PDC 复合冲击钻下的岩石破碎过程应力变化规律研究

张 剑* 王 宁 王朝义 王 崇 王 升
（河南省核技术应用中心，郑州 450044）

摘 要 为了细化分析关键变量对应力变化的独立影响，研究了 PDC 复合冲击钻下的岩石破碎过程应力变化规律。选取某区域 2 500~3 000 m 岩石作为研究对象，按照破碎应力变化规律选取 EDEM 设置试验岩石材料与钢板材料接触参数，利用 CAD 进行三维仿真建模，结合岩石颗粒的粘结关系确定法向约束状态，构建岩石颗粒接触模型，分析临界切向应力、临界法向应力、切向接触刚度、法向接触高度，使用单轴压缩法校验与设置加载速度与平均加载时间，调整冲击钻接触位置进行应力归零处理，记录试件被加载时的试验力关系，判断出应力变化与切削时间、破碎方式、切削深度、切削齿直径和切削角度有关。研究结果表明，切削参数切削前倾角为 5°、切削直径为 8 mm、切削速度为 2 m/s、切削深度为 2.5 mm 时，切削应力较低，掘进效率较高。

关键词 PDC 复合冲击钻，岩石破碎，应力变化规律，掘进效率，离散元方法
中图分类号：TD235.1 **文献标志码**：A **DOI**：10.15935/j.cnki.jggcs.202604.0009

Study on Stress Variation Law of Rock Fragmentation Process under PDC Composite Impact Drilling

ZHANG Jian* WANG Ning WANG Chaoyi WANG Chong WANG Sheng
（Henan Nuclear Technology Application Center, Zhengzhou 450044, China）

Abstract To refine the independent influence of key variables on stress variation, the stress variation patterns during rock fragmentation under PDC composite impact drilling were investigated. A 2 500−300 m rock section from a specific area was selected as the research subject. Based on the stress variation patterns, EDEM was configured with contact parameters for experimental rock and steel plate materials. A 3D simulation model was created using CAD, and the normal constraint state was determined by analyzing the bonding relationships of rock particles. A rock particle contact model was constructed to analyze critical tangential stress, critical normal stress, tangential contact stiffness, and normal contact height. The uniaxial compression method was used to validate and set the loading speed and average loading time. The impact drilling contact position was adjusted for stress zeroing, and the experimental force relationship during loading was recorded. It was concluded that stress variation is related to cutting time, fragmentation mode, cutting depth, cutting tooth diameter, and cutting angle. The results indicate that when the cutting parameter includes a 5° cutting inclination angle, an 8mm cutting diameter, a 2 m/s cutting speed, and a 2.5 mm cutting depth, the cutting stress is lower, and the excavation efficiency is higher.

Keywords PDC composite impact drill, rock fragmentation, stress variation law, excavation efficiency, discrete element method

收稿日期：2026-01-04

*联系作者：张 剑（1989-），男，工程师，主要研究方向为岩土工程勘察。E-mail：you80783@163.com

0 引　言

岩石破碎是一种通过外力施加打破岩石内聚力，引发岩石尺寸变化的特殊过程，其影响因素较多，包括岩石本身的硬度、尺寸、形状等物理特性，以及破碎设备、方式等外部条件[1]。PDC复合冲击钻指将PDC金刚石复合片作为钻头基础材料的钻进设备，在矿山开采、地质勘探等领域应用广泛，能有效将冲击力与耐磨性结合[2-3]。在PDC复合冲击钻下，岩石会受高速旋转冲击作用影响产生大幅度破碎，引发应力变化[4]。因此，研究PDC复合冲击钻下的岩石破碎过程应力变化规律是目前的重要方向。

吴怡等[5]建立了PDC钻冲击破岩的三维仿真模型，分析平面齿、斧形齿、三棱齿等不同PDC钻齿在冲击载荷作用下的破岩机制，测试切削岩石的剪应力分布规律，但未能系统量化切削时间对应力变化峰值的影响。赵环帅等[6]通过分析冲击钻采用不同加载速率下的岩石破裂变化，标定青砂岩细观参数，构建青砂岩力学响应方程，分析了不同加载速率下岩石的应力应变规律，但该方案缺乏对破碎方式（如扭转冲击与常规钻进）的对比分析。秦承帅等[7]研究了PDC复合冲击钻在钻齿轴向-扭转两个方向冲击作用下的岩石破坏机制，利用连续-非连续分析方法构建岩石模型和PDC复合钻冲击运动模型，根据岩屑、裂纹的形成过程分析岩石在PDC复合冲击钻的冲击作用下的受力破坏规律，但未详细分析切削深度和角度对应力的敏感性。席岩等[8]分析了PDC复合冲击钻采用轴向和扭转两种冲击方式的载荷相位差对于岩石应力的影响，通过构建PDC钻头单齿破岩数值模型，以分析轴向和扭转冲击应力波不同相位差对岩石的损伤规律，但以上影响分析未涉及多参数耦合（如切削齿直径）的影响效应。

为此，本研究采用EDEM参数设置、CAD建模与控制变量法，研究了切削时间、破碎方式、切削深度、切削齿直径和切削角度等多参数对岩土应力变化的耦合影响，解决了现有研究局限于单因素分析的问题，为优化钻井工艺提供了综合依据。另外，本文获取与岩石破碎过程接近的参量，按照模型尺寸进行刚度调整，进行bonding模型粘结，使用SolidWorks绘制切削齿，构建试验切削模型，输出岩石破碎过程应力变化规律，以满足钻探领域的效率与综合经济需求。

1 参数与准备

选取某区域2 500~3 000 m岩石作为研究对象，切割成高度50 mm，直径20 mm的小块，修正不平等度。研究对象岩石的基础信息见表1。

表1　岩石样本信息

Table 1　Rock sample information

参数名称	数值
岩石岩性类型	细粒花岗岩
单轴抗压强度	180 MPa
弹性模量	45 GPa
内摩擦角	55°
黏聚力	25 MPa
巴西抗拉强度	12 MPa

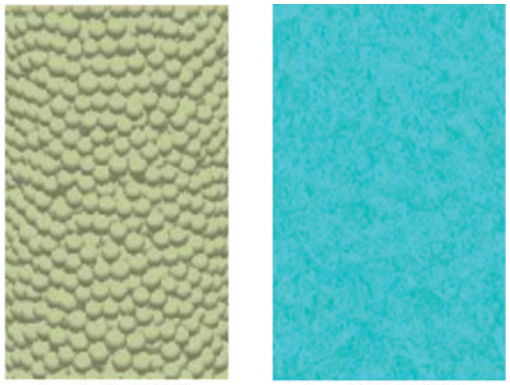
选用山东邦弘中创智能装备有限公司生产的PDC钻头作为实验钻头，按照破碎应力变化规律要求选取EDEM设置试验岩石材料与钢板材料接触参数，见表2。

表2　试验岩石材料与钢板材料接触参数

Table 2　Contact parameters between experimental rock materials and steel plate materials

材料参数	数值	接触参数	数值	标定标准
岩石密度	2 690 kg·m^{-3}	颗粒-颗粒恢复因数	0.5	ASTM D7263-21《土壤试样密度和单位重量的实验室测定标准试验方法》
钢密度	7 900 kg·m^{-3}	颗粒-颗粒静摩擦因数	0.45	ASTM A36《碳素结构钢标准规范》
岩石泊松比	0.27	颗粒-颗粒动摩擦因数	0.05	ISRM《岩石力学测试建议方法》(基于单轴压缩测试)
钢泊松比	0.31	颗粒-壁面恢复因数	0.4	ASTM E132-17《室温下泊松比的标准试验方法》(对于钢，典型值为0.3~0.32)
岩石剪切模量	68 000 MPa	颗粒-壁面静摩擦因数	0.3	ASTM E494-15《材料中超声波速度测量的标准实践》
钢剪切模量	80 000 MPa	颗粒-壁面动摩擦因数	0.01	ASTM A370-21《钢产品机械测试的标准试验方法和定义》

针对若干个试验颗粒，试验岩石的排布示意如图1所示。



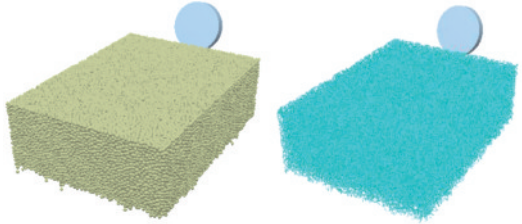
(a) 岩石单轴压缩排布(一) (b) 岩石单轴压缩排布(二)

图1 试验岩石排布示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental rock arrangement

由图1可知，此时岩石颗粒的法向接触刚度为400 MN/m³，切向接触刚度为300 MN/m³，临界法向应力为40 kPa，临界切向应力为20 kPa。

设置切削角度为30°，切削深度为2 mm，调整切削速度为2 m/s，切削行程为20 mm，切削时间为2 ms，完成参数标定，利用bonding模型[9]进行粘结，使用SolidWorks绘制切削齿，构建的试验切削模型如图2所示。



(a) 模型 (b) 颗粒粘结

图2 试验切削模型

Fig.2 Experimental cutting model

结合图2模型赋予的切削直径为13.44 mm，切削速度为2 m/s，为后续的应力变化规律分析打下基础。

2 试验过程

利用CAD进行三维仿真建模，结合岩石参数与拟合度完成校核处理，利用Gambit2.5完成模型网格划分[10]，该仿真模型的直径为35 mm，高为80 mm。利用离散元方法进行力学模拟，结合岩石颗粒的粘结关系确定法向约束状态，构建的岩石颗粒接触模型如图3所示。

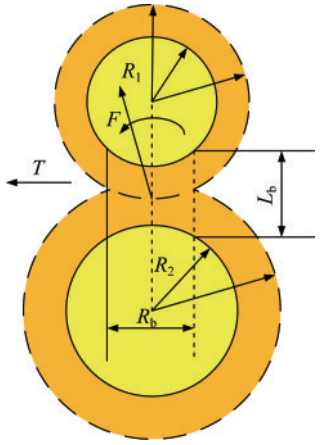


图3 岩石颗粒接触模型

Fig.3 Rock particle contact model

由图3可知，岩石颗粒接触模型满足力矩的协同关系，其约束强度与法向切力、切向应力有关。

3 试验结果与讨论

3.1 PDC复合冲击钻下岩石破碎切削应力时间变化结果

对标定参数进行离散元处理，此时的岩石颗粒泊松比为0.25，剪切模量适中，密度为2 500 kg/m³，利用PDC复合冲击钻单切削齿进行切削处理，得到的岩石破碎切削力时间变化结果如图4所示。

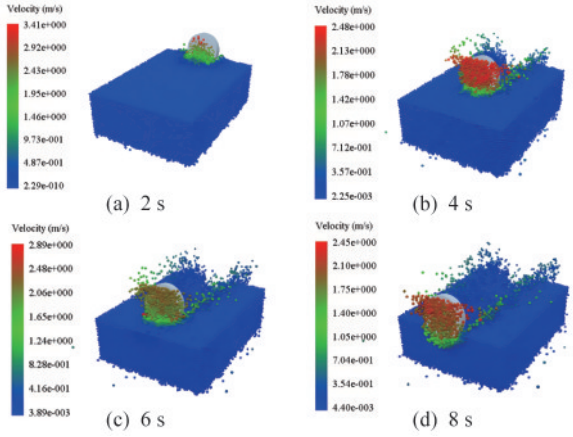


图4 岩石破碎切削应力时间变化结果

Fig.4 Time variation results of rock fragmentation and cutting stress

由图4可知，在PDC复合冲击钻钻进的过程中，随时间增长切削应力短暂上升，在一定时间内保持稳定后迅速到达峰值，再持续下降逐渐趋于稳定，由此可知，冲击钻钻进时间对切削应力有重要影响，存在切削时间峰值。本研究对同一组参

数设置(切削前倾角 30°,切削深度 2 mm,切削速度 2 m/s,切削齿直径 13.44 mm)进行了 5 次重复试验。每次试验均重新生成岩石颗粒模型并执行完整的切削过程。对 5 次试验在同一时间点记录的切削应力数据进行分析,计算其平均值与标准差。结果表明,切削应力随时间的变化趋势高度一致,峰值应力平均值为 285 kPa,标准差为±8.5 kPa。稳定阶段的平均切削应力为 115 kPa,标准差为±4.2 kPa。这组数据说明,在严格控制仿真参数的条件下,重复试验结果的离散性较小,图 4 所呈现的曲线具有较好的可重复性与可信度。

3.2　PDC 复合冲击钻下岩石破碎方式应力变化结果

设置法向接触刚度为 200 MN/m^3,切向接触刚度为 150 MN/m^3,临界法向应力为 20 kPa,进行参数标定模拟,在 PDC 复合冲击钻扭转冲击钻进、常规钻进以及牙轮钻钻进下得到的岩石破碎方式应力变化结果见表 3。

表 3　　岩石破碎方式应力变化结果

Table 3　Stress variation results of rock fragmentation methods

前倾角/(°)	扭转冲击钻进岩石破碎应力/MPa	常规钻进岩石破碎应力/MPa	牙轮钻钻进岩石破碎应力/MPa
10	80	50	68
15	90	62	77
20	98	68	79
25	102	71	85
30	128	83	96
35	153	91	113
40	178	102	134

由表 3 可知,与常规钻进岩石破碎应力、牙轮钻钻进岩石破碎应力相比,扭转冲击钻进方式下的岩石破碎应力最高,且随前倾角增加缓步增加,由此可知,扭转冲击钻进方式的岩石破碎效果更好。

3.3　PDC 复合冲击钻下岩石破碎切削深度应力变化结果

将原始切削角度设置为 0°,切削直径固定在 13.44 mm,以 2 m/s 速度切削,总行程为 20 mm,设置的切削深度依次为 1.0 mm、1.5 mm、2.5 mm、3.0 mm、3.5 mm、4.0 mm,得到的岩石破碎切削深度变化结果如图 5 所示。

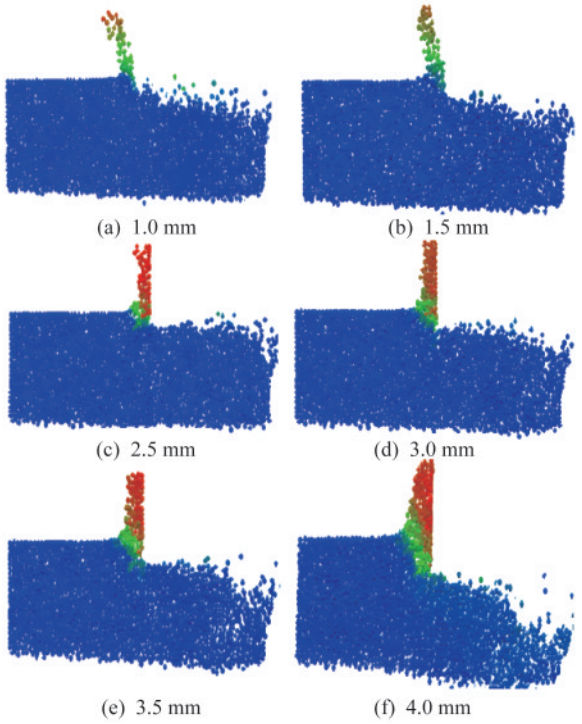


图 5　岩石破碎切削深度变化结果

Fig.5　Results of changes in rock fragmentation cutting depth

由图 5 可知,随着切削深度增加,平均切削力随之增长,当切削深度在 2.5~4.0 mm 之间时,平均切削应力满足线性增长要求,切削接触面积有所增加,在 2.5 mm 时相同体积岩石破碎平均切削力呈最小值,钻进效率最佳。为评估切削深度对应力影响的可靠性,对 1.0 mm~4.0 mm 区间内的 6 个不同切削深度工况分别进行了 3 次独立重复试验。每次试验均保持切削角度为 0°、切削速度为 2 m/s、切削齿直径为 13.44 mm 的基准条件。结果表明,平均切削力随切削深度增加而增长的规律在不同次试验中均稳定呈现。以关键深度 2.5 mm 为例,3 次重复试验测得的平均切削力分别为 152 N、148 N 和 155 N,其平均值为 151.7 N,标准差为±3.5 N。该深度下数据离散度最小,与文中所述该处钻进效率最佳的结论相互印证,证明了该结论的稳健性。

掘进效率的核心评价指标之一是比能,即破碎单位体积岩石所消耗的能量,其值越低代表破岩能量效率越高。比能的计算公式为:比能=切削功/破碎岩石体积。本研究计算了各深度下的比能,计算中,切削功由平均切削力与切削行程的乘积得出,破碎岩石体积由切削深度、有效切削宽度和切削行程的乘积得出。计算结果表明,当切

削深度为1.0 mm时，比能约为63.2 MJ/m³；深度为1.5 mm时，比能约为57.0 MJ/m³；深度为2.0 mm时，比能约为51.3 MJ/m³。在切削深度为2.5 mm时，比能计算值达到最低，约为45.2 MJ/m³。此后，随着切削深度继续增加至3.0 mm、3.5 mm和4.0 mm，比能值分别回升至约49.9 MJ/m³、51.8 MJ/m³和52.3 MJ/m³。

3.4 PDC复合冲击钻下岩石破碎切削角度应力变化结果

保持切削直径不变，消除侧倾角，设置切削深度为2.5 mm，切削速度为2 m/s，设置前倾角依次为0°、5°、10°、15°、20°、25°，得到的岩石破碎切削角度应力变化结果如图6所示。

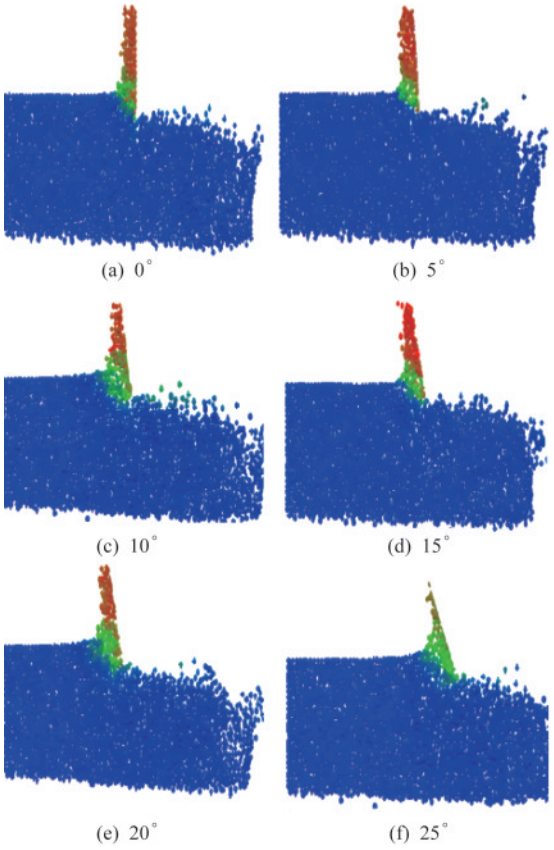


图6 岩石破碎切削角度应力变化结果

Fig.6 Stress variation results of rock fragmentation cutting angle

由图6可知，随着岩石破碎前倾角变化，平均切削应力呈先减小后增加趋势，前倾角为25°时的切削应力最高，前倾角为5°时的切削应力最低，此时的破岩效果最好。对于切削前倾角的影响研究，在0°至25°范围内设置的每个角度点均完成了4次重复试验，试验固定切削深度为2.5 mm、切削速度为2 m/s。数据分析显示，平均切削应力随前倾角变化呈先降后升的趋势，具有高度可重复性。特别是在最优角度5°处，4次试验获得的平均切削应力值分别为98 MPa、95 MPa、102 MPa和96 MPa，其平均值为97.8 MPa，标准差为±3.1 MPa。这一结果显著低于其他角度，有力地支持了前倾角为5°时破岩效果最好的研究发现，确保了结论的可靠性。

3.5 PDC复合冲击钻下岩石破碎切削齿直径应力变化结果

调整钻压条件，在现场地层环境有效的基础上设置8 mm、13.44 mm、16.1 mm三种不同直径的切削齿，得到的岩石破碎切削齿直径应力变化结果如图7所示。

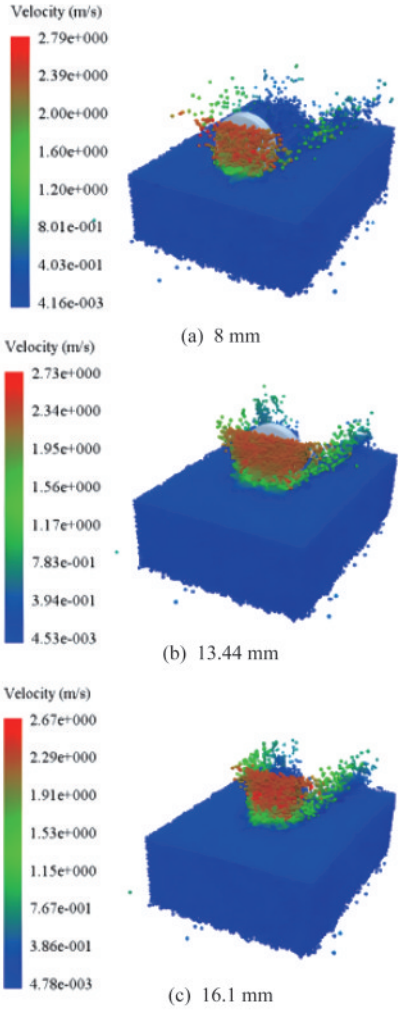


图7 岩石破碎切削齿直径应力变化结果

Fig.7 Stress variation results of rock fragmentation cutting tooth diameter

由图7可知，切削齿直径越小，则其承受的破碎应力越高，在相同切削深度的情况下，小直径切削齿的荷载也相对更高，岩石更容易发生破碎，因此，在满足地质条件的基础上应尽量选取小直径切削齿执行岩石破碎任务。

关于不同切削齿直径下的应力变化结果，针对 8 mm、13.44 mm 及 16.1 mm 三种直径的切削齿，每种工况均独立重复进行了3次试验，记录每次试验达到稳定破碎状态后的平均切削应力。对于直径为 8 mm 的切削齿，其平均破碎应力为 320 MPa，3次重复试验的标准差为±10.2 MPa。直径为13.44 mm时，平均应力为235 MPa，标准差为±7.8 MPa。直径为 16.1 mm 时，平均应力为195 MPa，标准差为±6.5 MPa。误差分析显示，随着切削齿直径增大，其承受的破碎应力显著降低，且各直径下的重复试验数据波动范围可控，进一步证实了切削齿直径对应力影响的规律是稳定和可靠的。

本研究的核心目标在于聚焦钻头与岩石相互作用的基本规律，剥离复杂地质环境变量，从而清晰揭示切削参数对应力变化的独立影响。这种简化是离散元方法在机理探索阶段的常见处理方式，有利于深入理解破碎过程的本质。当前模型将岩体视为连续均质介质，未能体现原始地应力对裂纹扩展方向的约束作用，也未考虑节理面等弱面对应力波传播的干扰及岩体整体强度的削弱效应，这导致模拟中的破碎模式可能与深部高地应力场或强烈节理化岩层中的实际情况存在偏差。这些简化处理确实在一定程度上影响了研究结论向野外钻探场景的直接推广。未来的工作将把地应力作为关键变量纳入模型，并尝试构建含预设节理网络的非连续岩体，以提升模拟的工程贴合度。尽管存在上述不足，本工作所揭示的切削参数对应力分布的影响趋势仍具有基础参考价值，为后续纳入更复杂地质条件的研究奠定了基础。

4 结 论

本文考虑不同影响因素，建立了试验切削模型。结果表明，冲击钻钻进时间对切削应力有重要影响，存在切削时间峰值；扭转冲击钻进方式下的岩石破碎应力最高，且随前倾角增加缓步增加；随着切削深度增加，平均切削力随之增长，在2.5 mm时相同体积岩石破碎平均切削力呈最小值，钻进效率最佳；随着岩石破碎前倾角变化，平均切削应力呈先减小后增加趋势，前倾角为5°时的切削应力最低，破岩效果最好。切削齿直径越小，则其承受的破碎应力越高。研究PDC复合冲击钻下的岩石破碎过程应力变化规律，可以为优化钻井工艺，推动切削制造工艺进步作出一定的贡献。

参 考 文 献

[1] 解淑英.基于有限元法的汽车发动机连杆应力与疲劳分析模型及应用[J].微型电脑应用，2022，38(10)：32-34，49.
Xie Shuying. Analysis model and application of stress and fatigue for connecting rod of automobile engine based on finite element method [J]. Microcomputer Applications，2022，38(10)：32-34，49.(in Chinese)

[2] 傅鹤林，赵一博，王立志，等.基于PSO-SVR算法的悬臂式掘进机工作性能预测[J].铁道工程学报，2024，41(9)：92-98.
Fu Helin，Zhao Yibo，Wang Lizhi，et al. Performance prediction of roadheader by PSO-SVR algorithm [J]. Journal of Railway Engineering Society，2024，41(9)：92-98.(in Chinese)

[3] 杨阳，杨仁树，陈骏，等.岩石爆破基础理论研究进展与展望Ⅰ—本构关系[J].工程科学学报，2024，46(11)：1931-1947.
Yang Yang，Yang Renshu，Chen Jun，et al. Advancements and future prospects in the fundamental theories of rock blasting research Ⅰ-constitutive relationships [J]. Chinese Journal of Engineering，2024，46(11)：1931-1947.(in Chinese)

[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 Yongwang，Li Kun，Guan Zhichuan，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.(in Chinese)

[5] 吴怡，幸雪松，陈杰，等.海上深部硬地层裸眼侧钻PDC异形齿冲击破岩机理研究[J].石油钻探技术，2025，53(3)：106-114.
Wu Yi，Xing Xuesong，Chen Jie，et al. Study on rock

breaking mechanism of special-shaped PDC teeth for open-hole sidetracking in offshore deep hard formations[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2025, 53(3):106-114.(in Chinese)

[6] 赵环帅,潘永泰,乔鑫,等.不同加载速率下青砂岩破裂演化规律及能量利用效率分析[J].煤田地质与勘探,2024,52(6):69-78.

Zhao Huanshuai, Pan Yongtai, Qiao Xin, et al. Fracturing evolutionary law and energy utilization efficiency of green sandstones under different loading rates[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(6): 69-78.(in Chinese)

[7] 秦承帅,孙洪斌,李利平,等.复合冲击作用下PDC钻齿破岩过程连续非连续数值模拟研究[J].煤田地质与勘探,2023,51(9):109-120.

Qin Chengshuai, Sun Hongbin, Li Liping, et al. Continuous and discontinuous numerical simulation of the rock breaking process of PDC drill bit under composite impact[J]. Coal Geology & Exploration, 2023,51(9):109-120.(in Chinese)

[8] 席岩,王皓宇,齐悦,等.复合冲击相位差对破岩效率影响数值模拟研究[J].石油机械,2023,51(3):40-48.

Xi Yan, Wang Haoyu, Qi Yue, et al. Numerical simulation on effects of phase difference on rock-breaking efficiency under compound impact[J].China Petroleum Machinery, 2023, 51(3): 40-48.(in Chinese)

[9] 李萍丰,王秀龙,闫小兵,等.柱状药包侧向爆破下抵抗线对岩石破碎特性的影响研究[J].岩土力学,2024,45(5):1388-1396.

Li Pingfeng, Wang Xiulong, Yan Xiaobing, et al.Effects of burden on rock crushing characteristics under lateral detonation of cylindrical charges[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(5): 1388-1396.(in Chinese)

[10] 张皓诣,张蒙祺,莫继良,等.不同刃型TBM滚刀载荷与振动特性实验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(4):1340-1350.

Zhang Haoyi, Zhang Mengqi, Mo Jiliang, et al. Experimental study on load and vibration characteristics of TBM cutters with different cutter profiles [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55 (4): 1340-1350.(in Chinese)