

12-13-2019

Numerical Simulation of Rock Breaking Mechanism for Compound Percussion Drilling

Yumei Li

1. *Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100101, China; ;*

Liwei Yu

2. *Engineering Research Institute of Petro China Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, China;*

Zhang Tao

1. *Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100101, China; ;*

Su Zhong

1. *Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100101, China; ;*

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Numerical Simulation of Rock Breaking Mechanism for Compound Percussion Drilling

Abstract

Abstract: *The ABAQUS dynamic impact module is used to establish the numerical calculation model for PDC single tooth-rock impact. The effects of PDC cutting teeth on the dynamic rock breaking mode and rock breaking effect under the combined action of rotating speed, drilling pressure, alternating impact torque and alternating impact force are studied. The study shows that the torsional impact mode is 39.28% higher than the rock breaking efficiency of the rotary impact, and the compound percussion mode is 27.79% higher than the rock breaking efficiency of the torsional impact. Under the same conditions of impact time, the rock surface shear force is $S_{\text{composite}} > S_{\text{torque}} > S_{\text{swirl}}$. The characteristic curve of the composite impact intrusion into the rock depth has a step-like characteristic. The study of the mechanism of the compound percussion drilling technology for rock breaking has laid a theoretical foundation for further development and optimization of the tools.*

Keywords

heterogeneity formation, compound percussion, rock breaking mechanism, PDC(Polycrystalline Diamond Compact bit), impact frequency

Authors

Yumei Li, Liwei Yu, Zhang Tao, Su Zhong, and Jianming Liu

Recommended Citation

Li Yumei, Yu Liwei, Zhang Tao, Su Zhong, Liu Jianming. Numerical Simulation of Rock Breaking Mechanism for Compound Percussion Drilling[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(11): 2471-2476.

复合冲击钻井立体破岩特性模拟研究

李玉梅¹, 于丽维², 张涛¹, 苏中¹, 刘建明¹

(1. 北京信息科技大学高动态导航技术北京市重点实验室, 北京 100101; 2. 新疆油田公司工程技术研究院, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要: 利用 ABAQUS 动力学冲击模块建立 PDC 单齿-岩石冲击作用数值计算模型, 研究切削齿在受转速、钻压、交变冲击扭矩、交变冲击力等多载荷耦合作用下的复合冲击动态破岩方式及破岩效果。研究发现: 扭转冲击比旋转冲击的破岩效率提高 39.28%, 复合冲击比扭转冲击破岩效率提高 27.79%; 冲击作用时间相同, 岩石表面剪切作用力 $S_{复合} > S_{扭矩} > S_{旋转}$; 复合冲击侵入岩石深度的特征曲线具有阶跃式的特征。复合冲击钻井破岩机理的研究为工具的进一步优化奠定了理论基础。

关键词: 复杂地层; 复合冲击; 破岩机理; PDC(Polycrystalline Diamond Compact bit); 冲击频率

中图分类号: TE31 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 11-2471-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-FZ0318

Numerical Simulation of Rock Breaking Mechanism for Compound Percussion Drilling

Li Yumei¹, Yu Liwei², Zhang Tao¹, Su Zhong¹, Liu Jianming¹

(1. Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100101, China; 2. Engineering Research Institute of Petro China Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, China)

Abstract: The ABAQUS dynamic impact module is used to establish the numerical calculation model for PDC single tooth-rock impact. The effects of PDC cutting teeth on the dynamic rock breaking mode and rock breaking effect under the combined action of rotating speed, drilling pressure, alternating impact torque and alternating impact force are studied. The study shows that the torsional impact mode is 39.28% higher than the rock breaking efficiency of the rotary impact, and the compound percussion mode is 27.79% higher than the rock breaking efficiency of the torsional impact. Under the same conditions of impact time, the rock surface shear force is $S_{composite} > S_{torque} > S_{swirl}$. The characteristic curve of the composite impact intrusion into the rock depth has a step-like characteristic. The study of the mechanism of the compound percussion drilling technology for rock breaking has laid a theoretical foundation for further development and optimization of the tools.

Keywords: heterogeneity formation; compound percussion; rock breaking mechanism; PDC(Polycrystalline Diamond Compact bit); impact frequency

引言

随钻测量数据表明, 粘滑振动会导致钻进深

部复杂地层时出现剧烈的转速与扭矩波动。冲击破岩技术的提出可大幅度提高机械钻速、提高钻头寿命^[1-3]。

为了抑制粘滑振动, 许多学者们相继提出了一些钻井新技术并相应研制出新型破岩钻具, 如复合冲击破岩工具^[4]、扭力冲击工具^[5-6]、轴向冲击工具^[7-8]、超声波振动短节^[9]、振荡冲击器^[10-11]、脉冲



收稿日期: 2019-04-20 修回日期: 2019-07-14;
基金项目: 北京市属高校高水平教师队伍支持计划-青年拔尖人才培养计划项目(CIT&TCD201804057),
北京市教委一般项目(KM201811232011);
作者简介: 李玉梅(1981-), 女, 郓城, 博士, 助理研究员, 研究方向为油气井复杂工况数值模拟计算方法。

<http://www.china-simulation.com>

• 2471 •

式振动破岩工具^[12]等,并开展了大量的研究工作。目前,对于传统的轴向冲击破岩和扭力冲击破岩机理的研究较多,而破岩机理研究正处于起步阶段,且现有的研究成果极少。因此展开其研究对于丰富高效破岩技术具有重要意义。

本文利用 ABAQUS 动力学冲击模块计算平台建立 PDC 钻头单齿-岩石相互作用的有限元数值模型,研究了 PDC 切削齿在受钻压、转速、转盘扭矩、交变冲击扭矩、交变轴向冲击力等多个载荷的共同作用下的动态破岩过程和破岩效果。研究认为,有限元数值仿真模拟法的可重复性建模和动态模拟方法可为新型工具原理性研究和进一步开发和优化提供理论研究基础。

1 复合冲击钻井技术工作原理

与传统的冲击器一样,可将复合冲击短节安装在 PDC 钻头上端。工作过程中,主要依靠流体机械能控制各环节旋转阀开启和关闭,通过换向机构形成相互隔离的钻井液流道,最后在腔体内外形成压差,驱动冲击模块进行工作,最后转换成一定频率、扭向冲击联合轴向冲击的机械能。综合来讲,复合冲击钻井工具可将流体的液压能转换成扭向联合轴向的机械能,传递给钻头周期性的低幅高频冲击功,为钻头提供高效的破岩扭矩,大幅度抑制钻头的粘滑振动。

换向器初始档位在 A 位,钻井液进入并沿着红线指示方向流动,此时推动周向冲锤右摆。随着钻井液的推进,轴向冲锤下行,如图 1(a)所示;换向器初始档位在 B 位,钻井液进入并沿着黑线指示方向流动,周向冲锤左摆,随着钻井液的推进,换向器触发转变方向,带动轴向冲锤活塞向下运动,如图 1(b)所示。如此周而复始,完成一次扭向冲击联合轴向冲击运动行程,使 PDC 钻头接收来自复合冲击短节交替变化的周向冲击能量和轴向冲击能量,从而改变 PDC 钻头的运动方式^[4]。

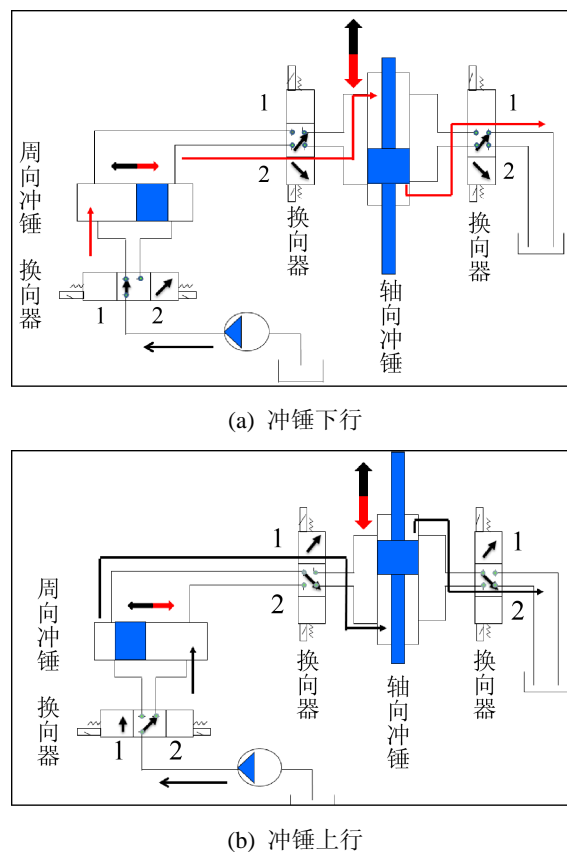


图 1 复合冲击钻具运动方式

Fig. 1 Movement of composite impact drill

2 数值模型

2.1 建立数值模型

利用 ABAQUS 显式动力学分析模块开展计算过程中,运算处理时间、工作量、网格精度及数量等均对计算机提出较高的要求。岩石模型尺寸为 $\phi 200 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 的圆柱体, PDC 切削齿倾角 20° , 直径 13.44 mm , 厚 8 mm 。将切削齿定义为离散刚体,并将其耦合在一个参考点上。对初始几何模型进行分区多次切割,以实现几何模型进行局部网格细化,图 2 所示为网格划分后的有限元模型。数值模型采用带沙漏控制的 8 节点缩减积分六面体网格单元 C3D8R,其中岩石体的网格数为 14 998 个, PDC 切削齿为 5 664 个。

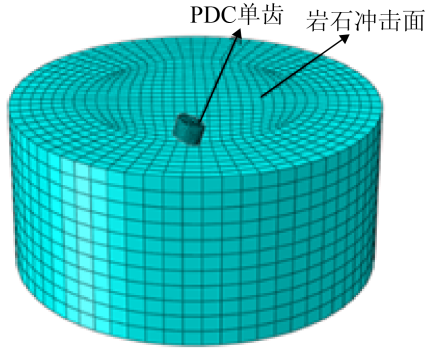


图 2 网格模型
Fig. 2 Mesh model

2.2 材料及边界条件

相对于建立的数值模型, 材料赋值前需要建立两种材料介质的局部坐标系, 包括 Rock-Section 和 PDC-Section。计算前对 PDC 牙齿和硬脆性岩石进行赋值, PDC 刀具材料: 弹性模量 600 GPa, 泊松比 0.08, 密度 $14\ 950\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 单轴抗拉强度 1 120 MPa, 单轴抗压强度 5 460 MPa, 屈服应力 686 MPa。致密坚硬砂岩地层参数: 弹性模量 4 300 MPa, 泊松比 0.15, 密度 $2\ 260\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 单轴抗拉强度 3.87 MPa, 单轴抗压强度 105.62 MPa, 屈服应力 72.3 MPa, 粘聚力 26.13 MPa, 内摩擦角 32.95° 。

边界以及载荷独立于网格划分, 该计算模型载荷边界条件较为复杂, 约束切削齿单元在 X 和 Y 轴的位移和扭矩, 定义切削齿单元在 Z 轴的位移和扭矩, 钻头切削齿的旋转方向为沿轴向逆时针方向, 设置岩石模型底面全约束以及圆周坐标系 3 个方向的自由度均为 0。定义岩石 Elements 集合, 再将初始三相地应力参数赋予这个单元集合。利用预应力场 Predefined Field-1 模块为定义好的 Rock-Elements 赋值三向地应力, $\sigma_1=40\ \text{MPa}$, $\sigma_H=29\ \text{MPa}$, $\sigma_h=24\ \text{MPa}$ 。

将 PDC 切削齿的前端面和圆柱面设为接触面, 岩石体设为接触目标体, 接触面之间设置摩擦系数。在动力学冲击仿真分析过程中的每一时步都需要对接触状态进行判断, 进而施加正确的接触条件。实际钻井过程中, 钻杆传递的扭矩直接作用于

钻头, 驱动钻头旋转切削破岩。PDC 切削齿受钻压、转速、转盘扭矩、交变冲击扭矩、交变轴向冲击力等多个载荷的共同耦合作用, 井底岩石受到钻压、交变冲击载荷和交变扭矩的共同作用, 图 3 所示为 PDC 切削齿载荷情况示意图。PDC 单齿沿 Z 轴方向的钻压为 10 KN, 转盘转速为 70 RPM, 转盘扭矩 6 000 N·m, 冲击扭矩 1 570 N·m, 冲击动载荷的峰值为 1 000 N, 轴向及扭向冲击动载荷频率为 10~50 Hz。

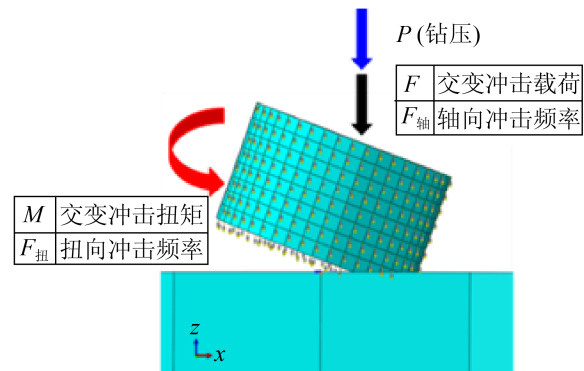


图 3 PDC 单齿边界及载荷示意图
Fig. 3 Boundary and load diagram of PDC tooth

3 模拟结果分析

3.1 破岩冲击方式对比

基于理论分析, 取岩石表面一个冲击受力单元为参考点, 开展轴向冲击方式、扭力冲击方式、复合冲击方式对破岩效果影响规律的试验研究。当轴向冲击和扭力冲击交变频率从 10~40 Hz 变化时, 通过大量数值计算对两种冲击方式作用效果进行对比分析。研究发现: 随着轴向冲击频率的逐渐增加, 岩石表面的剪切力逐渐增大, 当轴向冲击频率 $f=26\ \text{Hz}$ 时, 岩石表面的剪切力出现临界值, 最后当轴向冲击频率 $f>32\ \text{Hz}$ 时达到稳定值, 如图 4 所示为轴向冲击频率对岩石剪切破坏的影响规律曲线图; 随着扭力冲击频率的逐渐增加, 岩石表面的剪切力逐渐增大, 当扭力冲击频率 $f=34\ \text{Hz}$ 时, 岩石表面的剪切力出现临界值, 当扭力冲击频率 $f>34\ \text{Hz}$ 时, 岩石表面的剪切力逐渐减小, 说明当扭力冲击频率达到 34 Hz 时, 岩石表面受 PDC 牙齿的冲击切

削力足够大，容易破碎，如图 5 所示为扭力冲击频率对岩石剪切破坏的影响规律曲线图。

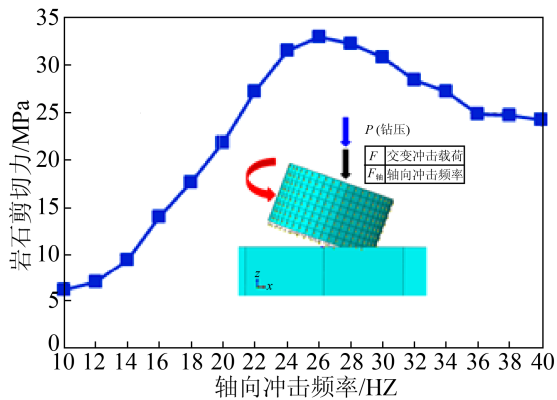


图 4 轴向冲击频率对岩石剪切破坏的影响规律

Fig. 4 Effect of axial impact frequency on rock shear failure

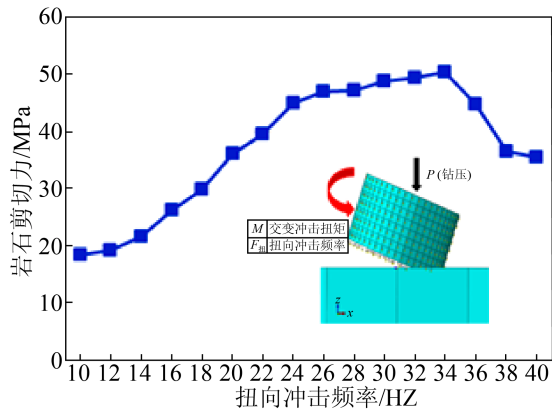
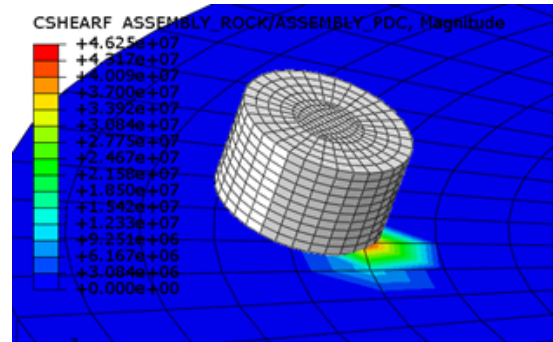


图 5 扭向冲击频率对岩石剪切破坏的影响规律

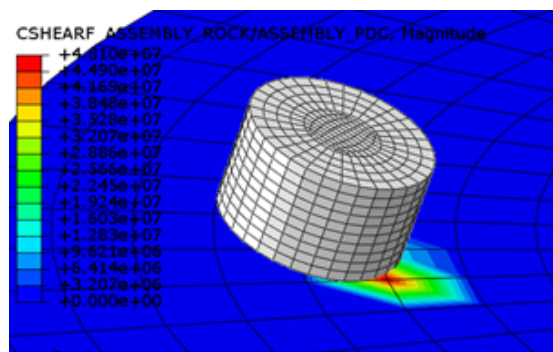
Fig. 5 Effect of torsional impact frequency on rock shear failure

在复合冲击器工作过程中，通过其过流面积的变化来控制工具产生的交变载荷的冲击频率。冲击频率是影响冲击破岩效率的重要因素，岩石在不同频率的交变载荷的作用下，其破岩效率也不尽相同。基于理论分析，开展冲击频率对破岩效果影响规律的试验研究。取岩石表面一个冲击受力单元为参考点，研究岩石在复合冲击动静组合载荷作用下的破碎过程。作用时间分别为 0.01 s, 0.02 s, 0.03 s, 0.04 s 时对应的岩石表面切削力如图 6 所示。保持其他条件不变，以岩石表面冲击点所受剪切应力为参考值，分别对复合冲击器交变载荷在 18 Hz, 22 Hz, 26 Hz, 30 Hz 时的破岩过程进行模拟，得到复合冲

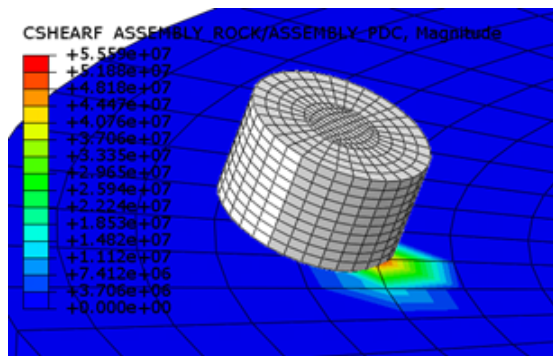
击下岩石表面剪切力分布计算结果，如图 7 所示。



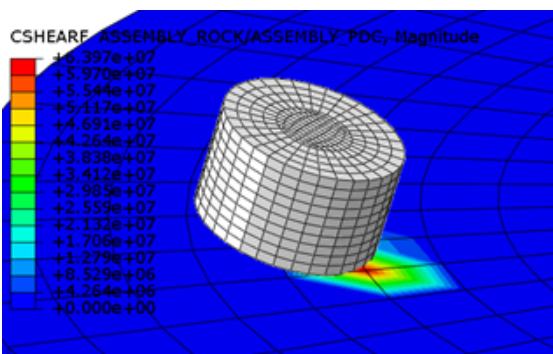
(a) 0.01 s



(b) 0.02 s



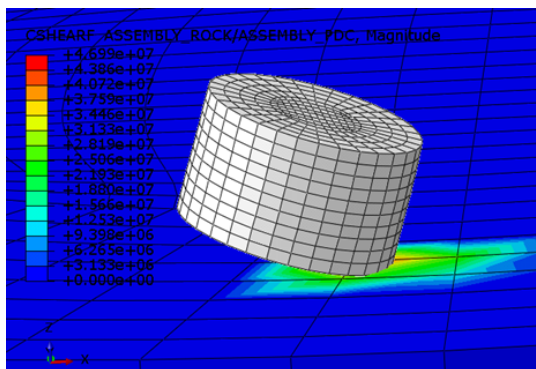
(c) 0.03 s



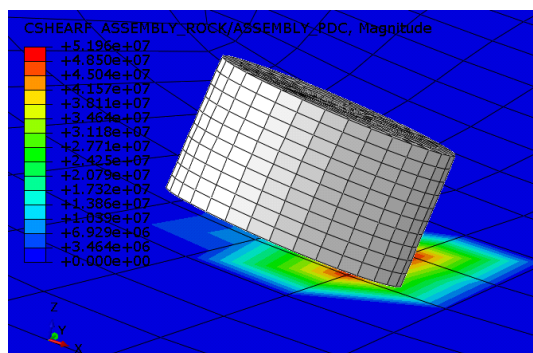
(d) 0.04 s

图 6 岩石在复合冲击作用下的破碎过程

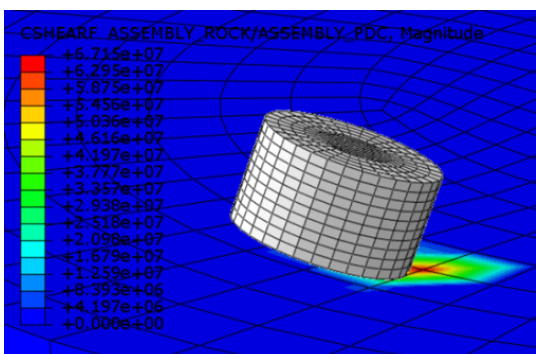
Fig. 6 Crushing process of rock under compound impact



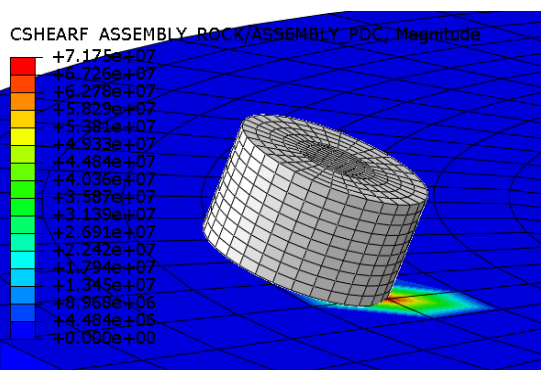
(a) 18 Hz



(b) 22 Hz



(c) 26 Hz



(d) 30 Hz

图 7 复合冲击钻井下岩石表面的剪切力
Fig. 7 Shear force on rock surface under composite impact drilling

在同样的边界条件下进行比较分析, 在轴向冲击、扭转冲击、复合冲击频率均为 22 Hz 时, 旋转冲击破岩方式下岩石表面剪切作用力为 22.78 MPa, 扭转冲击破岩方式下岩石表面所受剪切力载荷为 37.52 MPa, 复合冲击破岩方式下岩石表面所受剪切力载荷为 51.96 MPa。研究表明: 冲击频率相同, 扭转冲击破岩石方式比旋转冲击破岩可实现冲击破碎的概率提高了 39.28%, 复合冲击破岩方式比扭转冲击破岩石方式可实现冲击破碎的概率提高了 27.79%, 所以说, 复合冲击破岩效率要大于扭转钻井破岩效率。冲击作用时间相同条件下, 岩石表面剪切作用力 $S_{复合} > S_{扭力} > S_{旋转}$ 。

3.2 复合冲击岩石作用效果

复合冲击破岩钻头侵入岩石深度结果见图 8 所示。在 0.025 s 之前, 由于钻头的冲击作用在岩石表面产生的主应力并没有达到岩石的破碎强度, 在这初始冲击阶段钻头并没有侵入岩石; 在 0.025~0.035 s 之间, 岩石冲击面受到复合冲击短周期性的、交替的冲击能量, 岩石表面及浅层产生交变应力疲劳, 此时牙齿迅速侵入岩石 3.35 mm 深度, 产生大规模破碎; 在 0.035 s 之后, 钻头冲击破岩深度基本呈现平稳的趋势。

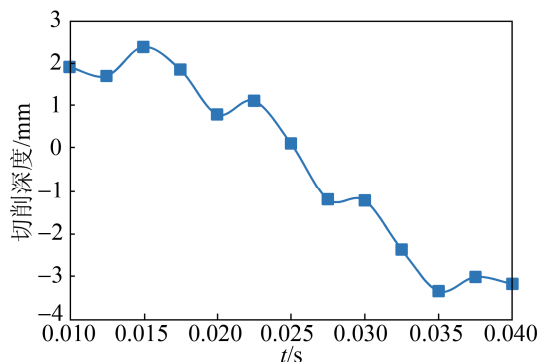


图 8 钻头侵入岩石深度
Fig. 8 Bit intrusion into the rock depth

在复合冲击钻具冲击破岩侵入岩石过程中, 侵入岩石深度曲线体现了阶跃的特征, 因此, 复合冲击钻具的复合冲击(轴向冲击和扭向冲击)作用是钻头侵入岩石的主要动力。

4 结论

1) 针对复合冲击钻具, 首次提出复合冲击钻井“立体破岩”方式的新型技术理念。技术工作原理及破岩机理研究。

2) 冲击频率相同, 扭转冲击破岩石方式比旋转冲击破岩可实现冲击破碎的概率提高了 39.28%, 复合冲击破岩方式比扭转冲击破岩石方式可实现冲击破碎的概率提高了 27.79%, 冲击作用时间相同条件下, 岩石表面剪切作用力 $S_{复合} > S_{扭力} > S_{旋冲}$ 。

3) 复合冲击作用是钻头侵入岩石的主要动力。复合冲击侵入岩石深度的特征曲线具有阶跃式的特征。

参考文献:

- [1] 李玮, 闫铁, 张志超, 等. 高频振动钻具冲击下岩石响应机理及破岩试验分析[J]. 石油钻探技术, 2013(6): 25-28.
Li Wei, Yan Tie, Zhang Zhichao, et al. Rock response mechanism and rock breaking test analysis for impact of high frequency vibratory drilling tool[J]. Oil Drilling Technology, 2013(6): 25-28.
- [2] 景英华, 袁鑫伟, 姜磊, 等. 高速旋转冲击钻井破岩数值模拟及现场实验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(1): 75-80.
Jing Yinghua, Yuan Xinwei, Jiang lei, et al. Numerical simulation and field experiment study on rock breaking in high speed rotating percussion drilling[J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2019, 43(1): 75-80.
- [3] 李思琪, 李玮, 闫铁, 等. 复合载荷作用下钻头冲击破岩机理研究及现场应用[J]. 振动与冲击, 2017, 36(16): 51-55.
Li Siqi, Li Wei, Yan Tie, et al. A study on the rock breaking mechanism of drill bits under combined loads and field applications[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(16): 51-55.
- [4] 柳贡慧, 李玉梅, 李军, 等. 复合冲击破岩钻井新技术[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(5): 10-15.
Liu Gonghui, Li Yumei, Li Jun, et al. New technology with composite Percussion Dilling and rock breaking[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(5): 10-15.
- [5] 付传红, 陈志强, 贺勇, 等. 新型扭振冲击工具的结构设计与工作特性分析[J]. 石油机械, 2017, 45(11): 7-11.
Fu Chuanhong, Chen Zhiqiang, He Yong, et al. Structural Design and Performance Analysis of Novel Torsional Impact Tool[J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(11): 7-11.
- [6] 穆总结, 李根生, 黄中伟, 等. 轴扭耦合冲击钻井技术研究[J]. 石油机械, 2018, 46(10): 12-17.
Mu Zongjie, Li Gensheng, Huang Zhongwei, et al. Research on Axial-torsional Coupling Percussion Drilling Technology [J]. China Petroleum Machinery, 2018, 46(10): 12-17.
- [7] 王德余, 李根生, 史怀忠, 等. 高效破岩新方法进展与应用[J]. 石油机械, 2012, 40(6): 1-6.
Wang Deyu, Li Gensheng, Shi Huaizhong, et al. Progress and application of new methods for efficient rock breaking [J]. China Petroleum Machinery, 2012, 40(6): 1-6.
- [8] 张林强, 赵俊, 王鹏, 等. 三维振动冲击器钻井提速工具研制与现场试验[J]. 石油机械, 2017, 45(5): 61-65.
Zhang Linqiang, Zhao jun, Wang Peng, et al. Development and field test of 3D vibration impactor[J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(5): 61-65.
- [9] 黄家根, 汪海阁, 纪国栋, 等. 超声波高频旋转冲击钻井破岩机理研究[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(4): 23-29.
Huang Jiagen, Wang Haige, Ji Guodong, et al. The rock breaking mechanism of ultrasonic high frequency rotary-percussive drilling technology[J]. Petroleum Drilling Technique, 2018, 46(4): 23-29.
- [10] 董学成, 熊继有, 王国华, 等. 振荡冲击器破岩机理数值模拟分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2014, 36(6): 160-167.
Dong Xuecheng, Xiong Jiyou, Wang Guohua, et al. Numerical Simulation Analysis of Rock Breaking Mechanism for Oscillating Impacter[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Editon), 2014, 36(6): 160-167.
- [11] 贾红军, 王攀, 冯伟雄, 等. 深井硬岩地层钻井高频低幅扭转振荡耦合冲击器研制与应用[J]. 特种油气藏, 2018, 25(4): 158-163.
Jia Hongjun, Wang Pan, Feng Weixiong, et al. Development and application of high-frequency low-torque impactor with torsion-oscillation coupling for drilling deep and hard formations [J]. Special Oil & Gas Reservoir, 2018, 25(4): 158-163.
- [12] 李玮, 李兵, 李卓伦, 等. 脉冲式振动破岩工具设计及模拟分析[J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(9): 56-61.
Li Wei, Li Bing, Li Zhuolun, et al. Impulse Type Vibratory Rock Breaking Tool Design and Simulation Analysis[J]. Coal Geology of China, 2018, 30(9): 56-61.