◀钻井技术与装备▶

基于黏聚力单元的PDC钻头冲击破碎硬岩数值模拟*

高 峰[1] 史怀忠[2] 黄中伟[2] 赫文豪[2] 熊 超[3] 傅新康[2]
［1. 中石化石油工程技术服务股份有限公司 2. 中国石油大学（北京）油气资源与探测国家重点实验室
3. 中国石油大学（北京）机械与储运工程学院］

高峰，史怀忠，黄中伟，等. 基于黏聚力单元的PDC钻头冲击破碎硬岩数值模拟［J］. 石油机械，2025，53（10）：109-114.

Gao Feng，Shi Huaizhong，Huang Zhongwei，et al. Numerical simulation on impact crushing of hard rock by PDC bit based on cohesive element［J］. China Petroleum Machinery，2025，53（10）：109-114.

摘要：地下深部油气储层岩石硬度较大，常规钻井方式下PDC钻头的钻进效率较低。冲击钻井对硬岩的破碎效果表现较好，但冲击作用下PDC钻头破碎硬岩的损伤机理尚不清楚。为此，基于黏聚力单元建立了PDC钻头冲击破岩数值模型，设置了常用的模型参数，模拟分析了冲击作用下岩石的裂纹演化及应力分布特征，并定量提取岩石损伤数据进行研究。研究结果发现，PDC钻头轴向冲击破岩表现出明显的阶段性，初期形成多个独立破坏区域，随着冲击能量积累最终融合形成网状损伤区，可进一步提高破岩效率。此过程中应力主要集中于齿下并呈圆弧状向外传播；不同轴向冲击频率对岩石损伤模式产生显著影响，低频冲击（10和20 Hz）导致更高的拉伸损伤占比，并促进裂纹体积增长，最终形成更深远的破坏；高频冲击（30和40 Hz）尽管初期裂纹增长较快，但受应力波衰减影响，裂纹扩展受限，甚至可能出现裂纹闭合现象。最终发现，20 Hz冲击频率下的拉伸损伤占比最高，表明该频率下破岩模式最优。研究成果可为PDC钻头冲击破岩参数优化提供借鉴。

关键词：黏聚力单元；冲击钻井；PDC钻头；损伤演化；裂纹扩展；硬岩
中图分类号：TE921 **文献标识码：**A DOI：10. 12473/CPM. 202501001

Numerical Simulation on Impact Crushing of Hard Rock by PDC Bit Based on Cohesive Element

Gao Feng[1] Shi Huaizhong[2] Huang Zhongwei[2] He Wenhao[2] Xiong Chao[3] Fu Xinkang[2]
(1. *Sinopec Oilfield Service Corporation*; 2. *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting*, *China University of Petroleum* (*Beijing*); 3. *College of Mechanical and Transportation Engineering*, *China University of Petroleum* (*Beijing*))

Abstract: The rock of deep oil and gas reservoir has high hardness, and the drilling efficiency of PDC bit is low under conventional drilling mode. Impact drilling performs well in crushing hard rock, but the damage mechanism of PDC bit crushing hard rock under impact is still unclear. To address this issue, a numerical model for impact rock breaking of PDC bit was established based on cohesive element, common model parameters were set, the crack evolution and stress distribution characteristics of rock under impact were simulated and analyzed, and rock damage data were quantitatively extracted for research. The research results show that the axial impact rock

* 基金项目：国家自然科学基金企业创新发展联合基金集成项目“三大盆地深层-超深层液相油气高效勘探开发基础研究”（U24B6001）；国家自然科学基金面上基金项目“轴扭耦合冲击辅助钻头破碎高温花岗岩机理研究”（52270416，52374016）；油气资源与探测国家重点实验室定向课题“轴扭耦合冲击破碎碳酸盐岩智能化调控方法”（PRE/DX-2402）

breaking of PDC bit exhibits obvious stage nature. Initially, multiple independent damage zones are formed, which eventually merge into a networked damage area with the accumulation of impact energy, thereby further enhancing rock breaking efficiency. During this process, the stress is mainly concentrated beneath the cutter and propagates outward in an arc shape. Different axial impact frequencies have a significant influence on the rock damage mode: low-frequency impact (10 and 20 Hz) leads to a higher proportion of tensile damage, promotes the growth of crack volume, and ultimately forms more extensive destruction; high-frequency impact (30 and 40 Hz) leads to a faster growth of initial crack, but affected by stress wave attenuation, crack propagation is constrained, and even crack closure may occur. It is ultimately found that the 20 Hz impact frequency yields the highest proportion of tensile damage, indicating that this frequency corresponds to the optimal rock breaking mode. The research results provide reference for the optimization of impact rock breaking parameters of PDC bit.

Keywords: cohesive element; impact drilling; PDC bit; damage evolution; crack propagation; hard rock

0 引 言

深部油气勘探开采中不可避免会遇到硬岩地层可钻性差的难题[1]。目前，PDC钻头仍是全球钻井现场最常用的破岩工具[2]。但现场实践表明，PDC钻头在钻遇深部硬岩时，经常出现钻头齿磨损、机械钻速低以及钻头进尺低等问题[3-6]。冲击钻井被认为可以有效提升PDC钻头破碎岩石效率[7]。由于岩石材料的不透明性，在实验室中观察岩石材料破碎过程中内部裂缝的扩展和演变具有很大挑战性，因此，通过试验观察岩石内部裂缝在切削过程中的扩展和演变的实例很少。西南石油大学刘伟吉[8]以薄岩石片为试验对象，研究发现：当切削深度为0.1 mm时，岩屑会堆积在切削齿上，不会出现宏观裂缝；当切削深度为2.3 mm时，切削齿前方会出现压缩区，导致切削齿前方出现裂纹，并沿切削方向扩展至自由表面。CHENG Z. 等[9]制作了砂岩、花岗岩和大理石薄板，利用高清摄像机记录了常规切削齿切削过程中岩石内部裂缝的扩展情况，结果显示，当破碎带形成时主裂缝即开始出现。

有关研究人员利用有限元法模拟岩石在切削过程中的断裂行为。熊超等[10]基于混凝土损伤塑性（CDP）本构方程建立了锥形切削齿破岩模型，利用拉伸和压缩损伤因子表征了裂纹的萌生与扩展，揭示了锥形齿破岩机理。M. C. JAIME等[11]使用有限元法（FEM）研究了切削岩石过程，并在切割槽的底部发现了大量具有高应力的条纹区域。LI Y. 等[12]采用有限-离散元组合方法模拟了脆性岩石与PDC切削齿之间的相互作用，模拟中捕捉到了裂纹扩展的过程和岩屑之间的接触。闫炎等[13]建立了全尺寸PDC钻头旋转冲击破岩有限元数值模型研究后发现，旋转冲击破岩方式下PDC钻头主要对齿底部、前方、四周的岩石造成损伤。彭旭等[14]基于ANSYS平台建立了全尺寸钻头冲击破碎岩石模型，发现了PDC钻头主要通过拉伸、压缩和剪切的联合作用造成岩石损伤。

通过以上文献调研可以看出，在室内测试中，研究人员将岩石加工成薄板，以便在PDC切削齿测试时观察岩石内部的裂缝。在数值模拟方面，研究人员主要建立了基于有限元法的破岩数值模型。前人对PDC切削齿冲击切削作用下岩石内部裂纹扩展的研究有限，其建立的模型不能准确地反映岩石脆性的特征，有些模型甚至不能实现单元失效删除，使得仿真结果与室内试验结果存在较大差异，更无法定量分析岩石损伤情况，PDC钻头在冲击辅助作用下对岩石造成的损伤演化机制并不清楚。因此，笔者基于黏聚力单元法建立了PDC钻头冲击破碎岩石数值模型，分析了裂纹及应力分布特点，对拉伸失效方式产生的裂纹以及裂纹的体积分别进行了统计分析。研究结果对揭示PDC钻头冲击破碎岩石机理具有重要意义。

1 数值模型搭建

1.1 黏聚力单元方法

牵引-分离响应定义了材料的断裂过程，其初始过程表现为线性弹性行为。用弹性本构矩阵证明了材料的线弹性特性，该矩阵描述了名义应力和名义应变之间的关系，名义应力等于每个积分点处的力分量除以原始面积。公称应变等于每个积分点的间距除以原始厚度。

基于牵引-分离定律的初始线弹性行为[15]如下：

$$\boldsymbol{t}=\begin{Bmatrix}\boldsymbol{t}_n\\ \boldsymbol{t}_s\\ \boldsymbol{t}_t\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}E_{nn}E_{ns}E_{nt}\\ E_{ns}E_{ss}E_{st}\\ E_{nt}E_{st}E_{tt}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_n\\ \varepsilon_s\\ \varepsilon_t\end{Bmatrix}=\frac{1}{T_0}\begin{bmatrix}E_{nn}E_{ns}E_{nt}\\ E_{ns}E_{ss}E_{st}\\ E_{nt}E_{st}E_{tt}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\delta_n\\ \delta_s\\ \delta_t\end{Bmatrix}\tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{t}$为标称牵引应力，Pa；名义应力可分为3部分，依次为$\boldsymbol{t}_n$、$\boldsymbol{t}_s$和$\boldsymbol{t}_t$，Pa；名义应变可分为ε_n、ε_s和ε_t，3部分；$\boldsymbol{\delta}_n$、$\boldsymbol{\delta}_s$、$\boldsymbol{\delta}_t$为对应的3个分离位移，m；T_0是内聚元素的原始厚度，m；E_{nn}、E_{ss}、E_{tt}为法向、2个切向方向上的刚度，Pa；E_{ns}、E_{nt}、E_{st}为不同方向的耦合刚度，Pa。

对于内聚裂纹模型，引入标量损伤参数D来衡量损伤。该参数的初始值设置为0，这意味着初始时材料不会发生损坏。当材料开始损伤时，参数D从0变为1，牵引-分离模型的正应力随损伤的累积而变化[16]。参数D可以描述为[17]：

$$D=\frac{\delta_{\mathrm{mf}}\left(\delta_{\mathrm{mm}}-\delta_{\mathrm{mo}}\right)}{\delta_{\mathrm{mm}}\left(\delta_{\mathrm{mf}}-\delta_{\mathrm{mo}}\right)}\tag{2}$$

式中：δ_{mf}为完全分离时的等效位移，m；δ_{mm}为最大等效位移，m；δ_{mo}为牵引力达到黏结强度时的等效位移，m。

1.2　几何模型

基于数值模拟软件ABAQUS，建立了PDC钻头冲击破岩几何模型，如图1所示。由图1可知，PDC钻头冲击破岩几何模型由岩石和PDC钻头组成。岩石是一个圆柱体，底面为圆形，其直径41 mm，高度31 mm。将PDC钻头设置为刚体约束，设置PDC钻头转速为12.56 rad/s，同时，设置PDC钻头正弦周期性上下往复位移，即为轴向冲击，轴向冲击的频率分别设置为10、20、30和40 Hz。另外，将PDC钻头其他几个维度的运动参数设为0，保证PDC钻头只做旋转和轴向冲击运动。为了保证岩石在切削过程中的稳定性，对岩石底部采用了完全固定的边界条件。钻头破碎岩石过程属于强非线性接触、大变形问题，因此采用显式动力学分析步来求解该模型。PDC钻头与岩石之间的相互作用设置为通用接触，接触属性分为切向行为和法向行为。法向行为设置为硬接触，并且允许接触后分离；切向行为设置为罚摩擦，摩擦因数设为0.4。

1.3　模型参数设置

在PDC钻头冲击破岩几何模型中，涉及的主要材料是岩石和PDC切削齿，其中岩石属性如表1所示。PDC切削齿泊松比为0.28，PDC钻头的单元类型为C3D4。由于将PDC钻头作为刚体处理，其网格尺寸对数值模型的计算结果影响不大。

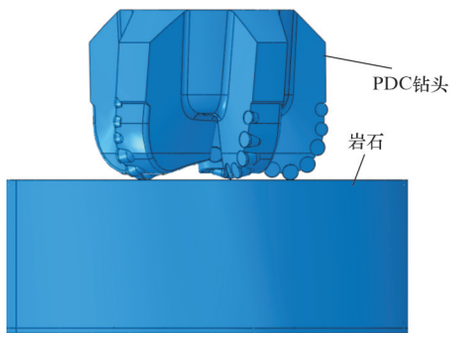


图1　PDC钻头冲击破岩几何模型

Fig. 1　Geometric model for impact rock breaking of PDC bit

因此，将PDC钻头的网格尺寸设置得稍大一些，其网格尺寸设置为1.4 mm。岩石部件基质的单元类型为C3D4，C3D4的单元个数为649 137。黏聚力单元的类型为COH3D6，黏聚力单元的数量为1 280 864。同时，该模型中岩石部件使用四面体网格以更好地模拟裂纹的扩展形态。

表1　岩石材料属性

Table 1　Rock material properties

属　性	值
密度/(kg·m^{-3})	2.26×10^3
第一方向名义应力/MPa	4.258
第二方向名义应力/MPa	13.69
摩擦角/(°)	32.95
Ⅰ型破裂能/(N·mm^{-2})	0.217 1
Ⅱ型破裂能/(N·mm^{-2})	0.021 7

2　结果与讨论

2.1　裂纹及应力分布特征

图2为不同时刻下岩石表面的损伤区域图。由图2可见，在PDC钻头轴向冲击作用下，破岩动态演化过程表现出明显的阶段性和裂纹扩展特征。当钻头刚接触岩石时，每个刀翼最尖端的齿率先接触并施加局部应力，导致岩石表面形成5个初始独立破坏区域；随着冲击作用的持续，应力集中效应增强，单个刀翼对岩石造成的损伤逐渐加强，使得破坏区域面积扩大；伴随冲击能量的累积，岩石表面外围产生拉伸裂纹，并呈现相互连通的趋势；最终在冲击作用下，初始的5个独立破坏区域最终融合，形成网状损伤区，进一步增大了岩石的破碎程度。同时，轴向冲击作用在坑底引发局部应力集中，使坑底发生局部加深，表明冲击破碎过程中不仅在水平面上产生裂纹连接，还在垂向上加深了破碎区域。这一破坏机制表明轴向冲击强化了PDC钻头的破岩能力，有助于提高破岩效率。

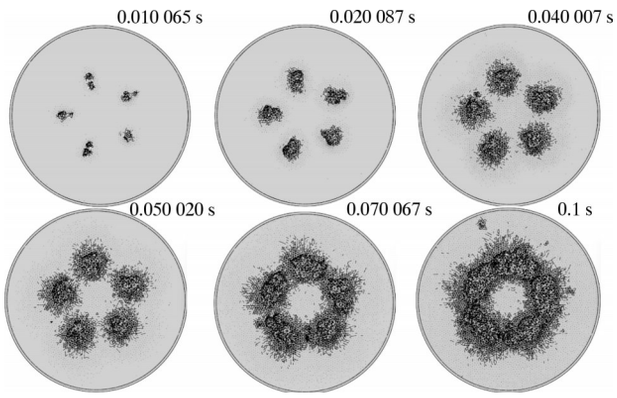


图 2　不同时刻下岩石表面的损伤区域图

Fig. 2　Time-dependent damage zone map of rock surface

图 3 展示的是 PDC 钻头冲击作用下岩石内部应力分布状态。由图 3 可知，在 PDC 钻头冲击作用下，岩石内部的应力主要集中在齿下，并以刀翼为中心呈现圆弧状分布，表明钻头主要通过齿尖局部高应力破碎岩石，符合 Hertz 接触应力理论[18]；应力从钻头处向岩石内部扩散，随着深度的增加逐渐衰减；不同深度的圆弧状应力区域之间存在应力薄弱区，不同时刻的冲击波叠加和传播可能是形成应力薄弱区的主要原因。由于钻头施加了轴向冲击作用，岩石内部会产生应力波，并向外传播。这些应力波可能在不同深度发生相互干涉，导致某些区域应力增强；而某些区域应力削弱，形成应力薄弱区。

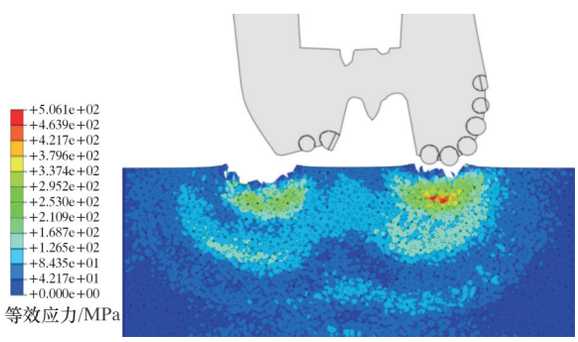


图 3　岩石内部应力分布云图

Fig. 3　Stress distribution inside rock

此外，冲击波具有周期性，每次冲击均会在岩石内部产生新的应力波，之前的应力波尚未完全衰减，这种应力波的叠加和相互作用也可能导致局部区域应力下降甚至出现卸载效应。不同刀翼处的应力区域相互连通，说明刀翼之间的协同作用促进了岩石的整体破坏，有助于提高破岩效率。优化刀翼布齿及冲击参数可增强应力连通性，减少应力薄弱区，从而增强 PDC 钻头的破岩能力。

2.2　岩石损伤定量分析

岩石抗拉强度低于抗压强度[19]。因此，拉伸损伤占比越高越有助于破岩效率的提升。图 4 为不同冲击频率下岩石拉伸损伤占比随时间变化的情况。由图 4 可见，在初始阶段（0~0. 01 s），各频率曲线的拉伸损伤比在初始阶段迅速上升，说明在冲击加载的瞬间，岩石内部出现了较强的拉伸损伤。这一阶段主要受到冲击力作用的影响，加载速度快，导致岩石的拉伸破坏迅速发展。在稳定破碎岩石阶段，即 0. 01 s 以后，10 和 20 Hz 的冲击频率下拉伸损伤占比较高，20 Hz 最高，接近 0. 21；30 和 40 Hz 的冲击频率下拉伸损伤占比相对较低，30 Hz 的拉伸损伤占比稍高于 40 Hz，但整体下降趋势明显。说明在较高的冲击频率（30 和 40 Hz）下，岩石的拉伸损伤占比相对较小，而低频（10 和 20 Hz）冲击下损伤占比更大。这是因为低频冲击下，单次冲击的能量较大，岩石内部的应力波衰减较慢，使得拉伸破坏更严重。20 Hz 时拉伸损伤占比最大，说明在该频率下，岩石拉伸破坏最严重，可能是由于此时冲击能量的积累与岩石破坏模式更匹配。

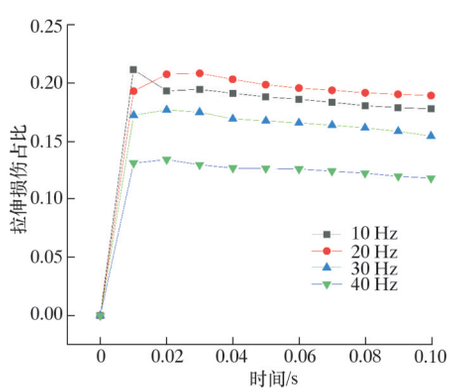


图 4　不同冲击频率下拉伸损伤占比

Fig. 4　Proportion of tensile damage at different impact frequencies

图 5 为不同冲击频率下岩石内部裂纹体积随时间的变化情况。从图 5 可知，在短时间（0~0. 05 s）内，裂纹体积的变化主要受冲击波的瞬态效应影响，主要表现为：高频冲击下，即轴向冲击频率为 40 和 30 Hz 时，造成的瞬间裂纹体积更大。这是因为高频冲击意味着短时间内施加的应力波密集，岩石内部会形成多个局部破坏区，并迅速扩展。高频率的冲击波长较短，容易造成岩石局部的高应力集中区，出现较多的微裂纹，并在短期内使裂纹体积增大。但由于应力波的传输特性，高频冲击往往更容易在短时间内释放能量，后期裂纹的持续扩展可能受限于应力波衰减而较弱，甚至出现裂纹闭合效应。

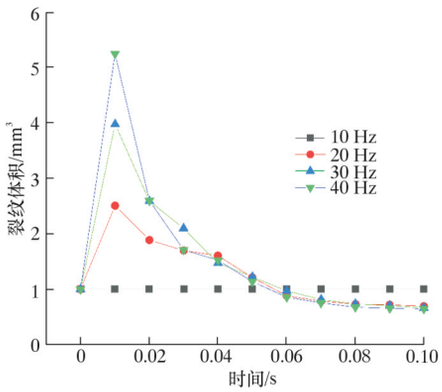


图 5　不同频率下裂纹体积变化曲线

Fig. 5　Crack volume at different frequencies

低频冲击下，即轴向冲击频率为 10 和 20 Hz 时，瞬间裂纹体积较小。低频冲击的波长较长，裂纹扩展周期长，在短时间内，即 0. 05 s 内，裂纹体积相对较小。低频冲击能量较大但更持续，虽然裂纹增长的速率较慢，初期裂纹体积较小，但后期可进一步扩展。冲击时间达到 0. 05 s 以后，当轴向冲击频率为 10 Hz 时，裂纹体积最大。虽然 10 Hz 的低频冲击能量传递较慢，短时间内裂纹扩展数量较少，但其冲击力作用时间更长，裂纹将不断发展。低频冲击导致更深远的岩石损伤，裂纹体积不断增加，最终超过了高频冲击下的裂纹体积。

3　结论及建议

（1）PDC 钻头轴向冲击破岩表现出明显的阶段性，初期形成多个独立破坏区域，随着冲击能量积累，最终融合形成网状损伤区，进一步提高了破岩效率；轴向冲击在坑底引发局部应力集中，使破碎区域在垂向上加深，进一步增强破岩能力。

（2）应力主要集中于齿下，并呈圆弧状向外传播，符合 Hertz 接触应力理论和应力波传播规律；不同深度的圆弧状应力区域之间存在应力薄弱区，可能由冲击波的周期性叠加和传播引起；不同刀翼的应力区域相互连通，表明刀翼协同作用可促进整体破岩，提高破岩效率。

（3）低频冲击（10 和 20 Hz）导致更高的拉伸损伤占比，20 Hz 冲击频率下拉伸损伤占比最大，表明该频率下破岩模式最匹配，提高了破岩效率；高频冲击（30 和 40 Hz）的拉伸损伤占比相对较低，可能由于高频冲击波能量释放较快，导致损伤相对较小。

（4）0~0. 05 s 内，高频冲击（30 和 40 Hz）裂纹体积增长最快，但受应力波衰减影响，后期裂纹扩展受限；低频冲击（10 和 20 Hz）初期裂纹体积较小，但随着时间推移，裂纹不断扩展，最终 10 Hz 下的裂纹体积最大。低频冲击的单次能量较大，作用时间更长，导致更深远的岩石破坏；而高频冲击虽然短期裂纹增大较快，但后期扩展受限甚至可能出现裂纹闭合效应。

（5）基于研究结果，针对地下岩石处于高温高压环境，建议下一步建立高温高压环境下 PDC 钻头冲击破碎硬岩的数值模型，以探究温度和围压对PDC钻头冲击破碎硬岩的影响。

参　考　文　献

[1] 温春明，吴家坤，孙新浩. 多维冲击器在北疆深部硬岩地层钻井提速中的应用[J]. 工程技术研究，2022，7：104-106.
WEN C M，WU J K，SUN X H. Application of multi-dimensional impactor in drilling speed increase in deep hard rock formation in norther Xinjiang[J]. Engineering and Technological Research，2022，7：104-106.

[2] HARELAND G，NYGAARD R，YAN W，et al. Cutting efficiency of a single PDC cutter on hard rock[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology，2009，48（6）：60-65.

[3] 李基伟，李乾，田胜雷，等. 东海深部高研磨地层冲击钻井 PDC 齿优选研究[J]. 石油机械，2024，52（8）：77-84.
LI J W，LI Q，TIAN S L，et al. Optimization of PDC cutter for percussive drilling in deep highly - abrasive strata in the East China Sea Basin[J]. China Petroleum Machinery，2024，52（8）：77-84.

[4] 刘永旺，李坤，管志川，等. 差压步进钻头提高破岩速度原理及现场试验[J]. 中国石油大学学报（自然科学版），2024，48（4）：101-108.
LIU Y W，LI KUN GUAN Z C，et al. Mechanism and field testing of improving rock breaking efficiency by using a step-type drilling bit with self distributing of drilling pressure[J]. Journal of China University of Petroleum（Edition of Natural Science），2024，48（4）：101-108.

[5] 陈晗，李欣龙，史怀忠，等. 布齿方式对PDC齿破岩特性影响[J]. 中国石油大学学报（自然科学版），2024，48（10）：83-90.
CHEN H，LI X L，SHI H Z，et al. Rock breaking characteristics under different cutter arrangements on PDC bits[J]. Journal of China University of Petroleum（Edition of Natural Science），2024，48（10）：83-90.

[6] 高德利，刘维，万绪新，等. PDC钻头钻井提速关键影响因素研究[J]. 石油钻探技术，2023，51（4）：20-34.

GAO D L, LIU W, WAN X X, et al. Study on Key Factors Influencing the ROP Improvement of PDC Bits[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(4): 20-34.

[7] 孙乾坤. 东海X区块钻井提速研究与应用[J]. 石油地质与工程, 2023, 37(4): 104-107, 112.
SUN Q K. Research and application of faster drilling in block X of east China sea[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2023, 37(4): 104-107, 112.

[8] 刘伟吉. 井底岩石塑脆性破碎机理及其影响因素研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
LIU W J. The ductile-brittle failure mechanism and its influence factors investigation of bottom hole rock[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.

[9] CHENG Z, SHENG M, LI G S, et al. Cracks imaging in linear cutting tests with a PDC cutter: characteristics and development sequence of cracks in the rock[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 179: 1151-1158.

[10] 熊超, 黄中伟, 王立超, 等. 锥形聚晶金刚石复合片齿破岩特征与机制研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(8): 2432-2444.
XIONG C, HUANG Z W, WANG L C, et al. Study on rock breaking characteristics and mechanism of conical PDC cutter[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(8): 2432-2444.

[11] JAIME M C, ZHOU Y N, LIN J S, et al. Finite element modeling of rock cutting and its fragmentation process[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 80: 137-146.

[12] LI Y, CHEN Z J, YE Y H, et al. Combined finite-discrete element method for modeling the interaction between single PDC cutter and brittle rock[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 207: 109133.

[13] 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 Y, HAN L H, LIU Y H, 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.

[14] 彭旭, 郝世俊. 全尺寸PDC钻头复合冲击破岩机理的有限元分析[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(2): 240-246, 252.
PENG X, HAO S J. Rock breaking mechanism of composite impact of full-size PDC bit based on finite element analysis[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(2): 240-246, 252.

[15] HUANG A L, WEI G, ZOU Y, et al. Numerical simulation of rock breaking by PDC cutter with finite-discrete-infinite element method[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 225: 211725.

[16] 张照伟. 基于黏聚力单元的煤岩复合体水力压裂裂纹扩展规律研究[J]. 煤矿安全, 2024, 55(1): 57-64.
ZHANG Z W. Study on crack propagation law of hydraulic fracturing of coal rock complex based on cohesive element[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(1): 57-64.

[17] WANG H J, LIAO H L, NIU W L, et al. Comparative analysis of impact failure modes between slotted rock and intact rock[J]. Geothermics, 2023, 114: 102801.

[18] 吕中华. 基于赫兹理论的齿轮副接触应力特性分析[J]. 兰州工业学院学报, 2023, 30(3): 5-8.
LYU Z H. Analysis of contact stress characteristics of gear pair based on Hertz Theory[J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2023, 30(3): 5-8.

[19] 熊超. 锥形PDC齿破碎花岗岩机理研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022.
XIONG C. Study on mechanism of conical diamond element breaking granite[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2022.

第一作者简介: 高　峰, 生于1972年, 高级工程师, 1994年毕业于西南石油学院, 现从事石油工程物资装备管理工作。地址: (100020) 北京市朝阳区。email: gaof.os@sinopec.com。

通信作者: 史怀忠, 研究员。email: shz@cup.edu.cn。

收稿日期: 2025-01-01　　**修改稿收到日期**: 2025-04-25

(本文编辑　宋治国)