

单齿复合冲击切削破岩机制及其与扭转冲击的对比

刘伟吉^{1,2}, 曾义金¹, 祝效华², 丁士东¹

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100083; 2. 西南石油大学机电工程学院, 四川成都 610500)

摘要:复合冲击钻井技术是继扭转冲击钻井技术之后发展起来的新的针对硬地层的提速技术,但其破岩提速机制及其相对于扭转冲击技术的区别还不够清晰,使在实际钻井中对于这两种钻井技术的选择没有依据。针对此问题,在室内试验的基础上基于有限元方法建立单齿复合冲击切削岩石(硬岩和软岩)的拟三维数值仿真模型,研究复合冲击作用下钻齿切削岩石过程中岩屑形成及破岩比功等,并与扭转冲击切削做相应对比分析。结果表明:针对硬岩(雅安花岗岩),当切削深度较小(小于 0.6 mm)时,复合冲击切削破岩效率最高;当切削深度适中(0.6~1.2 mm)时,扭转冲击切削破岩效率最高;当切削深度较大(大于 1.2 mm)时,扭转冲击和复合冲击相对于常规切削破岩几乎没有提速效果;在软地层(南充砂岩)中复合冲击和扭转冲击切削几乎没有提速效果。

关键词:钻井; 复合冲击; 扭转破岩; 破岩机制; 破岩比功

中图分类号:TE 242 **文献标志码:**A

引用格式: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.

Mechanism of rock breaking under composite and torsional impact cutting

LIU Weiji^{1,2}, ZENG Yijin¹, ZHU Xiaohua², DING Shidong¹

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100083, China;

2. School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: The composite impact drilling method is developed after the widely used torsional impact drilling technique for improving the rate of penetration in hard rock formations in oil gas well drilling. However, its rock breaking mechanism and advantages over the torsional impact drilling were not fully studied, which can cause a confusion in selecting these two drilling methods. In this paper, a quasi-3D numerical simulation for composite impact cutting was conducted in order to investigate the rock breaking mechanism and in comparison with torsional impact for evaluating the applicability of these two methods in different rock formations. The simulation results show that the rock breaking efficiency of the composite impact cutting with a small single tooth cut depth (<0.6 mm) is higher than that of the torsional impact cutting, while the torsional impact cutting has a higher efficiency than that of the composite impact cutting when a medium tooth cut depth (0.6–1.2 mm) is used, and for large tooth cut depth (>1.2 mm), the performance of the two methods is similar. The axial impact amplitude has less influence on rock breaking efficiency, but the influence of the impact frequency can be more significant. Both of these two drilling methods are not applicable to soft rock formations.

Keywords: drilling; composite impact cutting; torsional impact cutting; rock breaking mechanism; mechanical specific en-

收稿日期:2019-07-07

基金项目:页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室开放基金项目(10010099-18-ZC0607-0025);国家自然科学基金项目(51674214)

作者简介:刘伟吉(1989-),男,讲师,博士,硕士生导师,研究方向为岩石破碎。E-mail: lwj2017_swpu@163.com。

通信作者:曾义金(1964-),男,教授级高级工程师,博士,博士生导师,研究方向为石油工程技术。E-mail: zengyj.sripe@sinopec.com。

ergy

现阶段,世界范围内 PDC 钻头的进尺量已经占到钻头总进尺量的 90% 以上,然而目前研制出的 PDC 钻头主要适用于软到中硬的均质地层,当钻遇深部非均质硬地层时,出现钻齿难吃入、易磨损和断裂等问题^[1-2]。扭转冲击钻井工具的诞生^[3-4],使 PDC 钻头以较快速度钻进深部硬地层成为可能。复合冲击是在扭转冲击的基础上再在轴向方向施加高频冲击,即在 PDC 钻头旋转的同时在扭转方向和轴向方向对岩石进行高频冲击。查春青等^[5-7]针对传统旋冲钻井和扭冲钻井在钻头匹配性及地层适应性方面存在的局限性,开发了可实现扭向反转冲击联合轴向脉动冲击的新型复合冲击钻具;王勇等^[8]根据水力脉冲激发钻头冲击振动的原理,提出自振荡式脉冲激发 PDC 钻头轴扭联合冲击的钻井新技术;李相勇^[9]研制出了一种复合冲击钻井工具,该工具通过多维振动的方式达到辅助钻头破岩的效果,能够有效解决深井提速问题;闫炎等^[10]发现相较于常规 PDC 破岩,复合冲击钻井方式产生的岩屑粒径更大,破岩效率更高;李玉梅等^[11]研究了切削齿在受转速、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。李思琪等^[12]基于弹性力学和冲击力学理论,建立了复合载荷作用下压头的破岩模型。笔者对复合冲击切削作用下的破岩提速机制及其与扭转冲击破岩技术的区别进行研究,在室内试验的基础上基于有限元方法建立单齿复合冲击切削岩石的拟三维数值仿真模型,研究复合冲击作用下钻齿切削岩石过程中的岩屑形成及破岩比功等问题,并与扭转冲击切削做相应对比分析。

1 单齿复合冲击切削模型的建立

复合冲击切削破岩是在扭转冲击切削破岩的基础上再施加一个轴向方向的高频冲击。在之前研究的基础上^[13-15]建立单齿复合冲击切削破岩的数值仿真模型,如图 1 所示。岩石模型长 40 mm,高 20 mm,网格类型采用四面体类型,即 C3D6。岩石模型左右两个面在 x 方向被约束,下表面在 y 方向被约束,前后两个面在 z 方向被约束,岩石模型考虑成一个平面应变的问题。常规切削情况下,钻齿以 0.1 m/s 的恒定速度 v 沿 x 轴方向切削岩石,切削深度为 0.2 ~ 1.5 mm。如果在扭转冲击切削情况下,切削深度和速度不变,扭转冲击器会周期性的给钻头

一个扭转方向冲击力使钻头切削齿产生一个周期性的脉冲速度。在复合冲击切削情况下,冲击器会在扭转方向和轴向给钻头一个冲击力使钻头切削齿在这两个方向产生一个周期性的脉冲速度。在本文复合冲击切削模型中,给钻齿在扭转方向和轴向施加一个周期性的速度脉冲,冲击时间为 2 ms。

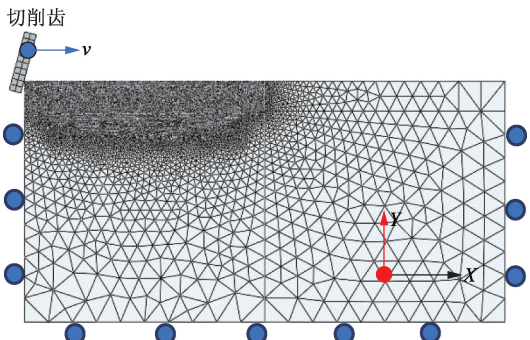


图 1 岩石切削破岩数值仿真模型
Fig. 1 Numerical simulation model of rock cutting

2 单齿复合冲击切削硬岩结果

在数值模拟中,轴向冲击幅值定义为位移值(2 ms 内轴向冲击位移),扭转冲击幅值定义为最大冲击速度与切削速度的比值,冲击频率简化为冲击次数。以硬岩(雅安花岗岩)作为研究对象,进行复合冲击切削破岩的数值模拟研究,雅安花岗岩的物理参数:抗压强度为 126.519 MPa,抗拉强度为 6.678 MPa,弹性模量为 31 783 MPa,泊松比为 0.118,内聚力为 13.7 MPa,内摩擦角为 45.29°。

2.1 切削深度的影响

不同切削深度下,单齿复合冲击切削破岩数值模拟结果如图 2 所示。其中轴向冲击幅值为 0.2 mm,扭转冲击幅值为 1.2。由图 2 可知,当切削深度较小时,没有大块岩屑生成,被切削的岩石单元完全损伤失效,表现为塑性破碎;随着切削深度的增大,伴随着大块岩屑的生成并脱落岩石本体,岩石表现为脆性破碎。也就是随着切削深度的增大,岩石的破坏形式从塑性破碎向脆性破碎转变。

复合冲击切削在不同切削深度下岩石的损伤和岩屑生成情况如图 3 所示。其中红色区域为岩石损伤值为 1 的情况,表示岩石单元在钻齿的切削作用下刚度完全退化。由图 3 可知,当切削深度为 0.2 和 0.5 mm 时,几乎没有块状岩屑生成,岩石与切削齿接触的区域刚度完全退化,呈现塑性破碎。当切

削深度为 0.8 mm 时,复合冲击切削岩石开始出现少量块状岩屑的情况,随着切削深度的增大,岩屑数

量和大小都随着增大。

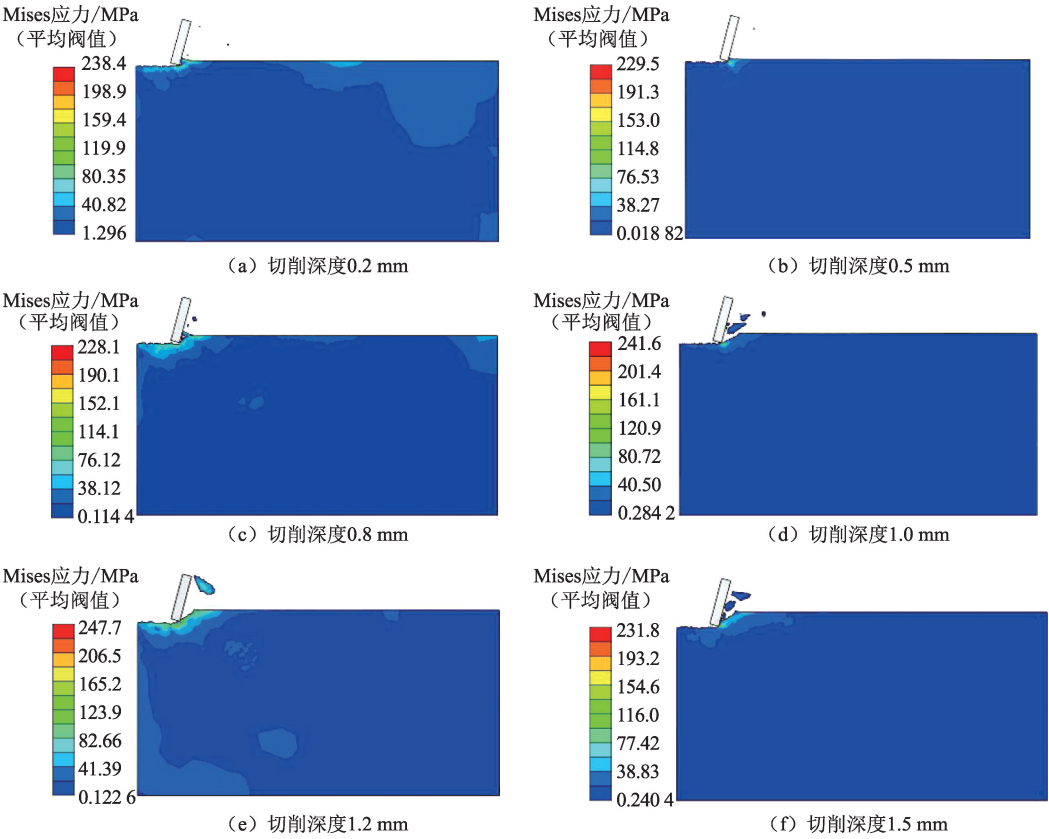


图 2 复合冲击不同切削深度下岩石的破碎情况(雅安花岗岩)

Fig. 2 Rock failure mode of composite impact cutting under different cutting depths (Ya'an granite)

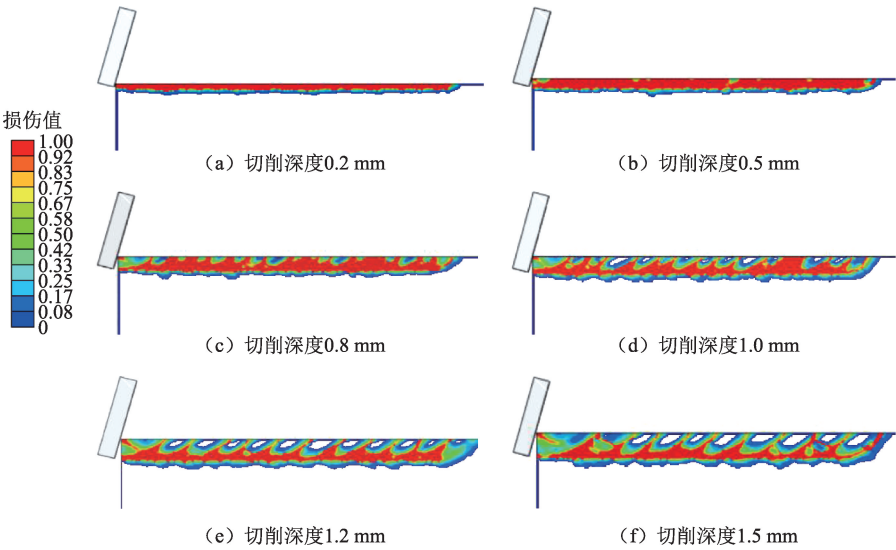


图 3 不同切削深度下岩石的损伤和岩屑的生成情况(雅安花岗岩)

Fig. 3 Rock damage and chips formation process under different cutting depths (Ya'an granite)

复合冲击破岩下,不同切削深度切削力随切削时间的变化如图 4 所示。切削力随切削时间呈现连续波动状态,切削力峰值对应切削齿吃入岩石、岩石吸收切削功的过程,切削力谷值对应岩屑形成并脱

离岩石本体的过程,切削深度越小切削力的波动幅值越小。不同切削深度下扭冲破岩和复合冲击破岩切削力平均值对比如图 5 所示。切削深度较小时,切削力随切削深度的增大几乎呈线性增长的趋势,

但随着切削深度的继续增大两者的非线性关系开始显现。

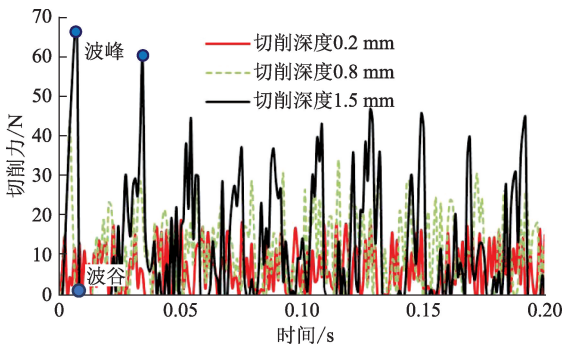


图 4 不同切削深度对应的切削力随时间的变化规律 (雅安花岗岩)

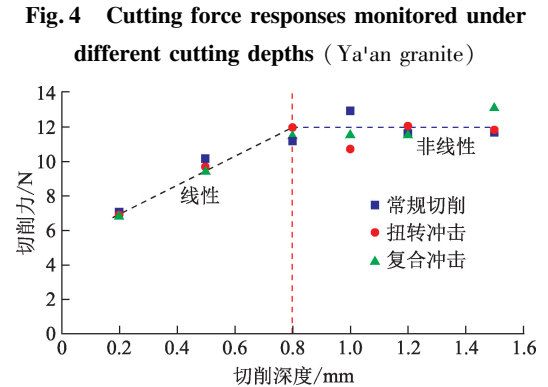


图 5 不同切削深度下常规、扭转冲击破岩和复合冲击破岩切削力平均值对比 (雅安花岗岩)

Fig.5 Average cutting force of traditional cutting, torsional impact cutting and composite impact cutting under different cutting depths (Ya'an granite)

图 6 为不同切削深度下常规切削、扭转冲击切削以及复合冲击破岩的破岩比功对比情况。由图 6 可知,3 种破岩方式下,破岩比功都随切削深度的增大而减小,并且减小幅值逐渐降低,两种冲击破岩方式相比常规切削破岩能提高破岩效率。当切削深度较小(小于 0.6 mm)时,复合冲击破岩方式相比扭转冲击破岩方式的破岩比功要小,说明复合冲击破岩在切削深度较小时相比扭转冲击破岩更有提速效果;但是随着切削深度的增大,复合冲击破岩方式的破岩比功要大于扭转冲击破岩,在切削深度为中等切深(0.6~1.2 mm)时,复合冲击相比扭转冲击没有提速效果;当切削深度较大(大于 1.2 mm)时,两种冲击破岩方式相对于常规切削破碎没有提速效果。由此根据切削深度给出最佳的破岩方法,在切削深度较浅时推荐使用复合冲击破岩技术;当切削深度为中等深度时推荐使用扭转冲击破岩技术;当切削深度较大时两种破岩方式不再有提速效果。产

生这种现象规律的主要原因是,当切削深度较小时,岩石在钻齿切削作用下主要以塑性破碎为主,复合冲击技术能在一定程度提高钻齿的侵入能力增加切削深度提高岩石的脆性破碎;当切削深度为中等切深时,钻齿的轴向冲击不能造成破碎坑,而是冲击能被岩石吸收,所以相比扭转冲击破岩消耗的能量更大,破岩效率更低;当切削深度较大时,岩石发生以脆性破碎为主的破碎形式,两种冲击破岩方式对于提高岩石脆性破碎的程度效果已经不大,因此表现为破岩比功没有明显区别。

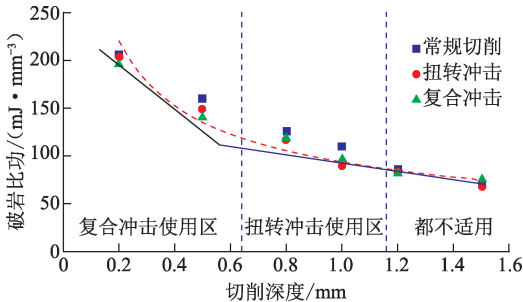


图 6 不同切削深度下常规、扭转冲击以及复合冲击破岩比功对比 (雅安花岗岩)

Fig.6 Mechanical specific energy of traditional cutting, torsional impact cutting and composite impact cutting under different cutting depths (Ya'an granite)

2.2 轴向冲击幅值的影响

不同轴向冲击幅值下岩石的破碎情况如图 7 所示。扭转方向的冲击参数保持一致,切削深度为 1 mm,切削速度为 0.1 m/s。随着轴向冲击幅值的增大,切削齿对岩石产生的损伤也变得更加明显,轴向冲击产生的能量被岩石内部吸收,没有形成有效破碎。轴向冲击幅值为 0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5 mm 对应的破岩比功分别为 98.2、102.4、102.9、103.4.8 和 105.9 mJ/mm^3 。计算结果表明,轴向冲击幅值为 0.1 mm 时破岩比功最小,破岩效率最高;轴向冲击幅值为 0.5 mm 时破岩比功最大,破岩效率最低。随着轴向冲击幅值的增大,破岩效率有降低的趋势,因此轴向冲击幅值不宜过大。

2.3 轴向冲击频率的影响

不同轴向冲击频率下(扭转方向冲击频率一定,冲击频率简化为冲击次数)的岩石破碎情况如图 8 所示。由图 8 可知,不同轴向冲击次数下,岩石的失效形式有较大差别,当冲击次数为 1 时,钻齿切削在前段部分会引起大块岩屑的生成,但是在后段的切削中没有岩屑生成,岩石呈现塑性破碎,而轴向冲击次数为 2 和 3 时,岩石发生塑性破碎的区域相比 1 次时小。轴向冲击次数为 1、2、3、4、5 对应的破

岩比功分别为 118.8、96.5、94、97.4 和 106.2 mJ/mm³。冲击次数为 1 和 5 时对应的破岩比功最大，冲击次数为 3 时对应的破岩比功最小。

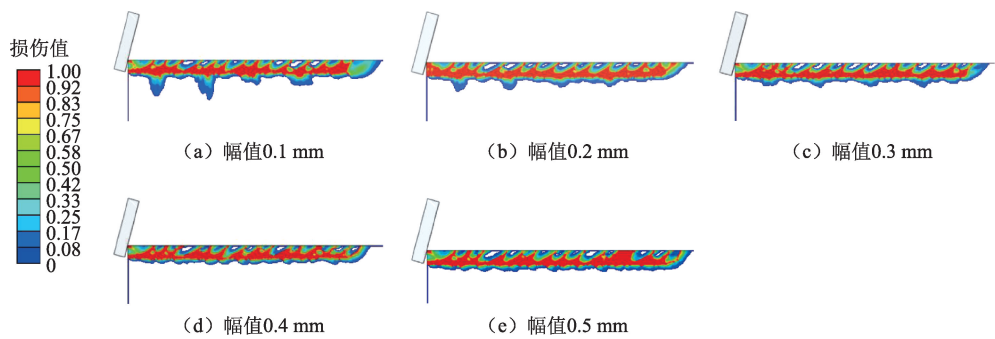


图 7 不同轴向冲击幅值下岩石的破碎情况(雅安花岗岩)

Fig. 7 Rock failure mode under different axial impact amplitudes (Ya'an granite)

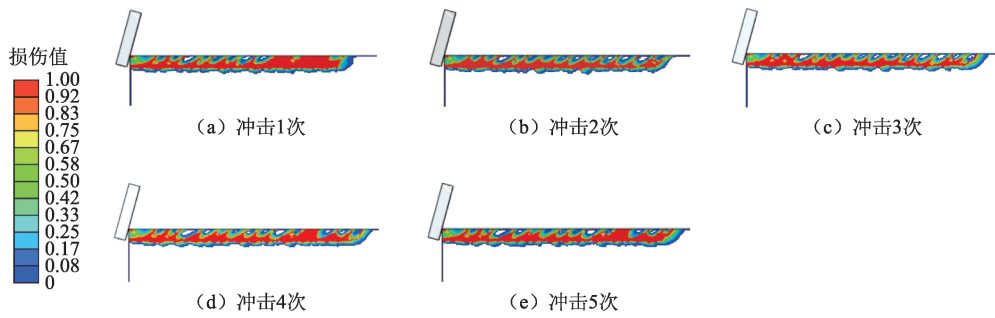


图 8 不同轴向冲击频率下岩石的破碎情况(雅安花岗岩)

Fig. 8 Rock failure mode under different axial impact times (Ya'an granite)

3 单齿复合冲击切削软岩结果

以软岩(南充砂岩)进行单齿复合冲击切削破岩数值模拟研究。南充砂岩的物理参数:抗压强度为 50.565 MPa,抗拉强度为 2.836 MPa,弹性模量为 5220 MPa,泊松比为 0.111,内聚力为 11.69 MPa,内

摩擦角为 35.45°。图 9 为冲击 4 次、轴向冲击幅值为 0.2 mm 时不同切削深度下单齿复合冲击切削南充砂岩的结果。由图 9 可知,不同切削深度下,单齿复合冲击切削南充砂岩呈现塑性破碎,相比花岗岩在复合冲击切削情况下会生成大量岩屑的情况,南充砂岩没有生成大块岩屑。

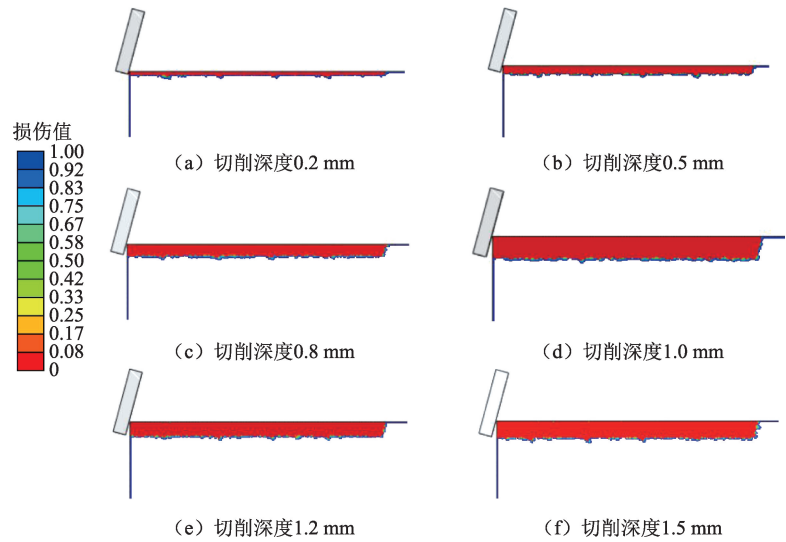


图 9 不同切削深度下软岩的破碎情况(南充砂岩)

Fig. 9 Rock failure mode of sandstone under different cutting depths (Nanchong sandstone)

图 10 为不同切削深度下常规切削、扭转冲击以及复合冲击破岩比功对比。由图 10 可知,在 3 种不

同破岩方式下,切削深度对于破岩比功基本没有影响,没有呈现出花岗岩那样随切削深度增大破岩比功减小的趋势。并且两种冲击破岩方法对于提高南充砂岩的破岩效率没有作用,即扭转冲击破岩和复合冲击破岩相比于常规切削破岩在南充砂岩或者类似于南充砂岩的软地层没有提速效果。

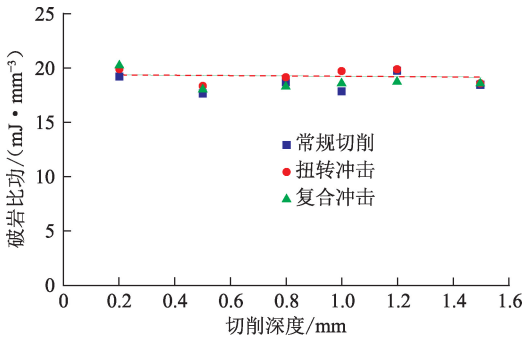


图 10 不同切削深度下常规、扭冲以及复合破岩比功对比(南充砂岩)

Fig. 10 Mechanical specific energy of traditional cutting, torsional impact cutting and composite impact cutting under different cutting depths (Nanchong sandstone)

4 结 论

(1)在硬地层(雅安花岗岩)中,切削深度较浅时岩石发生塑性破碎,切削力随切削深度的增加线性增加;当切削深度超过一个临界值时,岩石发生脆性破碎,切削力与切削深度表现出非线性关系;复合冲击切削作用下岩石相比常规切削更易发生脆性破碎(体积破碎)形成大块岩屑,能够提高破岩效率。

(2)在硬地层(雅安花岗岩)中,切削深度较浅(小于 0.6 mm)时推荐使用复合冲击破岩技术;当切削深度为中等深度(0.6 ~ 1.2 mm)时推荐使用扭转冲击破岩技术;当切削深度较大(大于 1.2 mm)时两种破岩方式都不再具有提速效果。

(3)在硬地层中,轴向冲击幅值和频率对破岩效率的影响程度较大,存在一个最优值,要根据具体的地层确定冲击频率和幅值,但轴向冲击幅值不宜过大。

(4)在软地层(南充砂岩)中,复合冲击切削作用下岩石呈现出塑性破碎,不会像硬地层岩石那样出现脆性破碎而形成大块岩屑;在软地层中扭转冲击切削和复合冲击切削对破岩效率的提高基本没有作用,因此这两种冲击破岩技术不适用于软地层。

参考文献:

[1] WARREN T M, OSTER J H. Torsional resonance of drill

collars with PDC bits in hard rock [R]. SPE 9204, 1998.

[2] 祝效华,刘伟吉. 热孔弹塑性完全耦合作用下的井底岩石应力分布[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016,40(5):72-78.

ZHU Xiaohua, LIU Weiji. A coupled thermo and poro-elastoplasticity analysis of stress distribution in bottom-hole rocks during drilling[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2016,40(5): 72-78.

[3] DEEN C A, WEDEL R J, NAYAN A, et al. Application of a torsional impact hammer to improve drilling efficiency [R]. SPE 147193, 2011.

[4] CLAYTON R. Hammer tools and PDC bits provide stick-slip solution[J]. Hart's E & P, 2010,83(2):58.

[5] 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.

[6] 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 drilling and rock breaking[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016,44(5): 10-15.

[7] 查春青,柳贡慧,李军,等. 复合冲击破岩钻井新技术提速机制研究[J]. 石油钻探技术,2017,45(2):20-24.

ZHA Chunqing, LIU Gonghui, LI Jun, et al. The rock breaking mechanism of the compound percussive rotary drilling method with a PDC bit [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017,45(2): 20-24.

[8] 王勇,倪红坚,王瑞和,等. 旋转冲击钻井破岩理论与技术研究:第三届全国水动力学研讨会暨第十五届全国水动力学学术会议论文集:下册[C]. 上海:海洋出版社,2019.

[9] 李相勇. 复合冲击钻井工具在深部难钻地层的应用[J]. 西部探矿工程,2019,31(8):70-72.

LI Xiangyong. Application of complex percussive drilling tool in deep difficult-to-drill formation [J]. West-China Exploration Engineering,2019,31(8): 70-72.

[10] 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.

- [11] 李玉梅,于丽维,张涛,等. 复合冲击钻井立体破岩特性模拟研究[J]. 系统仿真学报,2019,31(11):2471-2476.
LI Yumei, YU Liwei, ZHANG Tao, et al. Numerical simulation of rock breaking mechanism for compound percussion drilling[J]. Journal of System Simulation, 2019,31(11):2471-2476.
- [12] 李思琪,李玮,闫铁,等. 复合载荷作用下钻头冲击破岩机制研究及现场应用[J]. 振动与冲击,2017,36(16):51-55,112.
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):51-55,112.
- [13] LIU W, ZHU X, LI B. The rock breaking mechanism analysis of rotary percussive cutting by single PDC cutter [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(9): 192-201.
- [14] 祝效华,刘伟吉. 单齿高频扭转冲击切削的破岩及提速机制[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] LIU W, QIAN X, LI T, et al. Investigation of the tool-rock interaction using Drucker-Prager failure criterion [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2019,173:269-278.

(编辑 李志芬)