



中国科学引文数据库 (CSCD) 来源期刊
全国中文核心期刊
美国《化学文摘》(CA) 收录期刊
俄罗斯《文摘杂志》(AJ) 收录期刊
EBSCO学术数据库收录期刊 (美)
AAPG协会期刊出版平台收录期刊 (美)
中国科技论文统计源期刊
RCCSE中国核心学术期刊

锥形齿旋冲及扭冲的破岩过程与破岩效率分析

胡思成 管志川 路保平 梁德阳 呼怀刚 闫炎 陶兴华

Rock Breaking Process and Efficiency Analysis of Conical Cutting Teeth under Rotary and Torsional Impact

HU Sicheng, GUAN Zhichuan, LU Baoping, LIANG Deyang, HU Huaiyang, YAN Yan, TAO Xinghua

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021035>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[指向式旋转导向系统内外环转速对PDC钻头破岩效率的影响](#)

Influence of the Rotary Speeds of the Internal and External Rings of Pointed Rotary Steering System on the Rock-Breaking Efficiency of PDC Bit

石油钻探技术. 2019, 47(6): 27–33 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019096>

[复合冲击条件下PDC钻头破岩效率试验研究](#)

Experimental Study on Rock Breaking Efficiency with a PDC Bit under Conditions of Composite Percussion

石油钻探技术. 2017, 45(6): 24–30 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201706005>

[超声波高频旋冲钻井技术破岩机理研究](#)

The Rock Breaking Mechanism of Ultrasonic High Frequency Rotary–Percussive Drilling Technology

石油钻探技术. 2018, 46(4): 23–29 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018097>

[非平面PDC切削齿破岩有限元仿真及试验](#)

The Finite Element Simulation and Test of Rock Breaking by Non–Planar PDC Cutting Cutter

石油钻探技术. 2019, 47(5): 69–73 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019043>

[非均质地层锥形辅助切削齿PDC钻头设计与试验](#)

Design and Test of a New PDC Bit with Tapered Auxiliary Cutter for Heterogeneous Formations

石油钻探技术. 2018, 46(2): 58–62 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018046>

[高温高压对微波破岩效果的影响模拟研究](#)

Simulation Study on the Influences of HTHP on the Results of Microwave Rock Breaking

石油钻探技术. 2019, 47(2): 50–55 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019020>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.2021035

引用格式: 胡思成, 管志川, 路保平, 等. 锥形齿旋冲及扭冲的破岩过程与破岩效率分析 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(3): 87-93.

HU Sicheng, GUAN Zhichuan, LU Baoping, et al. Rock breaking process and efficiency analysis of conical cutting teeth under rotary and torsional impact [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(3): 87-93.

锥形齿旋冲及扭冲的破岩过程与破岩效率分析

胡思成¹, 管志川^{1,2}, 路保平³, 梁德阳¹, 呼怀刚^{1,2}, 闫 炎¹, 陶兴华³

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 山东省深地钻井过程控制工程技术研究中心, 山东青岛 266580; 3. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 102206)

摘要: 为了解锥形齿在旋转冲击和扭转冲击载荷作用下的破岩过程和破岩效率, 采用数值模拟和试验数据验证的方法, 研究了 2 种破岩方式下不同冲击幅值和冲击频率对应的岩石内部应力变化、岩石损伤特征、岩石破碎体积和破碎深度/破岩比功。数值模拟分析结果表明, 锥形齿在旋转冲击和扭转冲击破岩过程中均表现为切削齿侵入岩石、岩石损伤贯通裂纹萌生、岩石损伤贯通裂纹扩展、裂缝贯通岩屑崩落 4 个阶段, 拉应力是引起岩石内部到表面贯通裂缝产生的主要原因, 压剪应力是岩石内部出现损伤和形成微裂纹的主要原因。随着冲击幅值和冲击频率增大, 旋转冲击和扭转冲击破岩方式下, 锥形齿破碎岩石的体积都会增大, 但当冲击幅值和冲击频率增加到一定值时, 岩石破碎体积的增加趋势趋于平缓; 锥形齿旋转冲击破岩方式下的最大破碎体积高于扭转冲击破岩方式。常规切削、旋转冲击和扭转冲击 3 种破岩方式下, 锥形齿常规切削的破岩比功最大, 不同冲击幅值和冲击频率条件下, 锥形齿扭转冲击破岩方式下的破岩比功普遍比旋转冲击破岩方式低。

关键词: 锥形齿; 旋转冲击; 扭转冲击; 破岩过程; 破岩效率; 破岩比功

中图分类号: TE921⁺.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2021)03-0087-07

Rock Breaking Process and Efficiency Analysis of Conical Cutting Teeth under Rotary and Torsional Impact

HU Sicheng¹, GUAN Zhichuan^{1,2}, LU Baoping³, LIANG Deyang¹, HU Huaiyang^{1,2}, YAN Yan¹, TAO Xinghua³

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(East China), Qingdao, Shandong, 266580, China; 2. Shandong Ultra-Deep Drilling Process Control Technology Research & Development Center, Qingdao, Shandong, 266580, China; 3. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 102206, China)

Abstract: In order to gain a better understanding of the rock-breaking process and efficiency of conical cutting teeth under rotary and torsional impact loads, numerical simulation and experimental data verification were conducted to study the rock's internal stress changes, damage characteristics, breaking volume, depth and rock breaking specific work by the two methods at different impact amplitudes and frequencies. The numerical simulation and analysis results showed that both the rock-breaking processes of conical cutters under rotary impact and torsional impact could be divided into four stages: cutter intruding into rock, damage through crack initiation, damage through crack propagation, and rock cuttings avalanche. The tensile stress is the main reason for the cracks from the inside to the surface of rock, and the internal damage and micro-cracks appear mainly due to compressive shear stress. With the increase of impact amplitude and impact frequency, the broken volume of rock will increase in both the two ways. When the impact amplitude and frequency are increased to certain values, the increase of rock-breaking volume tends to be mild, and the maximum rock-breaking volume under rotary impact is higher than that under torsional impact. Among the three rock breaking methods - conventional cutting, rotary impact and torsional impact - the rock breaking specific work of conventional cutting is the greatest, and the rock breaking specific work under the conditions of different impact amplitudes and frequency of torsional impact is generally lower than that of rotary impact.

Key words: conical cutter; rotary impact; torsional impact; rock breaking process; rock breaking efficiency; rock breaking specific work

收稿日期: 2020-07-23; 改回日期: 2021-03-18。

作者简介: 胡思成 (1994—), 男, 湖南沅江人, 2018 年毕业于重庆科技学院海洋油气工程专业, 在读硕士研究生, 主要从事油气井力学以及钻井提速研究。E-mail: 1521408260@qq.com。

通信作者: 管志川, guanzhch@upc.edu.cn。

基金项目: 国家科技重大专项“机械式旋转冲击钻井工具及小井眼复杂环境旋冲钻井工具研制”(编号: 2016ZX05021-003-002HZ) 资助。

深部硬地层机械钻速低一直是钻井工程领域的难题之一^[1-2]。旋转冲击钻井和扭转冲击钻井由于具有提高硬地层钻进效率、延长钻头使用寿命等优势而成为研究热点,但现场应用过程中仍存在提速工具性能不稳定,提速效果差异大等问题^[3]。为此,人们进行了大量的理论分析、数值模拟及试验研究,试图通过深入认识岩石的破碎机理和提速机理彻底解决该问题^[4-13]。但这些研究大多针对的是常规圆形切削齿或常规破岩方式,对锥形齿等非平面齿的旋转冲击切削与扭转冲击切削的研究较少。一方面,关于锥形齿的常规破岩机理尚未完成掌握;另一方面,锥形齿等非平面齿旋转冲击与扭转冲击破岩机理的试验研究基本未开展。为了进一步认识锥形齿旋转冲击和扭转冲击的破岩机理与提速机理,笔者基于有限元法建立了锥形齿旋转冲击破岩和扭转冲击破岩 2 种破岩方式的三维数值模拟模型,研究了横向冲击作用和纵向冲击作用下,锥形齿切削岩石过程中的岩石裂纹形成及扩展情况,岩屑形成、崩落以及应力状态变化规律,并采用破岩比功、岩石破碎体积、破碎深度 3 个指标评价锥形齿在不同破岩方式下的破岩效率,从而为钻头设计、冲击器和钻井参数优化提供理论依据。

1 锥形齿破岩模拟模型的建立与验证

1.1 锥形齿破岩模拟模型的建立

冲击钻井是在施加固定钻压破岩的同时,在钻头轴向或周向上施加一个具有一定幅值和频率的冲击力进行破岩钻进的钻井方式。在钻头轴向上施加周期性高频冲击力通常称为旋转冲击方式,在钻头周向上施加周期性高频冲击力称为扭转冲击方式。锥形齿冲击破岩的物理模拟模型如图 1 所示。笔者利用 ABAQUS 有限元软件,以线性 D-P 准则为屈服准则,在模型岩石的两侧和底部施加非反射边界。锥形齿的参数:直径 16.0 mm,高 21.0 mm,锥顶角 78°,锥顶半径 3.0 mm,后倾角 15°,切削深度 2.0 mm。采用花岗岩岩样,岩样参数:长度 40.0 mm,宽度 30.0 mm,高度 30.0 mm,密度 2.62 g/cm³,弹性模量 35.46 GPa,泊松比 0.28,内聚力 37.88 MPa,内摩擦角 53.18°,单轴抗压强度 164.2 MPa。采用 C3D8R 网格划分模型,加密单元长度 0.25 mm。

当数值模拟锥形齿常规切削时,对锥形齿施加 2 kN 的钻压,切削速度 1 m/s。

数值模拟锥形齿旋转冲击和扭转冲击破岩时,在常规切削的基础上对应施加单个或多个周期为



图 1 锥形齿破岩模拟模型

Fig. 1 Simulation model of rock breaking by conical cutters

2 ms 的旋转冲击幅值(冲击力与钻压的比)与扭转冲击幅值(最大冲击速度与切削速度的比)。岩石的损伤程度根据损伤值^[14-15]判别:损伤值越大,损坏越严重;当损伤值为 1 时,表明岩石被彻底破坏。

1.2 锥形齿破岩模拟模型的验证

按照文献[16]的试验原形,利用上文建立的数值模拟模型计算出锥形齿不同切削深度下的平均切削力,并对模拟计算结果与文献[16]的试验结果进行对比,结果见图 2 所示。

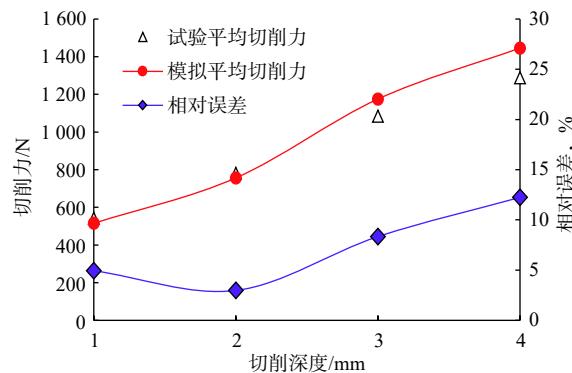


图 2 试验切削力与模拟切削力对比

Fig.2 Comparison of cutting force results by experimental and simulated methods

由图 2 可知,模拟计算出的平均切削力随切削深度的变化趋势与试验测试结果相同,模拟计算结果与试验结果的最小相对误差为 2.97%,最大相对误差为 12.24%,平均相对误差为 7.12%,在可接受范围内,表明模拟计算结果具有一定的可靠性。

2 锥形齿冲击破岩过程分析

2.1 锥形齿旋转冲击破岩过程

模拟计算了锥形齿旋转冲击破岩过程中,不同

时刻岩石内的最大主应力(拉正压负)、最大剪应力和岩石损伤,结果如图 3 所示。

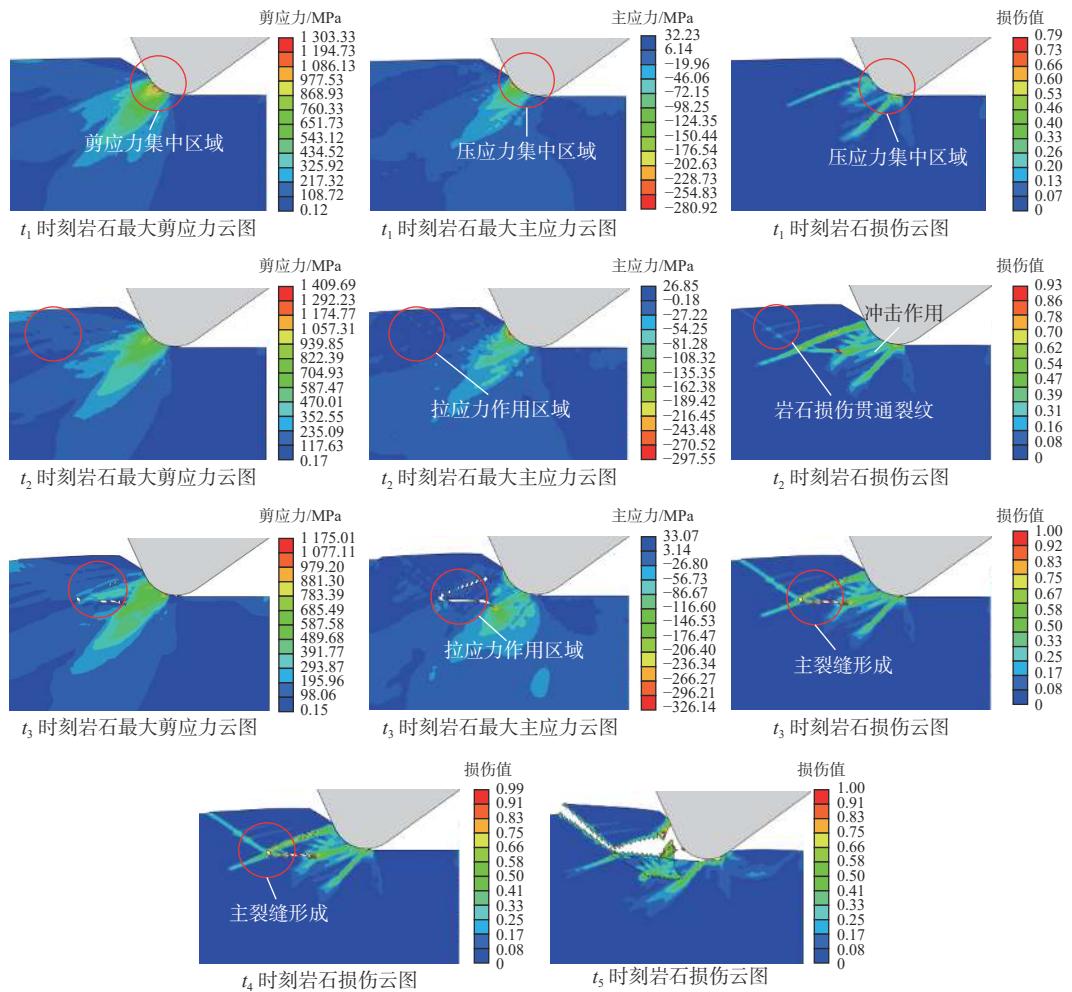


图 3 锥形齿旋转冲击切削破岩过程

Fig.3 Rock-breaking process of conical cutting teeth under rotary impact

1) 切削齿侵入岩石阶段($0-t_1$)。由 t_1 时刻的最大主应力、最大剪应力和岩石损伤云图可知,锥形齿吃入岩石,岩石与切削齿的接触点出现压应力集中,岩石损伤发生在剪应力与压应力作用区域。

2) 岩石损伤贯通裂纹萌生阶段(t_1-t_2)。由 t_2 时刻的最大主应力、最大剪应力和岩石损伤云图可知,随着切削齿吃入岩石,岩石损伤区域以接触点为中心向外辐射,在拉应力区出现了由岩石内部到自由面的损伤贯通裂纹。

3) 岩石损伤贯通裂纹扩展阶段(t_2-t_3)。由 t_3 时刻的损伤云图可看出,随着冲击载荷增大,岩石内部损伤裂纹的宽度和到自由面贯通裂纹的宽度不断扩大。

4) 裂缝贯通岩屑崩落阶段(t_3-t_4, t_5)。由 t_4 和 t_5 时刻的损伤云图可以看出,在冲击载荷产生的拉应力作用下,裂纹损伤区域扩大汇集形成主裂缝并延

根据模拟结果(见图 3),可以将岩石破碎过程划分为 4 个阶段:

伸至自由面,岩石发生体积破碎,岩屑崩落。

2.2 锥形齿扭转冲击破岩过程

模拟计算锥形齿扭转冲击破岩过程中,不同时刻的岩石损伤云图,结果见图 4。通过分析图 4 可以将扭转冲击破碎岩石的过程划分为切削齿侵入岩石(t_0-t_1)、岩石损伤贯通裂纹萌生(t_1-t_2)、岩石损伤贯通裂纹扩展(t_2-t_3)和裂缝贯通岩屑崩落(t_3-t_4, t_5)等 4 个阶段。拉应力是引起岩石内部到表面贯通裂隙产生的主要原因,压剪应力是岩石内部出现损伤和形成微裂纹的主要原因。

同时,图 5 给出了常规切削、旋转冲击和扭转冲击 3 种不同破岩方式下岩屑的形成情况,可以看出,旋转冲击和扭转冲击 2 种方式的岩石破碎体积和破碎坑深度均比常规切削大,其中旋转冲击比扭转冲击对岩石的损伤更严重。

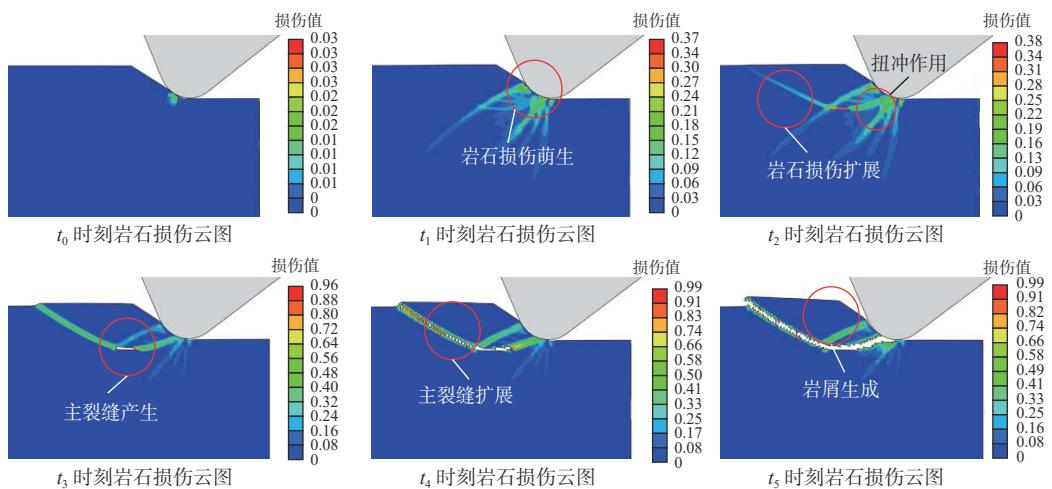


图 4 锥形齿扭转冲击破岩过程

Fig.4 Rock-breaking process of conical cutting teeth under torsional impact

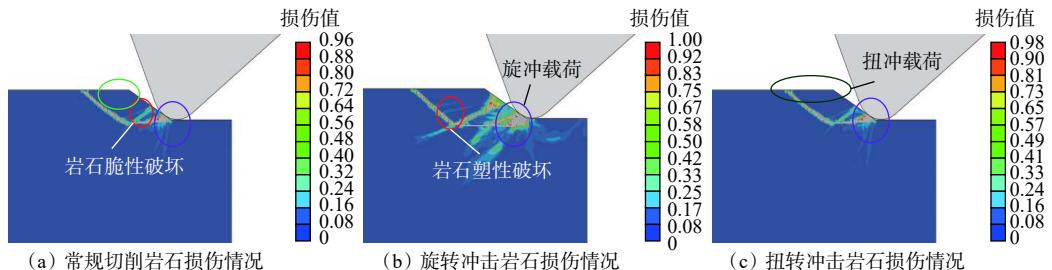


图 5 不同破岩方式下岩屑的形成情况

Fig.5 Formation of cuttings in different rock-breaking ways

3 锥形齿破岩效率分析

为了分析不同破岩方式和冲击参数对锥形齿冲击破岩效率的影响, 基于模拟计算结果, 分别采用破碎深度、破碎体积、破岩比功 3 个指标评价不同破岩方式下锥形齿的破岩效率。

3.1 岩石破碎深度与破碎体积

3.1.1 冲击幅值的影响

岩石破碎体积为模拟计算出的岩石失效单元(岩石损伤值为 1 的单元)数量与失效单元体积的乘积。在一定冲击频率下, 分析了冲击幅值对锥形齿旋转冲击和扭转冲击破岩方式下岩石破碎深度和破碎体积的影响, 结果分别如图 6、图 7 所示。

从图 6 和图 7 可以看出: 随着冲击幅值增大, 锥形齿旋转冲击和扭转冲击破岩方式下的岩石破碎体积均会增大, 但旋转冲击破岩方式下的破碎体积增加幅度比扭转冲击破岩方式大; 随冲击幅值增大, 旋转冲击破岩方式下的岩石破碎深度增深, 而扭转冲击破岩方式下的岩石破碎深度几乎不变。

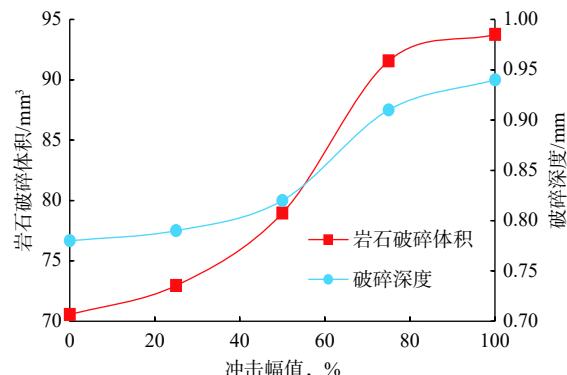


图 6 冲击幅值对旋转冲击破岩方式下岩石破碎体积和破碎深度的影响

Fig.6 Influence of amplitude on rock-breaking volume and depth under rotary impact

由图 6 可知: 对于旋转冲击破岩, 冲击幅值较小时(小于 25%), 冲击作用并未造成岩石大体积破碎, 破碎体积增加幅度较小; 冲击幅值较大时(25%~75%), 切削齿下部的岩石承受的应力达到岩石的强度极限, 随着冲击幅值增大, 破碎体积快速增长; 冲击幅值过大时(75%~100%), 冲击造成的岩石压实与裂隙发育已达到极限, 破碎体积逐

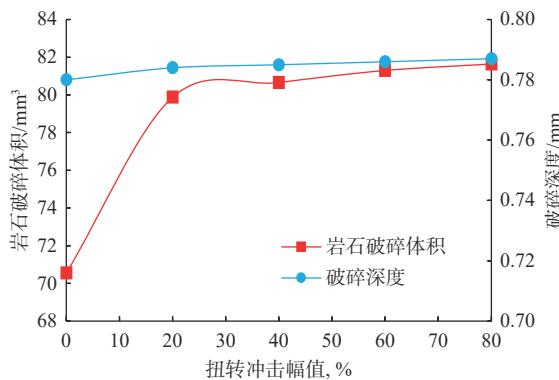


图7 扭转冲击幅值对扭转冲击破岩方式下岩石破碎体积和破碎深度的影响

Fig. 7 Influence of amplitude on rock-breaking volume and depth under torsional impact

渐趋于稳定。由图6还可得到: 旋转冲击破岩方式的最佳冲击幅值为75%; 与常规切削破岩方式(冲击幅值为0)相比, 旋转冲击破岩方式的岩石破碎体积提高了29.78%, 岩石破碎深度增加了16.67%。

从图7可以看出, 对于扭转冲击破岩, 扭转冲击幅值为0~20%时, 岩石破碎体积快速增大, 超过20%以后, 岩石破碎体积趋于稳定。单纯从提高破岩体积考虑, 不必过于追求提高扭转冲击幅值, 达到20%以上即可。与常规切削破岩方式(冲击幅值为0时)相比, 岩石破碎体积最多增加了13.22%, 岩石破碎深度只增加了0.513%。

3.1.2 冲击频率的影响

在一定冲击幅值(75%)下, 分析了冲击频率对锥形齿旋转冲击和扭转冲击破岩方式下岩石破碎体积和破碎深度的影响, 结果分别如图8、图9所示。

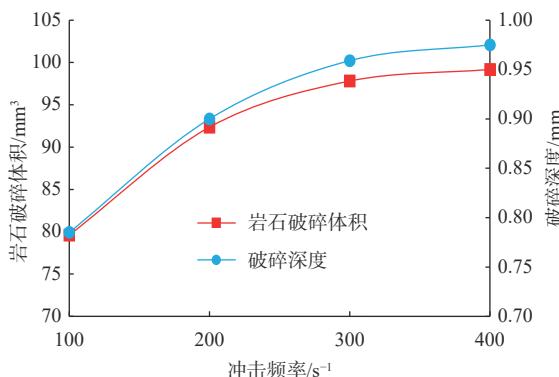


图8 冲击频率对旋转冲击破岩方式下岩石破碎体积和破碎深度的影响

Fig.8 Influence of frequency on rock-breaking volume and depth under rotary impact

从图8和图9可以看出: 随着冲击频率增大, 锥形齿旋转冲击与扭转冲击破岩方式下的岩石破碎体

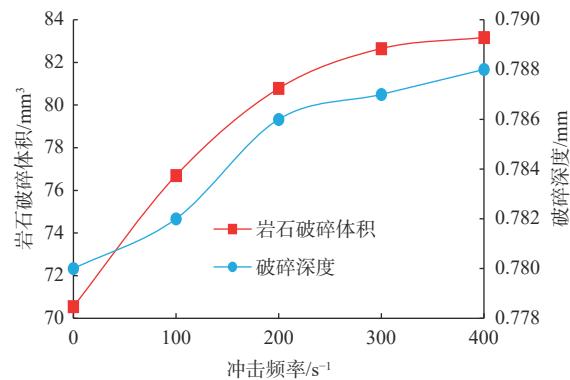


图9 冲击频率对扭转冲击破岩方式下岩石破碎体积和破碎深度的影响

Fig.9 Influence of frequency on rock-breaking volume and depth under torsional impact

积和破碎深度均增大; 当冲击频率达到400 s⁻¹时, 锥形齿2种破岩方式下的岩石破碎体积增加趋于平缓, 但总体上旋转冲击破岩方式下的增加幅度比扭转冲击破岩方式大。与常规切削破岩方式(冲击频率为0)相比, 锥形齿旋转冲击方式下的岩石破碎体积最多增加了38.64%, 岩石破碎深度增加了22.95%; 扭转冲击破岩方式的岩石破碎体积最多增加了14.5%, 岩石破碎深度增加了0.77%。

3.2 破岩比功

破岩比功为破碎单位体积岩石切削齿所做的功, 其越小, 破岩效率越高, 表达式为^[17-18]:

$$P = \frac{\mathbf{F} \mathbf{s}}{V} = \frac{\int_0^T f_x(f_x, f_y) v(v_x, v_x) dt}{V} = \frac{\int_0^T (f_x i + f_y j)(v_x i + v_x j) dt}{V} = \frac{\int_0^T (f_x v_x + f_y v_y) dt}{V} \quad (1)$$

式中: P 为切削齿的破岩比功, mJ/mm³; \mathbf{F} 为切削齿作用在岩石上的力, N; \mathbf{s} 为切削齿的切削位移, mm; V 为切削齿破碎岩石体积, mm³; f_x 为切削力, N; f_y 为轴向力, N; v_x 为切削速度, m/s; v_y 为轴向速度, m/s; T 为模拟时长, s。

f_x, f_y, v_x 和 v_y 均为以时间 t 为因变量的函数, 为简化函数表达式, 以各数据的平均值取代复杂的函数表达式, 最终表达式为:

$$P = \frac{\bar{f}_x \bar{v}_x + \bar{f}_y \bar{v}_y}{V} T \quad (2)$$

式中: \bar{f}_x 为平均切削力, N; \bar{f}_y 为平均轴向力, N; \bar{v}_x 为平均切削速度, m/s; \bar{v}_y 为平均轴向速度, m/s。

在冲击频率一定的情况下, 分析了冲击幅值对锥形齿旋转冲击和扭转冲击破岩方式下破岩比功的影响, 结果见图10。

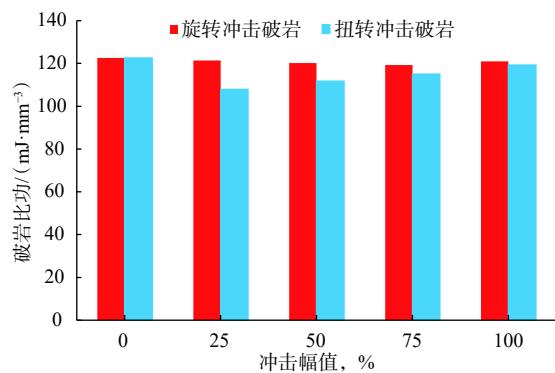


图 10 冲击幅值对不同破岩方式下破岩比功的影响

Fig.10 Influence of amplitude on rock breaking specific work by different rock-breaking methods

从图 10 可以看出：不同冲击幅值下锥形齿扭转冲击破岩方式下的破岩比功均低于旋转冲击破岩方式；冲击幅值为 75% 时，锥形齿旋转冲击破岩方式下的破岩比功最低，为 119.29 mJ/mm^3 ；冲击幅值为 25% 时，锥形齿扭转冲击破岩方式下的破岩比功最低，为 107.94 mJ/mm^3 。与上文不同冲击幅值下锥形齿岩石破碎体积和破碎深度分析结果结合可以得出，锥形齿旋转冲击破岩方式下的最佳冲击幅值应该等于或高于 75%，扭转冲击破岩方式下的最佳冲击幅值应该等于或高于 25%。

在冲击幅值一定情况下，分析了冲击频率对锥形齿旋转冲击和扭转冲击破岩方式下破岩比功的影响，结果如图 11 所示。

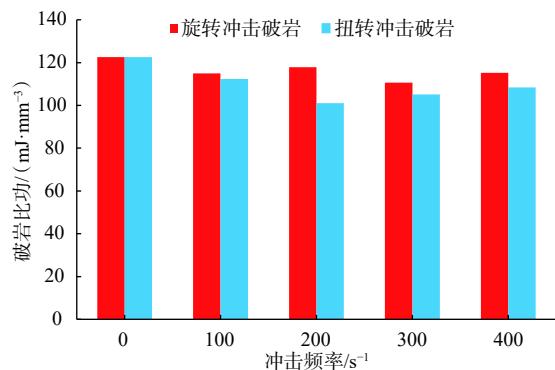


图 11 冲击频率对不同破岩方式下破岩比功的影响

Fig.11 Influence of frequency on rock breaking specific work by different rock-breaking methods

从图 11 可以看出，不同冲击频率下，锥形齿扭转冲击破岩方式下的破岩比功均低于旋转冲击破岩方式；冲击频率为 200 s^{-1} 时，锥形齿扭转冲击破岩方式下的破岩比功最低，为 101.04 mJ/mm^3 ；当冲击频率为 300 s^{-1} 时，锥形齿旋转冲击破岩方式的破岩比功最低，为 110.657 mJ/mm^3 。考虑到上文不同冲

击频率下锥形齿破岩体积和破岩深度的分析结果，锥形齿旋转冲击和扭转冲击破岩方式下的最佳冲击频率均应该大于等于 400 s^{-1} 。

4 结 论

1) 锥形齿旋转冲击和扭转冲击破岩过程均可划分为切削齿侵入岩石、岩石损伤贯通裂纹萌生、岩石损伤贯通裂纹扩展、裂缝贯通岩屑崩落 4 个阶段，拉应力控制从岩石内部到表面贯通裂缝的生成，压剪应力促进岩石内部微裂缝的形成。

2) 锥形齿旋转冲击和扭转冲击破岩方式下的岩石破碎体积都会随着冲击幅值和冲击频率增大而增大，但旋转冲击破岩方式下岩石破碎体积的增加幅度比扭转冲击破岩方式大。随着冲击频率增大，锥形齿旋转冲击和扭转冲击破岩方式下的岩石破碎深度都增加。在一定冲击频率下，只有旋转冲击破岩方式的破碎深度随冲击幅值增大而增加，扭转冲击破岩方式的破碎深度随冲击幅值增大几乎不变。

3) 旋转冲击和扭转冲击 2 种破岩方式下，当冲击幅值和冲击频率增加到一定值时，锥形齿的岩石破碎体积增大都趋于平缓。对于所研究的锥形齿破碎硬岩石，旋转冲击破岩方式的最佳冲击幅值不低于 75%，扭转冲击破岩方式的最佳冲击幅值不低于 20%，2 种破岩方式的最佳冲击频率为 400 s^{-1} 。

4) 常规切削、旋转冲击和扭转冲击 3 种破岩方式下，锥形齿常规切削的破岩比功最大；不同冲击幅值和冲击频率下，与旋转冲击破岩方式相比，锥形齿扭转冲击破岩方式下的破岩比功普遍较低。

参 考 文 献

References

- [1] 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, QIANG Lei, et al. Numerical simulation and field experimental study on rock breaking in high speed rotating percussion drilling[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(1): 75–80.
- [2] CHENG Zhen, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Analytical modelling of rock cutting force and failure surface in linear cutting test by single PDC cutter[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 177: 306–316.
- [3] 玄令超, 管志川, 呼怀刚, 等. 旋转冲击破岩实验装置的设计与应用 [J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(1): 48–52. XUAN Lingchao, GUAN Zhichuan, HU Huaiyang, et al. Design and application of experimental apparatus for rock breaking by rotary percussion[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016,

- 38(1): 48–52.
- [4] CHE Demeng, ZHU Wule. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, 119: 224–236.
- [5] 王成勇, 刘培德, 胡荣生. 花岗岩切削破碎过程研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(2): 185–196.
- WANG Chengyong, LIU Peide, HU Rongsheng. Study of granite cutting process[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1991, 10(2): 185–196.
- [6] 彭齐, 周英操, 周波, 等. 凸脊型非平面齿 PDC 钻头的研制与现场试验 [J]. 石油钻探技术, 2020, 48(2): 49–55.
- PENG Qi, ZHOU Yingcao, ZHOU Bo, et al. Development and field test of a non-planar cutter PDC bit with convex ridges[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(2): 49–55.
- [7] 孙源秀. 锥形 PDC 齿破岩机理研究与新型钻头研制 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.
- SUN Yuanxiu. Research on rock breaking mechanism of stinger cutters and new bits development[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2016.
- [8] 邹德永, 郭玉龙, 赵建, 等. 锥形 PDC 单齿破岩试验研究 [J]. 石油钻探技术, 2015, 43(1): 122–125.
- ZOU Deyong, GUO Yulong, ZHAO Jian, et al. Experimental study on rock breaking of conical PDC cutter[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(1): 122–125.
- [9] 邹德永, 孙源秀, 于鹏, 等. 锥形齿 PDC 钻头台架试验研究 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(2): 48–52.
- ZOU Deyong, SUN Yuanxiu, YU Peng, et al. Experiment study on bench test of stinger PDC bit[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2015, 39(2): 48–52.
- [10] 汪为涛. 非均质地层锥形辅助切削齿 PDC 钻头设计与试验 [J]. 石油钻探技术, 2018, 46(2): 58–62.
- WANG Weitao. Design and test of a new PDC bit with tapered auxiliary cutter for heterogeneous formations[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, 46(2): 58–62.
- [11] 孙源秀, 邹德永, 徐城凯, 等. 锥形聚晶金刚石复合片钻头(PDC)齿与常规 PDC 齿破岩效果对比试验 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15(36): 159–162.
- SUN Yuanxiu, ZOU Deyong, XU Chengkai, et al. Contrast experiment on conical PDC cutter and conventional PDC cutter[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(36): 159–162.
- [12] 谢晗, 况雨春, 秦超. 非平面 PDC 切削齿破岩有限元仿真及试验 [J]. 石油钻探技术, 2019, 47(5): 69–73.
- XIE Han, KUANG Yuchun, QIN Chao. The finite element simulation and test of rock breaking by non-planar PDC cutting cutter[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(5): 69–73.
- [13] 邓勇. 冲击载荷下深层致密砂岩破岩机理研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
- DENG Yong. The research on rock fragmentation mechanism of deep tight sandstone under impact load[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2017.
- [14] 祝效华, 刘伟吉. 单齿高频扭转冲击切削的破岩及提速机理 [J]. 石油学报, 2017, 38(5): 578–586.
- ZHU Xiaohua, LIU Weiji. The rock breaking and ROP rising mechanism for single-tooth high-frequency torsional impact cutting[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(5): 578–586.
- [15] 刘伟吉, 曾义金, 祝效华, 等. 单齿复合冲击切削破岩机制及其与扭转冲击的对比 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2020, 44(3): 74–80.
- LIU Weiji, ZENG Yijin, ZHU Xiaohua, et al. Mechanism of rock breaking under composite and torsional impact cutting[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2020, 44(3): 74–80.
- [16] 孙源秀, 邹德永, 侯绪田, 等. 锥形 PDC 齿犁切破岩受力试验研究 [J]. 石油机械, 2014, 42(9): 23–26.
- SUN Yuanxiu, ZOU Deyong, HOU Xutian, et al. Test of force of conical PDC cutter during rock plow-breaking[J]. *China Petroleum Machinery*, 2014, 42(9): 23–26.
- [17] 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.
- [18] DENG Yong, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Theoretical and experimental study on the penetration rate for roller cone bits based on the rock dynamic strength and drilling parameters[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 36: 117–123.

[编辑 刘文臣]