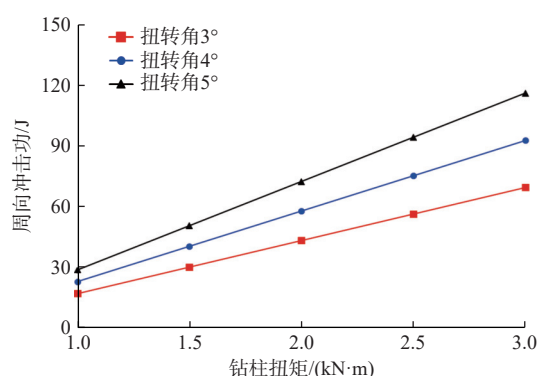


图 6 不同扭转角下冲击功随钻柱扭矩变化的曲线

Fig.6 Variation curves of impact energy with drill string torque under different rotation angles

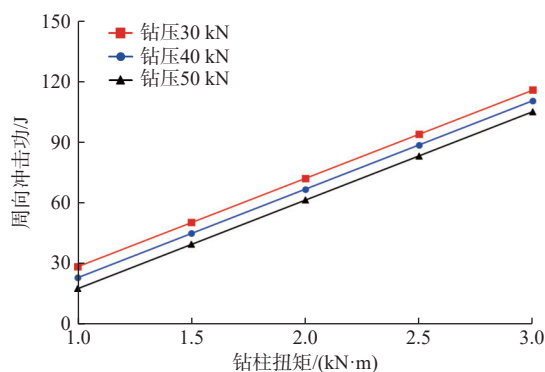


图 7 不同钻压条件下冲击功随钻柱扭矩变化的曲线

Fig.7 Variation curves of impact energy with drill string torque under different WOB

3 室内测试

为了测试脉动式扭转冲击钻井工具的性能参数, 设计了扭转冲击工具测试装置, 主要包括离心泵、流量计、压力传感器、扭矩测量短节及数据采集系统(见图 8)。测试用离心泵的额定排量为 40 L/s, 测试用介质为清水。测试过程中, 利用安装在周向腔体 I 和腔体 II 的压力传感器测量脉动式扭转冲击

钻井工具工作过程中其周向腔体内的压力, 利用连接在钻头座下端的扭矩测量短节测量其产生的周向扭矩。

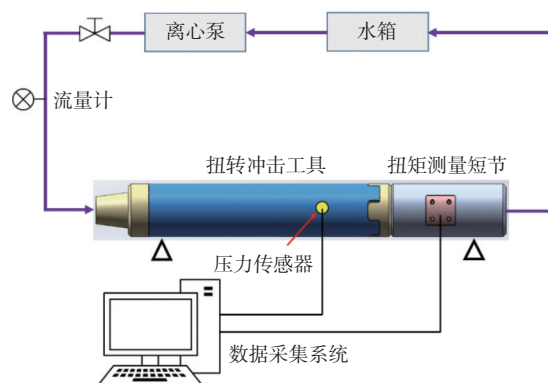


图 8 扭转冲击工具工具测试装置

Fig.8 Test system for torsional impact tool

脉动式扭转冲击钻井工具在节流喷嘴 $\phi 22.0$ mm、排量 30.8 L/s 条件下周向腔体内的压力变化曲线如图 9 所示。从图 9 可以看出, 脉动式扭转冲击钻井工具工作过程中, 周向腔体内的压力发生明显波动, 腔体 I 和腔体 II 内高压和低压交替变化, 平均压差达 2.84 MPa, 工作频率为 38 Hz。

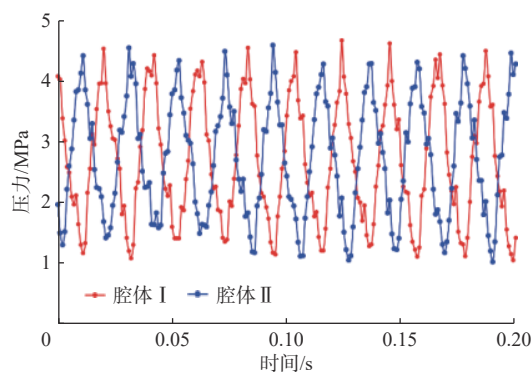


图 9 脉动式扭转冲击钻井工具周向腔体内压力的变化曲线

Fig.9 Variation curve of circumferential cavity pressure of the pulsating torsional impact drilling tool

图 10 为脉动式扭转冲击钻井工具不同排量下的冲击频率, 图 11 和图 12 分别为不同排量下脉动式扭转冲击钻井工具的周向腔体压差和周向扭矩。

从图 10—图 12 可以看出: 脉动式扭转冲击钻井工具的冲击频率随着排量增大而逐渐增大, 并且基本呈线性关系; 周向腔体压差、周向扭矩均随着排量增大而逐渐增大, 二者近似呈二次函数关系。脉动式扭转冲击钻井工具周向腔体压差测试结果与计算结果间的误差约为 9.6%, 其周向扭矩测试结果与

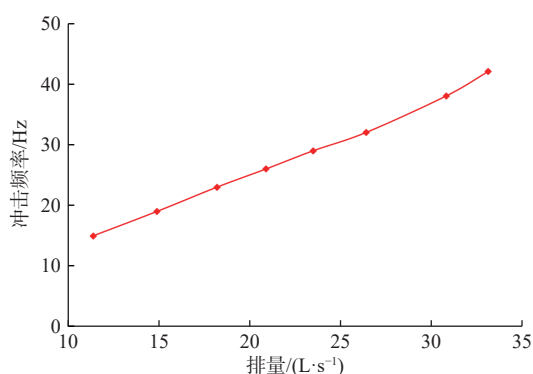


图 10 脉动式扭转冲击钻井工具不同排量下的冲击频率
Fig.10 Variation curve of impact frequency of pulsating torsional impact drilling tool with flow rate

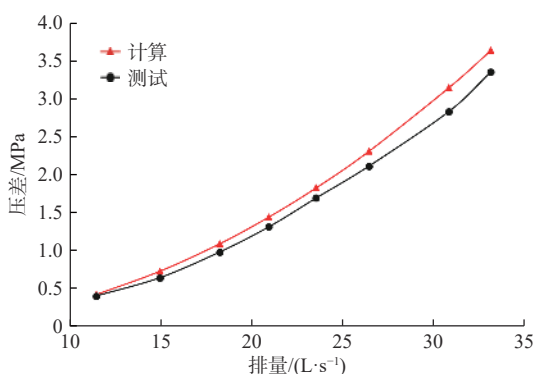


图 11 脉动式扭转冲击钻井工具周向腔体不同排量下的压差
Fig.11 Variation curve of circumferential cavity pressure difference of pulsating torsional impact drilling tool with flow rate

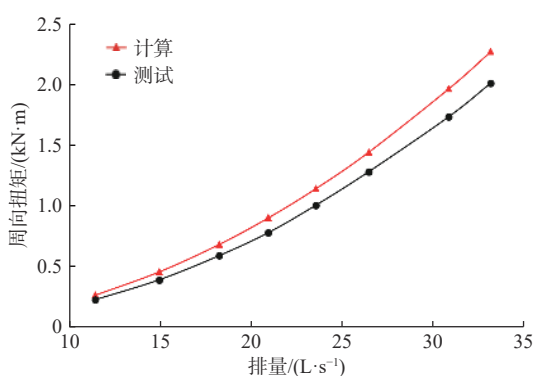


图 12 脉动式扭转冲击钻井工具不同排量下的周向扭矩
Fig.12 Variation curve of circumferential torque of pulsating torsional impact drilling tool with flow rate

计算结果间的误差约为 14.8%，测试结果与计算结果的变化趋势较为一致，初步验证了性能参数理论计算模型的正确性。

在试验过程中，脉动式扭转冲击钻井工具运行平稳，其钻头座产生明显的周期性扭转冲击。这也

验证了该工具设计的可行性，能够对钻头产生往复扭转冲击效果。室内试验测得的性能参数可为该钻井工具的现场应用提供指导。

4 结论与建议

1) 为提高硬地层机械钻速，设计了一种脉动式扭转冲击钻井工具。该钻井工具能够为钻头施加周期性的扭转冲击载荷，同时产生的脉冲压力能够增加作用在钻头上的扭矩，有效减轻钻头的粘滑振动，提高破岩效率。

2) 脉动式扭转冲击钻井工具的周向扭矩与排量、节流喷嘴直径密切相关：在节流喷嘴直径相同的情况下，其周向扭矩随钻井液排量增大而增大；在排量相同的情况下，随着节流喷嘴直径增大，周向扭转力矩不断减小。

3) 脉动式扭转冲击钻井工具的周向冲击功与钻柱扭矩、周向扭转角及钻压密切相关：周向扭转角一定时，周向冲击功随钻柱扭矩增加呈线性增大；钻柱扭矩一定时，周向冲击功随周向扭转增大而增大，随钻压增大而减小。

4) 室内测试结果验证了脉动式扭转冲击钻井工具的可行性以及性能参数计算模型的正确性，可为该钻井工具的现场试验提供指导。

5) 建议尽快通过现场试验验证脉动式扭转冲击钻井工具在硬地层的提速效果，并根据现场试验对其进行改进。

参考文献

References

- [1] 马凤清. 哈山 3 井火成岩地层快速钻井技术 [J]. 石油钻探技术, 2014, 42(2): 112-116.
MA Fengqing. Fast drilling technique through igneous rocks in well Hashan 3[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(2): 112-116.
- [2] 滕学清, 狄勤丰, 李宁, 等. 超深井钻柱粘滑振动特征的测量与分析 [J]. 石油钻探技术, 2017, 45(2): 32-39.
TENG Xueqing, DI Qinfeng, LI Ning, et al. Measurement and analysis of stick-slip characteristics of drill string in ultra-deep wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(2): 32-39.
- [3] 朱全塔, 邹宗明, 黄兵, 等. 导致钻铤失效的井下振动分析及其解决方案 [J]. 天然气工业, 2016, 36(12): 80-86.
ZHU Quanta, ZOU Zongming, HUANG Bing, et al. Downhole vibration causing a drill collar failure and solutions[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(12): 80-86.
- [4] KOVALYSHEN Y. Understanding root cause of stick-slip vibrations in deep drilling with drag bits[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2014, 67(12): 331-341.

- [5] TUCKER W R, WANG C. On the effective control of torsional vibrations in drilling systems[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, 224(1): 101–122.
- [6] 王宏伟, 韩飞, 纪友哲, 等. PDC 钻头粘滑控制技术现状及发展趋势[J]. *石油矿场机械*, 2016, 45(7): 104–107.
WANG Hongwei, HAN Fei, JI Youzhe, et al. Status and development tendency of stick-slip controlling technology for PDC bit[J]. *Oil Field Equipment*, 2016, 45(7): 104–107.
- [7] 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.
- [8] 汪伟, 柳贡慧, 李军, 等. 扭转冲击钻井工具的工作特性[J]. *断块油气田*, 2019, 26(3): 385–388.
WANG Wei, LIU Gonghui, LI Jun, et al. Operating characteristics of torsional impact drilling tool[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2019, 26(3): 385–388.
- [9] 李思琪, 毕福庆, 李玮, 等. 扭转冲击钻井稳态钻进动力学特性及现场应用[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2019, 43(2): 97–104.
LI Siqu, BI Fuqing, LI Wei, et al. Dynamic characteristics of steady torsional impact drilling and its field application[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2019, 43(2): 97–104.
- [10] 席岩, 夏铭莉, 孙念, 等. 扭转冲击参数对 PDC 钻头单齿破岩效率的影响[J]. *石油钻采工艺*, 2021, 43(5): 574–579.
XI Yan, XIA Mingli, SUN Nian, et al. Influence of torsion impact parameters on single-tooth rock breaking efficiency of PDC bit[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2021, 43(5): 574–579.
- [11] 田家林, 唐磊, 刘强, 等. 恒扭提速钻井工具动力学特性研究与试验分析[J]. *中国海上油气*, 2022, 34(4): 203–212.
TIAN Jialin, TANG Lei, LIU Qiang, et al. Dynamics characteristics study and experiment of constant torque speed-up drilling tool[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2022, 34(4): 203–212.
- [12] 刘书斌, 倪红坚, 张恒. 轴扭复合冲击工具的研制与应用[J]. *石油钻探技术*, 2021, 48(5): 69–76.
LIU Shubin, NI Hongjian, ZHANG Heng. Development and applications of a compound axial and torsional impact drilling tool[J]. *Petroleum Drilling techniques*, 2021, 48(5): 69–76.
- [13] 陈杰, 牟小军, 李汉兴, 等. 旋冲振荡钻井提速工具的研制与应用[J]. *断块油气田*, 2020, 27(3): 386–389.
CHEN Jie, MOU Xiaojun, LI Hanxing, et al. Development and application of rotary-percussive and oscillatory drilling tool[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2020, 27(3): 386–389.
- [14] 李玮, 何选蓬, 闫铁, 等. 近钻头扭转冲击器破岩机理及应用[J]. *石油钻采工艺*, 2014, 36(5): 1–4.
LI Wei, HE Xuanpeng, YAN Tie, et al. Rock fragmentation mechanism and application of near-bit torsion impactor[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2014, 36(5): 1–4.
- [15] DEEN A, WEDEL R, NAYAN A, et al. Application of a torsional impact hammer to improve drilling efficiency[R]. SPE 147193, 2011.
- [16] 王四一, 赵江鹏, 赵建国. 扭力冲击器在煤矿井下硬岩钻进中的应用研究[J]. *煤矿机械*, 2018, 39(10): 139–141.
WANG Siyi, ZHAO Jiangpeng, ZHAO Jianguo. Application research on torque impactor applications on hard rock drilling underground coal mine[J]. *Coal Mine Machinery*, 2018, 39(10): 139–141.
- [17] 李宁, 周小君, 周波, 等. 塔里木油田 HLHT 区块超深井钻井提速配套技术[J]. *石油钻探技术*, 2017, 45(2): 10–14.
LI Ning, ZHOU Xiaojun, ZHOU Bo, et al. Technologies for fast drilling ultra-deep wells in the HLHT block, Tarim oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(2): 10–14.
- [18] 张海山, 葛俊瑞, 杨进, 等. 扭力冲击器在海上深部地层的提速效果评价[J]. *断块油气田*, 2014, 21(2): 249–251.
ZHANG Haishan, GE Junrui, YANG Jin, et al. Effect evaluation of torsion impactor for increasing ROP in offshore deep formation[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2014, 21(2): 249–251.
- [19] 玄令超, 管志川, 刘永旺, 等. 射流式扭转冲击钻井工具: CN103774983A[P]. 2014-05-07.
XUAN Lingchao, GUAN Zhichuan, LIU Yongwang, et al. Jet torsion percussion drilling tool: CN103774983A[P]. 2014-05-07.
- [20] 祝效华, 石昌帅, 汤历平. 一种用于硬地层的涡轮式扭转冲击钻具: CN201554363U[P]. 2010-08-18.
ZHU Xiaohua, SHI Changshuai, TANG Liping. A turbine type torsional percussion drill for hard formation: CN201554363U[P]. 2010-08-18.
- [21] 查春青, 柳贡慧, 李军. 扭转冲击钻井提速工具: CN108625769B[P]. 2019-06-25.
ZHA Chunqing, LIU Gonghui, LI Jun. Speed up tool for torsional percussion drilling: CN108625769B[P]. 2019-06-25.
- [22] 韩飞, 罗淮东, 张全立, 等. 扭力冲击器设计与仿真分析[J]. *石油机械*, 2019, 47(3): 19–23.
HAN Fei, LUO Huaidong, ZHANG Quanli, et al. Design and simulation analysis of torque thruster[J]. *China Petroleum Machinery*, 2019, 47(3): 19–23.
- [23] 赵建军, 崔晓杰, 赵晨熙, 等. 高频液力扭力冲击器设计与试验研究[J]. *石油化工应用*, 2018, 37(2): 5–10.
ZHAO Jianjun, CUI Xiaojie, ZHAO Chenxi, et al. Design and experimental research on high frequency hydraulic torsional impactor[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2018, 37(2): 5–10.

[编辑 刘文臣]