

基于微钻实验台的PDC钻头动载钻进适应性研究

祁任泽, 闫海, 任雷, 张帅, 石益玮, 卜长根*

(中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

摘要: PDC钻头冲击回转钻进是一种有效提高硬地层机械钻速的方法,但目前PDC钻头冲击回转实验设备大多数不能方便地控制冲击载荷幅值和频率等参数。为了研究未磨损和磨损齿2种PDC钻头在不同的静/动载荷参数下钻速的变化规律,设计制造了不同磨损程度的PDC钻头,并使用改进的伺服给进微钻实验台进行可控动载荷参数的钻进实验,重点分析了静载荷、动载荷方式以及动载荷幅值、占比、频率等参数对钻头钻速的影响规律。结果表明:静载荷钻进时,钻头切削齿的磨损会显著降低钻进效率;动载荷钻进时,完好齿和磨损齿PDC钻头平均钻速分别提高了21.5%和35.2%;动载荷占比和频率对钻速的影响较大,保持轴向最大总载荷不变,随动载荷幅值增加,2种钻头的钻速均呈下降趋势;本实验的参数范围内,2种钻头均在动载荷频率为10 Hz时钻速最优。研究结果揭示了PDC钻头在动载荷下的工作特性,为深井硬地层冲击回转钻进参数优化与钻头选型提供了实验依据。

关键词: PDC钻头;微钻实验台;钻进效率;磨损齿;动载荷;冲击回转钻进

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)03-0034-10

Study on adaptability of PDC bits under dynamic loading based on micro-drilling test rig

QI Renze, YAN Hai, REN Lei, ZHANG Shuai, SHI Yiwei, BU Changgen*

(School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Rotary-percussive drilling with PDC bits is an effective method for improving the rate of penetration (ROP) in hard formations. However, most existing experimental devices for PDC bit impact rotary drilling lack convenient control over parameters such as impact load amplitude and frequency. To investigate the variation laws of ROP for both unworn and worn PDC bits under different static and dynamic load parameters, PDC bits with varying degrees of wear were designed and manufactured. Drilling experiments with controllable dynamic load parameters were conducted using a modified servo feed micro-drilling test rig, focusing on analyzing the effects of static load, dynamic load mode, as well as dynamic load amplitude, proportion, and frequency on bit ROP. The results indicate that: under static load drilling, the wear of bit cutters significantly reduces drilling efficiency; compared with static load drilling, the average ROP of unworn and worn PDC bits increases by 21.5% and 35.2%, respectively, under dynamic load drilling. The dynamic load proportion and frequency have a significant influence on ROP. With the maximum total axial load kept constant, the ROP of both unworn and worn PDC bits shows a decreasing trend as the dynamic load amplitude increases. Within the experimental parameter range, both types of bits achieved optimal ROP at a dynamic load frequency of 10 Hz. The research results elucidate the operational behavior of PDC bits under dynamic loading conditions, thereby offering an experimental foundation for optimizing drilling parameters and selecting appropriate bits for percussive-rotary drilling in deep hard formations.

收稿日期: 2025-09-09; **修回日期:** 2025-12-26 **DOI:** 10.12143/j.ztgc.2026.03.004

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“潜孔锤/声波钻柱动力学关键问题研究”(编号:51775523)

第一作者: 祁任泽,男,汉族,2000年生,硕士研究生,机械工程专业,研究方向为PDC钻头的切削性能及磨损机制,北京市海淀区学院路29号,2002220001@email.cugb.edu.cn。

通信作者: 卜长根,男,汉族,1963年生,教授,博士生导师,地质工程专业,博士,兼任中国振动工程学会机械动力学专业委员会委员,中国机械工程学会机床专业委员会委员,机械学科国际期刊评审专家,北京市海淀区学院路29号,bucg@cugb.edu.cn。

引用格式: 祁任泽,闫海,任雷,等.基于微钻实验台的PDC钻头动载钻进适应性研究[J].钻探工程,2026,53(3):34-43.

QI Renze, YAN Hai, REN Lei, et al. Study on adaptability of PDC bits under dynamic loading based on micro-drilling test rig[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(3): 34-43.

Key words: PDC bit; micro-drilling test rig; drilling efficiency; worn cutter; dynamic load; rotary-percussive drilling

0 引言

近年来,PDC钻头逐步取代牙轮钻头成为破岩主力,以大于80%的市场占有率和大于90%的进尺主导了全球钻头市场^[1]。然而,随着对浅层地质资源的开发达到一定的饱和度,钻井领域正面临着深井超深井钻探效率的挑战^[2]。使用冲击钻具可有效提高PDC钻头在深井超深井硬地层的钻进效率^[3-5],但PDC钻头多用于静载荷切削,对于深层页岩气、地热资源的开发,由于深部地层复杂,岩石可钻性差、研磨性强,不当的动载荷会导致PDC钻头磨损过快,严重制约PDC钻头的使用效果^[6-8]。因此有必要研究PDC钻头在不同动载荷作用下钻进的变化规律,尤其是分析磨损齿PDC钻头钻进变化规律。

众多学者使用有限元法开展了冲击回转钻进的相关研究。祝效华等^[9]建立了单齿旋冲破岩模型,发现在硬岩地层中旋冲钻进更易使岩石发生脆性破坏,产生大块岩屑,同时可改善切削齿受力状态,减少与岩石的研磨时间,缓解PDC钻头的磨损。刘伟等^[10]比较了不同冲击方式下PDC切削齿的侵入深度,研究发现旋冲钻井、扭冲钻井和复合冲击钻井的侵入深度分别提升19.8%、6.6%、26.9%。杨合等^[11]建立了冲击作用下FGQ-600型大直径潜孔锤反循环偏心式跟管钻头模型,分析不同冲击作用下钻头关键位置的受力情况,提出了提高钻头强度的优化方案。Huang等^[12]建立了全尺寸PDC钻头复合冲击破岩模型,分析了冲击角度和冲击持续时间对破岩效率的影响,指出复合冲击能够有效减少钻头的黏滑振动,也研制了各种冲击装置用于钻进实验。Liu等^[13]使用带有冲击活塞的液压凿岩机进行钻进实验,冲击活塞以特定的频率往复运动撞击钎尾,将其动能以应力波的形式通过钎尾、钻杆和钻头传递给岩石,最大单次冲击功388 J,最大冲击频率55 Hz。Liu等^[14]搭建的复合冲击钻进实验台使用两个激振器产生轴向和周向振动,通过改变功率放大器和信号放大器的参数来调整冲击幅值、方向和频率。闫炎等^[15-16]设计了一种冲击发生装置,主体结构由弹簧、冲锤、砧体和挡板组成,砧体上部的齿形凸起不断和冲锤的齿形啮合交错,带动冲锤压缩弹簧储存并释放能量,冲锤不断撞击砧

体形成冲击载荷。在钻井现场冲击装置多为液动冲击器,以高压钻井液作为驱动介质使冲击体往复运动,钻井液的流量会影响冲击功和冲击频率^[17-18]。田雨等^[19]设计了一种通过改变下心轴换位孔数量来调整冲击频率的轴向冲击器,能更好地适用于各种地层。汤风林等^[20]设计了一种可施加偏心冲击脉冲的冲击器,实验表明,偏心距在1~2 mm时机械钻速和钻头每转进尺比非偏心冲击明显提高。使用冲击钻具可以有效提高钻进效率,但也有研究表明对PDC钻头施加不当的冲击动载荷反而会导致切削齿出现崩刃、破碎等非正常磨损^[21-24],降低钻头寿命。

对于磨损齿PDC钻头,众多学者进行了PDC钻头磨损齿单齿切削试验。朱光辉等^[25]使用不同磨损程度的PDC齿进行单齿切削试验,结果表明切削齿所受的轴向力和周向力随着磨损程度的增加而增加,且磨损齿产生的切削热远大于未磨损齿,大量实验和仿真结果也得出相同的结论^[26-30]。Liu等^[31]使用机加工获得的PDC磨损齿进行室内破岩实验,研究发现磨损程度增加会使机械比能(MSE)增大,且会增加切削齿与岩石间的接触面积,导致切削齿磨损平面和岩石之间的摩擦力增大。针对硬岩条件下潜孔锤钻头边缘PDC齿磨损过快的问题,Ye等^[32]对边缘PDC齿布齿进行了优化,显著提高了使用寿命。也有研究分析钻头的磨损规律并建立磨损模型,预测钻头磨损。张绍和等^[33]通过立车实验提出了考虑摩擦力、摩擦速度和摩擦时间等的切削齿体积磨耗计算公式。曲冠政等^[34]引入偏心距、水力系数、研磨性系数、磨损高度及后倾角等变量,建立了PDC钻头复合片的体积磨损速度方程。田家林等^[35]提出了基于扭转振动的PDC钻头布齿角度对复合片磨损的影响规律模型,有助于PDC钻头设计阶段布齿参数的选择。郭家等^[36]通过连续分析钻进扭矩的小波包能量特征来实现钻头磨损监测,为工程实际中监控钻头磨损提供了思路。钟尹明等^[37]建立了基于GRU神经网络的PDC钻头磨损实时监测模型,并运用于新疆油田A井,监测准确率达84%。Ma等^[38]考虑了PDC钻头切削过程中热-机耦合影响,提出了磨损预测模型,通过钻进过程中实时的温度和切削力变化数据可精确

计算磨损高度。任雷等^[39]和祁任泽等^[40]分别提出了圆柱齿和V形齿磨损高度与岩石接触面积之间函数关系的理论公式,为切削齿几何参数的设计提供了依据,从而降低磨损速率。

综上所述,一定条件下动载荷钻进可以有效提高钻进效率,改善井下钻具受力情况,但冲击载荷特性对PDC钻头(磨损齿)钻速的影响规律还有待研究。课题组创新设计的伺服给进微钻实验台,无需改变给进机构,就可改变冲击载荷幅值、频率等特性参数,进行未磨损齿、磨损齿PDC钻头的静/动载荷钻进实验,分析不同载荷参数对钻进效率的影响,有利于认识PDC钻头对动载荷的适应性规律及选择实钻的最佳钻进参数。

1 实验装置与方案

1.1 实验装置及工作原理

实验用的微钻实验台由摇臂钻床改装而来,见图1。微钻实验台由回转系统、伺服给进系统、钻压控制系统、数据采集系统和冲洗液循环系统组成。伺服给进系统^[41]中的伺服驱动器接收信号发生器

输出的不同信号,可以控制伺服电机输出不同的转速和扭矩,经行星减速器驱动钻床主轴,将伺服电机按特定规律的旋转运动转换为主轴的变速往复直线运动,从而实现特定规律的冲击回转钻进,即可实现不同波形、幅值、频率的动载荷伺服钻进实验,且可以同时采集伺服电机的转速和扭矩数据。使用RS232信号线建立PC与伺服驱动器间的通信,通过LabVIEW软件编写的上位机程序实现PC端对伺服给进系统的即时监控。

1.2 实验样品

实验选用采自北京郊区的天然大理石作为钻进对象,尺寸为300 mm×250 mm×120 mm。为了分析切削齿磨损量对钻速的影响,设计制造了4个PDC微钻头,如图2所示。其中钻头A1、A2为2个相同尺寸参数的未磨损齿PDC钻头,分别用于静载荷和动载荷实验;钻头M1、M2为2个不同磨损量的PDC钻头。可根据圆柱齿直径、后倾角和磨损高度计算接触面积 S ,见式(1)^[39]。根据测量的磨损高度可知钻头M2的岩石接触面积约为M1的2倍,4个PDC钻头的参数见表1。

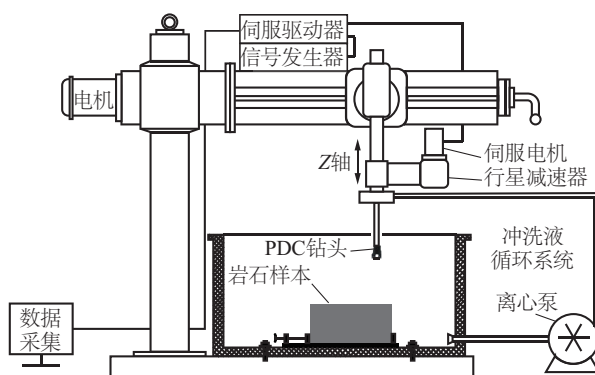


图1 伺服给进微钻实验台



Fig.1 Servo feed micro-drilling test rig

$$S = \frac{\pi d^2}{8 \sin \alpha} \left[1 - \frac{2}{\pi} \arcsin \left(1 - \frac{2 \Delta h}{d \cos \alpha} \right) \right] - \left(d - \frac{2 \Delta h}{\cos \alpha} \right) \frac{\sqrt{d \Delta h \cos \alpha - \Delta h^2}}{\sin 2 \alpha} \quad (1)$$

式中: d ——切削齿直径; α ——切削齿后倾角; Δh ——磨损高度。

1.3 实验方案

PDC在钻进过程中对岩石的接触压力 p :

$$p = \frac{F}{S} = \frac{A + B \sin(f \times 2\pi t)}{S} \quad (2)$$

式中: F ——实验台对钻头施加的载荷; S ——单个钻头复合片的岩石接触面积; A ——平均载荷; B ——动载荷幅值; f ——动载荷频率; t ——钻进时间。

当式(2)中的动载荷幅值 $B=0$ 时,载荷 F 即为只有平均载荷 A 的静载荷,实验方案的设计思路就是改变式(2)中 A 、 B 、 f 的大小,分析动静载荷、动载荷参数(幅值、频率、占比)和切削齿磨损量对钻速的

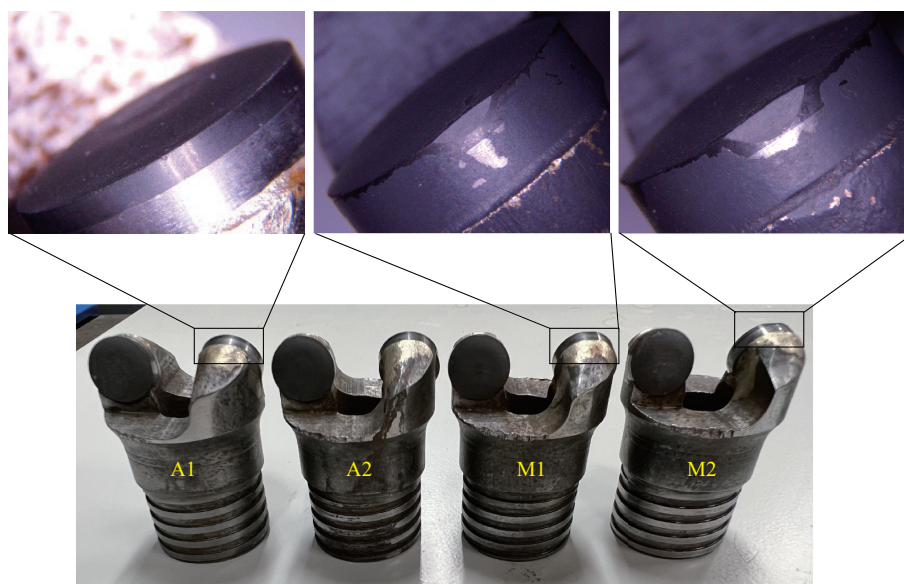


图2 实验用PDC微钻头

Fig.2 PDC bits for experiments

表1 钻头参数

Table 1 Drill bits parameters

钻头编号	尺寸参数/mm	质量/g	复合片尺寸/mm	后倾角/(°)	侧转角/(°)	磨损高度/mm	接触面积/mm ²
A1	Ø36.20×50.60	190.54	Ø13.34×4.6	10	0	0	0
A2	Ø36.20×50.80	192.31	Ø13.34×4.6	10	0	0	0
M1	Ø36.20×50.22	190.01	Ø13.34×4.6	10	0	0.1748	2.0880
M2	Ø36.20×50.74	192.17	Ø13.34×4.6	10	0	0.2776	4.1694

影响,其中动载荷占比指保持式(2)中 $A+B$ 之和不变,改变动载荷幅值 B 的大小。对未磨损齿钻头A1、A2分别进行静载荷和动载荷实验,对单个磨损齿钻头M1、M2进行静载荷+动载荷实验。每种载荷参数钻进10个回次,单回次进尺100 mm,记录每一个钻进回次的钻速,最后计算每种钻进参数的平均钻速。

施加的载荷曲线见图3。其中图3(a)为不同载荷方式的加载曲线,分别在平均载荷 $A=1200$ 、1400、1600、1800 N的基础上添加幅值 $B=100$ N、频率 $f=10$ Hz的正弦波动载荷;图3(b)为在平均载荷 $A=1600$ N的基础上,保持动载荷频率 $f=10$ Hz不变,改变动载荷幅值 B 分别为100、200、300、400 N;图3(c)为保持平均载荷 A 与动载荷幅值 B 之和不变(即 $A+B=1900$ N)和动载荷频率 $f=10$ Hz不变,改变载荷中动载荷幅值 B 的大小,即动载荷在轴向最大总载荷中的占比;图3(d)为保持平均载荷 $A=1600$ N、动载荷幅值 $B=100$ N不变,改变动载荷

频率 f 为5、10、20 Hz。由表1可知,钻头M2的岩石接触面积约为钻头M1的2倍。为了比较2个钻头在静态接触压力 p 相同时钻速的差异,对钻头M2施加的载荷为图3载荷的2倍。实验中钻头转速设置为173 r/min。

2 静载荷对钻进效率的影响

使用钻头A1和钻头M1钻进天然大理石,见图4。取式(2)中 $B=0$,改变静载荷 A (图3a中的直线),对PDC钻头施加不同的静载荷,静载荷和钻速的关系曲线见图5。

由图5可知,静载荷 A 从1200 N到2000 N,未磨损齿钻头A1的提速效果最明显,提速86.4%;磨损齿钻头M1在静载荷1200~1600 N范围内钻速变化不大,当继续增加静载荷到1800 N才开始有明显的提速效果,但在不同的静载荷下钻速始终低于未磨损齿钻头A1。该实验结果比较符合现场实际情况,在相同钻压下切削齿磨损,会导致钻速下降;提

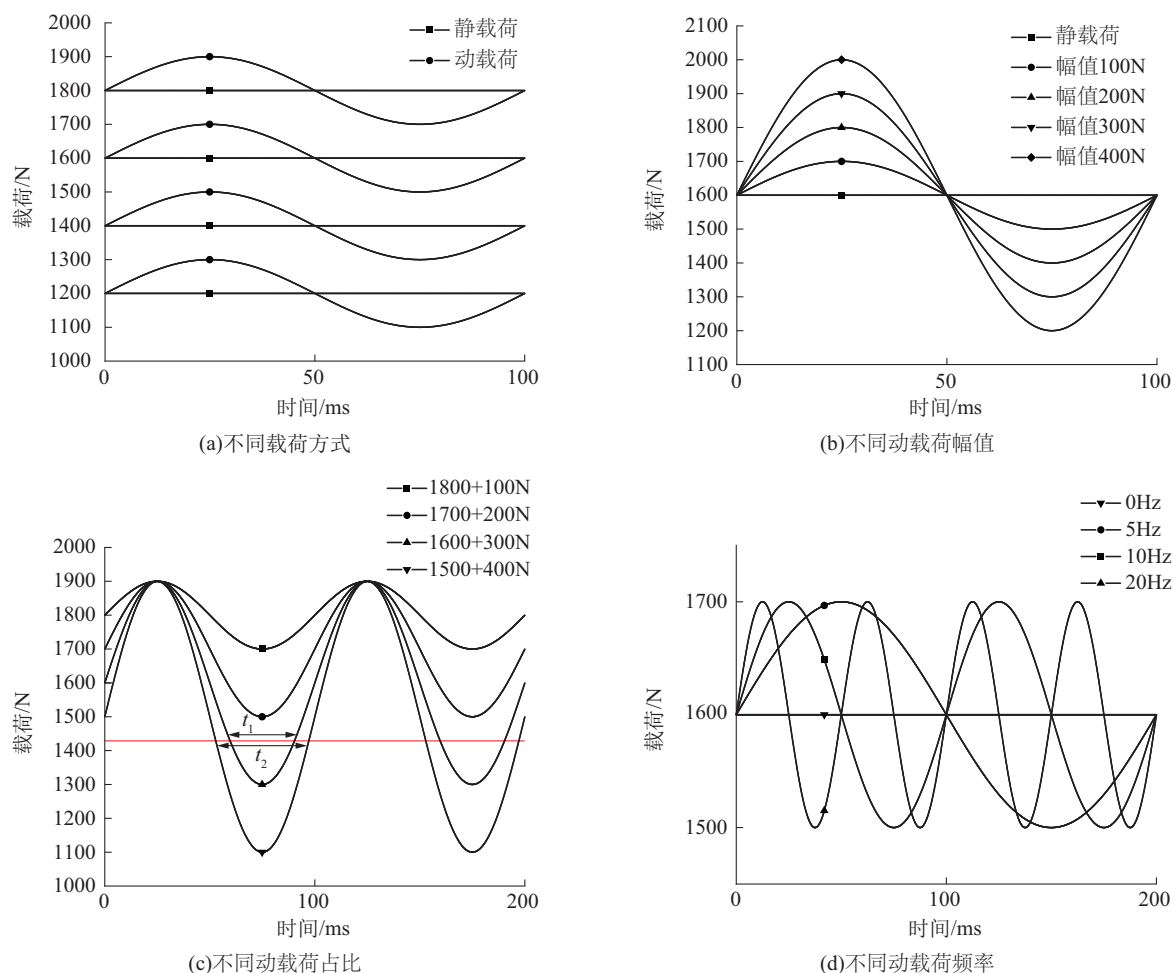


图3 载荷曲线(钻头 A1、A2、M1)

Fig.3 Load curves (PDC bits A1, A2, M1)



图4 钻进过程

Fig.4 Drilling process

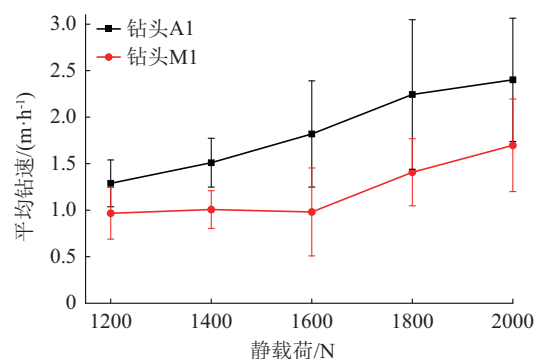


图5 钻头 A1、M1在不同静载荷下的平均钻速

Fig.5 Average ROP of PDC bits A1 and M1 under different static loads

高钻压,岩石受力增加更易破碎,钻速增加。

为进一步分析PDC钻头的磨损程度对钻速的影响,使用钻头 M2在静载荷 A 为 1200、1400 N 时进行钻进实验,并与钻头 A1、M1的实验结果进行对

比,3个钻头的钻速对比见图6。

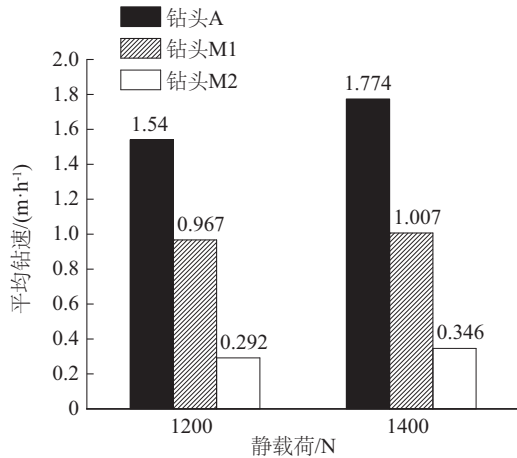


图6 钻头A1、M1、M2相同静载荷下的钻速

Fig.6 ROP of PDC bits A1, M1 and M2 under the same static load

从图6的钻速对比可以看出,在1200、1400 N钻压下,钻头M1相较于钻头A1的平均钻速分别下降了37.2%和43.2%,但接触面积增加1倍的M2平均钻速下降分别高达81%和80.5%。表明PDC钻头切削齿磨损程度增加会显著影响其钻进效率。

3 动载荷对钻进效率的影响

3.1 动静载荷对钻进效率的影响

钻头A2、M1在静载荷的基础上增加幅值100 N、频率10 Hz的正弦波动载荷,与之前使用静载荷钻进的钻头A1、M1的钻速对比,载荷曲线见图3(a)。分析动载荷对PDC钻头钻进天然大理石的影响。钻头A2、M1在静载荷、动载荷下平均载荷和钻速关系曲线见图7。

由图7可知,在不同的平均载荷下,对于未磨损钻头和磨损齿钻头,使用正弦波动载荷的钻速均大于静载荷,钻头A2平均提速21.5%,钻头M1平均提速35.2%,提速效果对磨损齿PDC钻头M1更显著。回转钻进配合适当的轴向动载荷,岩石受到周向切削和轴向冲击,可以有效破碎较硬岩石,提高钻进效率。

3.2 动载荷幅值对钻进效率的影响

钻头A2、M1保持平均载荷 $A=1600$ N以及动载荷频率 $f=10$ Hz不变,改变动载荷幅值,研究动载荷幅值对钻速的影响。载荷曲线见图3(b),PDC钻头在不同动载荷幅值下的钻进效率对比见图8。

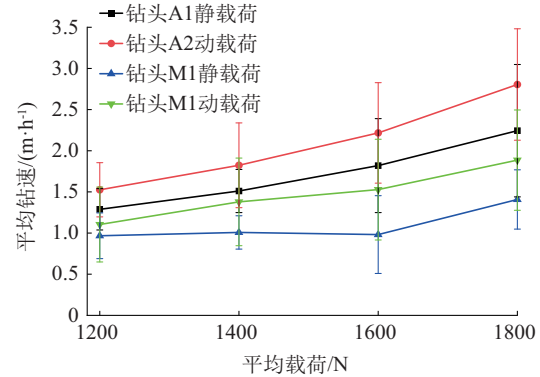
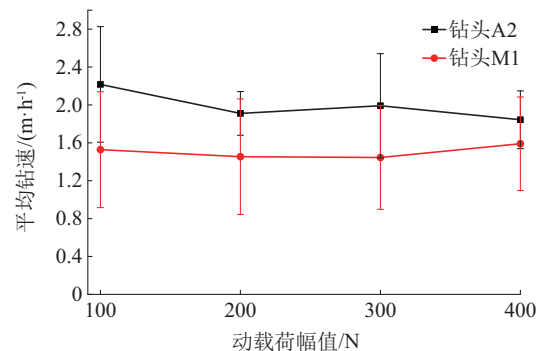
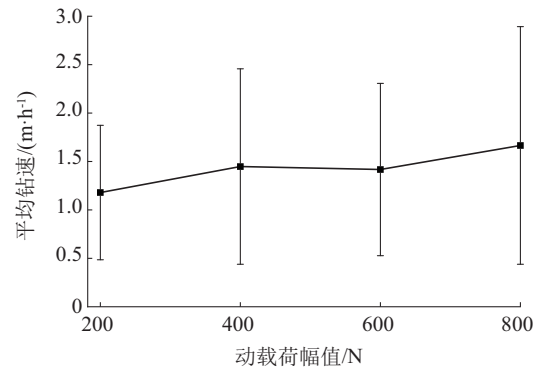


图7 钻头A1、A2、M1不同载荷方式下的平均钻速

Fig.7 Average ROP of A1, A2 and M1 under different load modes



(a) 钻头A2、M1($A=1600$ N, $f=10$ Hz)



(b) 钻头M2($A=3200$ N, $f=10$ Hz)

图8 钻头A2、M1、M2不同动载荷幅值下的平均钻速

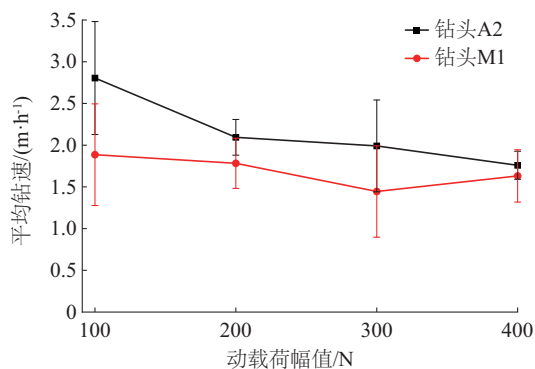
Fig.8 Average ROP of PDC bits A2, M1 and M2 under different dynamic load amplitudes

由图8可知,对于未磨损钻头A2,随着动载荷幅值的增加,钻速出现下降趋势;对于磨损齿钻头M1,动载荷幅值增加到400 N时钻速开始出现上升的趋势。在平均载荷 A 保持不变的条件下,2个钻头在动载荷幅值100~400 N范围内的钻速变化不超过0.4 m/h,动载荷幅值的变化对钻速的影响并

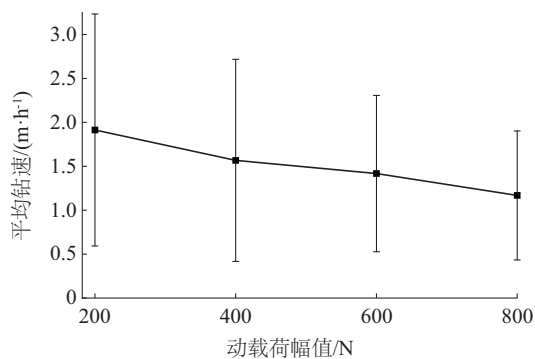
不显著。但对于磨损程度更大的钻头 M2,其钻速随动载荷幅值增大上升趋势明显,钻速增加超过 0.4 m/h。

3.3 动载荷占比对钻进效率的影响

保持钻头 A2、M1 轴向最大总载荷 1900 N,保持 M2 轴向最大总载荷 3800 N,动载荷频率 10 Hz 不变,改变动载荷幅值 B ,即动载荷在总载荷中的占比,研究动载荷占比对钻速的影响。载荷曲线见 3(c),PDC 钻头在不同动载荷占比下的钻进效率对比见图 9。



(a) 钻头A2、M1($A+B=1900\text{N}$, $f=10\text{Hz}$)



(b) 钻头M2($A+B=3800\text{N}$, $f=10\text{Hz}$)

图9 钻头A2、M1、M2不同动载荷占比下的平均钻速

Fig.9 Average ROP of PDC bits A2, M1 and M2 under different dynamic load proportions

由图9可知,轴向最大总载荷一定的情况下,动载荷以正弦波的形式加载时,整体趋势上3种钻头的平均钻速均随着动载荷占比的增大而降低,钻头A2、M1、M2的钻速分别最大降低37.3%、23.4%和38.9%。由图3(c)可知,若图中红线代表破碎岩石所需特定载荷,随着动载荷占比的增加,载荷曲线的波谷越靠下,一个波动周期内载荷低于破碎岩石所需载荷的时间越长,即 $t_2 > t_1$ 。因此,在钻进过程

中,过大的动载荷并不利于提高钻进效率,反而会对钻进速率产生消极影响。

3.4 动载荷频率对钻进效率的影响

保持钻头 A2、M1 平均载荷 1600 N、动载荷幅值 100 N,保持 M2 平均载荷 3200 N、动载荷幅值 200 N 不变,改变动载荷频率 f ,研究在平均载荷和动载荷幅值相同时,不同动载荷频率对 PDC 钻头钻进天然大理石速度的影响。载荷曲线如图 3(d) 所示,PDC 钻头在动载荷相同、频率不同的情况下钻进天然大理石的钻进效率对比见图 10。

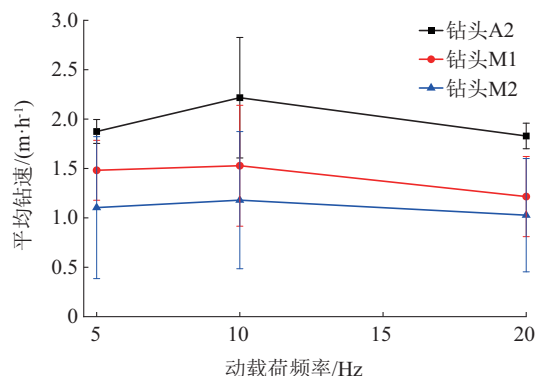


图10 钻头A2、M1、M2不同动载荷频率下的平均钻速

Fig.10 Average ROP of PDC bits A2, M1 and M2 under different dynamic load frequencies

由图10可知,钻头A2、M1、M2均在动载荷频率为10 Hz时平均钻速最大,继续增大动载荷频率到20 Hz,3个钻头的平均钻速反而下降。冲击频率低时,钻头每转的轴向冲击次数少,冲击对钻进效果影响不明显;冲击频率高时,岩石对振动的响应滞后,钻头切入深度不够,见图11。因此,对于未磨损或磨损齿PDC钻头,使用动载荷钻进时动载荷频率并不是越高越好,在应用轴向冲击时需时刻关注钻速,选择合适的冲击频率。

4 结论

通过对2个未磨损钻头,2个不同磨损程度的磨损齿PDC钻头进行静载荷和动载荷钻进实验,对4个PDC钻头切削性能进行研究,得到以下结论。

(1)使用静载荷钻进时,钻头的磨损程度对钻速的影响显著。频繁更换钻头会显著增加经济和时间成本,为了提高钻进效率,使用冲击回转钻进时还需注意选择合适的工艺参数,避免冲击损坏



图11 钻头切削岩石形成的切痕

Fig.11 The cutting marks formed by PDC bits cutting the rock

PDC钻头切削齿。在本实验的载荷参数下,4个钻头的切削齿均未出现明显的崩刃、脱落现象,因此对于施加轴向动载荷钻进,针对不同磨损程度的PDC钻头选择合适的动载荷参数十分重要,否则易造成钻头和井下钻具损伤。

(2)3个动载荷参数(幅值、占比、频率)对于钻进效率的影响程度不同,并且受钻头磨损状态的影响。动载荷幅值对未磨损齿和磨损齿PDC钻头钻进效率的影响有限;保持轴向最大总载荷不变,随着动载荷占比增加,由于一个冲击周期内有效破碎岩石的载荷持续时间减小,因此完好齿和磨损齿PDC钻头的钻速均呈下降趋势;3个钻头均在动载荷频率 $f=10\text{ Hz}$ 时有较高的平均钻速,冲击频率过高且岩石响应不及时,钻头切深减小。因此在钻井现场,针对不同种类岩石,需仔细考虑动载荷占比和频率的参数设定。

(3)提高PDC钻头在深井、超深井的钻进效率是目前面临的关键问题之一,现有研究表明,使用冲击回转钻进可有效提高PDC钻头在硬地层的钻进效率。建议对微钻实验台进一步智能改装,以便于测量PDC钻头动载荷钻进时与岩石之间的振动响应,更深入地认识PDC钻头与岩石之间的作用机理。

参考文献(References):

- [1] 刘维,高德利.PDC钻头研究现状与发展趋势[J].前瞻科技, 2023,2(2):168-178.
LIU Wei, GAO Deli. Research status and development trends of polycrystalline diamond compact bits[J]. Science and Technology Foresight, 2023,2(2):168-178.
- [2] 郭鲁.钻井技术和创新的现状与未来[J].中国石油和化工标准

- 与质量,2025,45(2):166-168.
GUO Lu. Status and future of drilling technology and innovation [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2025,45(2):166-168.
- [3] 王佳,董洪铎.石油钻井用液动冲击器研究现状及发展趋势[J].石化技术,2019,26(1):216.
WANG Jia, DONG Hongduo. Research status and development trend of hydraulic impactor for oil drilling[J]. Petrochemical Industry Technology, 2019,26(1):216.
- [4] 汪海阁,黄洪春,毕文欣,等.深井超深井油气钻井技术进展与展望[J].天然气工业,2021,41(8):163-177.
WANG Haige, HUANG Hongchun, BI Wenxin, et al. Deep and ultra-deep oil/gas well drilling technologies: progress and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2021,41(8):163-177.
- [5] 李根生,穆总结,田守增,等.冲击破岩钻井提速技术研究现状与发展建议[J].新疆石油天然气,2024,20(1):1-12.
LI Gensheng, MU Zongjie, TIAN Shouceng, et al. Research status and development proposal of ROP improvement technology with percussion rock-breaking method [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2024,20(1):1-12.
- [6] 王健.国内深层页岩气钻井难点及技术进展[J].石油化工应用,2020,39(12):1-5,20.
WANG Jian. Difficulties and technical progress of deep shale gas drilling in China[J]. Petrochemical Industry Application, 2020, 39(12):1-5,20.
- [7] 张德龙,郭强,杨鹏,等.地热井花岗岩地层钻进提速技术研究与应用进展[J].地质与勘探,2022,58(5):1082-1090.
ZHANG Delong, GUO Qiang, YANG Peng, et al. Progress in research and application of drilling Speed-Up technology for granite formation in geothermal wells[J]. Geology and Exploration, 2022,58(5):1082-1090.
- [8] 张锦宏,周爱照,成海,等.中国石化石油工程技术新进展与展望[J].石油钻探技术,2023,51(4):149-158.
ZHANG Jinhong, ZHOU Aizhao, CHENG Hai, et al. New progress and prospects for Sinopec's petroleum engineering technologies [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51 (4) : 149-158.
- [9] 祝效华,刘伟吉.旋冲钻井技术的破岩及提速机理[J].石油学报,2018,39(2):216-222.
ZHU Xiaohua, LIU Weiji. Rock breaking and ROP rising mechanism of rotary-percussive drilling technology [J]. Acta Petrolei Sinica, 2018,39(2):216-222.
- [10] 刘伟,席岩,查春青,等.不同冲击钻井方式PDC切削齿侵彻深度及破岩机制研究[J].新疆石油天然气,2023,19(2):17-23.
LIU Wei, XI Yan, ZHA Chunqing, et al. Study on penetration depth and rock breaking mechanism of PDC cutter in different percussion drilling methods[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2023, 19(2):17-23.
- [11] 杨合,戚波,曹品鲁,等.FGQ-600型潜孔锤钻头冲击应力作用下强度可靠性分析[J].钻探工程,2023,50(1):115-124.
YANG He, QI Bo, CAO Pinlu, et al. Strength analysis of FGQ-600 type DTH hammer drill bit used for casing while drilling[J]. Drilling Engineering, 2023,50(1):115-124.
- [12] Huang J, Zeng B, He Y H, et al. Numerical study of

- rock-breaking mechanism in hard rock with full PDC bit model in compound impact drilling [J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 3896-3909.
- [13] Liu Z, Wu W R, Hao Q H, et al. Theoretical and experimental study of the effects of impact drilling parameters on the properties of surrounding rock damage [J]. *Shock and Vibration*, 2020, 2020(1): 8865619.
- [14] Liu S B, Ni H J, Jin Y, et al. Experimental study on drilling efficiency with compound axial and torsional impact load [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 219: 111060.
- [15] 闫炎, 管志川, 玄令超, 等. 复合冲击条件下PDC钻头破岩效率试验研究 [J]. *石油钻探技术*, 2017, 45(6): 24-30.
YAN Yan, GUAN Zhichuan, XUAN Lingchao, et al. Experimental study on rock breaking efficiency with a PDC bit under conditions of composite percussion [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(6): 24-30.
- [16] 闫炎, 韩礼红, 刘永红, 等. 全尺寸PDC钻头旋转冲击破岩过程数值模拟 [J]. *石油机械*, 2023, 51(6): 36-42.
YAN Yan, HAN Lihong, LIU Yonghong, et al. Numerical simulation of rotary impact rock-breaking process of a full-size drill bit [J]. *China Petroleum Machinery*, 2023, 51(6): 36-42.
- [17] 查春青, 柳贡慧, 李军, 等. 复合冲击钻具的研制及现场试验 [J]. *石油钻探技术*, 2017, 45(1): 57-61.
ZHA Chunqing, LIU Gonghui, LI Jun, et al. Development and field application of a compound percussive jet [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(1): 57-61.
- [18] 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, MU Xiaojun, LI Hanxing, et al. Development and application of rotary-percussive and oscillatory drilling tool [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2020, 27(3): 386-389.
- [19] 田雨, 张昕, 张鹏翔, 等. 冲击频率可调的钻井提速工具结构设计与试验 [J]. *石油机械*, 2024, 52(2): 36-43.
TIAN Yu, ZHANG Xin, ZHANG Pengxiang, et al. Structural design and test of ROP improving Tool with adjustable impact frequency [J]. *China Petroleum Machinery*, 2024, 52(2): 36-43.
- [20] 汤凤林, 赵荣欣, Нескоромных В.В., 等. 偏心冲击回转钻进工艺试验研究及其所用钻头的开发 [J]. *钻探工程*, 2024, 51(6): 14-23.
TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, NESKOROMNYH V.V., et al. Experimental research on drilling parameters of eccentric percussion rotary drilling and development of the drill bit used for [J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(6): 14-23.
- [21] Li Y, Zeng Y, Chen Z J, et al. Failure characteristics and service life prediction of polycrystalline diamond compact (PDC) cutter under cyclic impact loading [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 231(Part A): 212339.
- [22] Guo Y Z, Meng D Z, Cai Z B, et al. Dynamic response and damage behavior of impact wear for polycrystalline diamond compact under low kinetic energy impact [J]. *Carbon*, 2024, 226: 119166.
- [23] Li X B, Zhao F J, Summers D A, et al. Failure modes of PDC cutters under different loads [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2002, 12(3): 504-507.
- [24] 赵洪晨, 孟德忠, 徐良, 等. 潜孔锤钻头PDC球形切削齿失效分析 [J]. *钻探工程*, 2025, 52(3): 117-125.
ZHAO Hongchen, MENG Dezhong, XU Liang, et al. Failure analysis of PDC spherical cutter for DTH hammer bits [J]. *Drilling Engineering*, 2025, 52(3): 117-125.
- [25] 朱光辉, 况雨春, 林伟. PDC磨损齿切削载荷与生热规律研究 [J]. *石油机械*, 2021, 49(5): 68-73.
ZHU Guanghui, KUANG Yuchun, LIN Wei. Research on cutting load and heat generation law of PDC wearing cutter [J]. *China Petroleum Machinery*, 2021, 49(5): 68-73.
- [26] 张春亮, 王锦成, 柯晓华, 等. 磨损齿PDC钻头的切削性能试验 [J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2023, 43(1): 35-42.
ZHANG Chunliang, WANG Jincheng, KE Xiaohua, et al. Experimental study on working mechanics of PDC bit with worn teeth [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2023, 43(1): 35-42.
- [27] 杨迎新, 谢松, 蔡灿, 等. PDC磨损齿切削破岩过程的实验研究 [J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(1): 180-188.
YANG Yingxin, XIE Song, CAI Can, et al. A study on the mechanism and heat Generation law of PDC wear tooth cutting [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2023, 45(1): 180-188.
- [28] 蔡茂盛, 王红波, 张春江, 等. PDC磨损齿切削破岩数值模拟研究 [J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2024, 44(6): 789-797.
CAI Maosheng, WANG Hongbo, ZHANG Chunjiang, et al. Study on numerical simulation of rock breaking by PDC wear teeth cutting [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2024, 44(6): 789-797.
- [29] Cai C, Zhang P, Xie S, et al. Rock breakage and temperature variation of naturally worn PDC tooth during cutting of hard rock and soft rock [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 229: 212042.
- [30] Zhang C L, Wang J C, Ke X H, et al. Rock-breaking performance analysis of worn polycrystalline diamond compact bit [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 221: 211352.
- [31] Liu W J, Deng H X, Liu Y M, et al. Experimental investigation of the rock cutting process with blunt PDC cutters [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 226: 211803.
- [32] Ye H Y, Yu H Y, He S Y, et al. Innovation and application of cluster edge buttons of DTH hammer drill bit in large-diameter geothermal well with high-strength rock [J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(23): 11184.
- [33] 张绍和, 谢晓红, 方海江, 等. PDC钻头出露量和线速度对复合片磨损规律的影响 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2010, 41(6): 2173-2177.
ZHANG Shaohe, XIE Xiaohong, FANG Haijiang, et al. PDC abrasion rule affected by height of protrusion and linear velocity [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2010, 41(6): 2173-2177.
- [34] 曲冠政, 曲大伟, 郭瑞, 等. PDC钻头复合片磨损速度模型研究 [J]. *复杂油气藏*, 2013, 6(1): 62-64, 71.
QU Guanzheng, QU Dawei, GUO Rui, et al. Study on a wear rate model of PDC composite cutters [J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2013, 6(1): 62-64, 71.
- [35] 田家林, 付传红, 杨琳, 等. 基于扭转振动的PDC钻头布齿角

- 度对复合片磨损规律的影响研究[J]. 固体力学学报, 2014, 35(6): 574-582.
- TIAN Jialin, FU Chuanhong, YANG Lin, et al. Influence of the tooth-distributing angle of pdc bit on wear of composite plate under torsion vibration[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2014, 35(6): 574-582.
- [36] 郭家, 韩雪银, 张宝平, 等. 基于钻进扭矩小波特征规律的PDC钻头磨损程度的分析研究[J]. 石油工业技术监督, 2022, 38(7): 34-38.
- GUO Jia, HAN Xueyin, ZHANG Baoping, et al. Analysis and research on wear of PDC bit based on wavelet characteristics of drilling torque[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2022, 38(7): 34-38.
- [37] 钟尹明, 柯迪丽娅·帕力哈提, 白佳帅, 等. 基于GRU神经网络的PDC钻头磨损实时监测模型[J]. 新疆石油天然气, 2024, 20(2): 21-28.
- ZHONG Yiming, PALIHATI K, BAI Jiashuai, et al. Real-time monitoring model of PDC bit wear based on GRU neural network[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2024, 20(2): 21-28.
- [38] Ma Y C, You M H, Zhang W L, et al. Research on dynamic wear law of polycrystalline diamond compact (PDC) single cutter under thermal-mechanical coupling[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2025, 247: 213673.
- [39] 任雷, 祁任泽, 何胜煜, 等. 圆柱形PDC切削齿磨损对钻井工艺规程的影响[J]. 石油矿场机械, 2024, 53(5): 1-5.
- REN Lei, QI Renze, HE Shengyu, et al. Effect of wear of cylindrical PDC cutting teeth on drilling process[J]. Oil Field Equipment, 2024, 53(5): 1-5.
- [40] 祁任泽, 任雷, 卜长根. PDC钻头V形齿的磨损对岩石接触面积的影响[J]. 钻探工程, 2025, 52(3): 103-109.
- QI Renze, REN Lei, BU Changgen. Influence of wear on rock contact area of V-shaped cutter PDC bit[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(3): 103-109.
- [41] 闫海. 冲击回转伺服给进系统与钎焊金刚石钻头试验研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- YAN Hai. Experimental study on impact rotary servo feeding system and brazed diamond bit[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.

(编辑 王跃伟)