

# 岩石物性影响下切削齿破岩特征及动力学响应 数值模拟研究

张菲菲<sup>1,2</sup>, 杨馥源<sup>1,2</sup>, 张 聪<sup>1,2\*</sup>, 王建龙<sup>3</sup>

(1. 长江大学石油工程学院, 湖北 武汉 430100; 2. 油气钻采工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430100; 3. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司工程技术研究院, 天津 300450)

**摘要:**随着我国对非常规地质能源勘探开发力度的持续加大, 深层及复杂岩性地层的钻井作业日益频繁。在这一背景下, 实现高效、经济、安全的钻井作业已成为行业关键课题, 而钻探技术与装备的智能化、精准化提升则是其核心推动力。其中, 切削齿作为钻头直接参与岩石破碎的核心单元, 其与岩石之间的相互作用机制是影响钻头结构设计、钻进参数决策及整体钻进效率的关键因素。因此, 本文聚焦PDC钻头切削齿的破岩过程, 采用ABAQUS有限元软件, 建立了二维PDC齿破岩过程数值模型, 系统探究了岩石物理性质对破岩机理及切削齿动力学响应的影响。通过分别引入Drucker-Prager破坏准则与Cohesive单元模型, 模拟了切削齿破岩过程中的岩石裂纹萌生、扩展及断裂行为。研究分析了在不同岩石物性、岩性条件下的切削力与振动加速度响应特征。结果表明, 岩石抗压强度对切削力及振动响应影响最为显著, 内摩擦角次之, 弹性模量影响相对较小; 针对岩石物性参数系统即不同岩性的平均切削力排序为花岗岩>砾岩>石灰岩>砂岩, 且振动加速度与平均切削力呈正相关。该研究为基于钻头动态响应的岩石物理参数识别提供了理论依据, 对非常规地质能源深部钻井的参数优化、地层岩性识别及智能钻井技术发展具有重要意义。

**关键词:** PDC钻头; 切削齿; 数值模拟; 动力学响应; 切削力; 振动加速度; 岩性识别; 智能钻井; 非常规能源

**中图分类号:** TE21; P634.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)02-0047-10

## Numerical simulation study on the characteristics and dynamic response of PDC cutter breaking rock under the influence of rock physical properties

ZHANG Feifei<sup>1,2</sup>, YANG Fuyuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Cong<sup>1,2\*</sup>, WANG Jianlong<sup>3</sup>

(1. School of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan Hubei 430100, China; 2. Hubei Key Laboratory of Oil and Gas Drilling and Production Engineering (Yangtze University), Wuhan Hubei 430100, China; 3. Engineering Technology Research Institute, CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Tianjin 300450, China)

**Abstract:** With the continuous intensification of the exploration and development of unconventional energy resources in our country, drilling operations in deep and complex lithologic strata are becoming increasingly frequent. Against this backdrop, achieving efficient, economical and safe drilling operations has become a key issue in the industry, and the

收稿日期: 2025-12-16; 修回日期: 2026-01-14 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.02.005

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项课题(编号: 2024ZD1000808); 国家自然科学基金青年科学基金项目(编号: 42502226); 深部探测与成像全国重点实验室开放课题(编号: DEE120251231); 湖北省科学技术厅重点研发计划项目(编号: 2023BCB111)

第一作者: 张菲菲, 男, 汉族, 1988年生, 教授, 博士生导师, 地质工程专业, 博士, 主要从事井眼清洁、智能钻井监控等技术研究, 湖北省武汉市蔡甸区大学路111号, feifei-zhang@yangtzeu.edu.cn。

通信作者: 张聪, 男, 汉族, 1997年生, 讲师, 地质工程专业, 博士, 主要从事钻头破岩提速、智能钻井等技术研究, 湖北省武汉市蔡甸区大学路111号, zhangcong@yangtzeu.edu.cn。

引用格式: 张菲菲, 杨馥源, 张聪, 等. 岩石物性影响下切削齿破岩特征及动力学响应数值模拟研究[J]. 钻探工程, 2026, 53(2): 47-56.

ZHANG Feifei, YANG Fuyuan, ZHANG Cong, et al. Numerical simulation study on the characteristics and dynamic response of PDC cutter breaking rock under the influence of rock physical properties[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(2): 47-56.

intelligent and precise improvement of drilling technology and equipment is the core driving force. The PDC cutter, as the core unit of the drill bit that directly participates in rock breaking, and its interaction mechanism with the rock is a key factor affecting the structural design of the drill bit, the decision-making of drilling parameters, and the overall drilling efficiency. Therefore, this paper focuses on the rock-breaking process of PDC cutters, and uses ABAQUS finite element software to establish a two-dimensional numerical model of the rock-breaking process of the PDC cutter, systematically exploring the influence of rock physical properties on the rock-breaking mechanism and the dynamic response of the cutter. By introducing the Drucker-Prager failure criterion and the Cohesive element model, the rock crack initiation, propagation and fracture behavior during the rock-breaking process of the cutter were simulated. The study analyzed the response characteristics of cutting force and vibration acceleration under different rock physical properties and lithology conditions. The results show that the compressive strength of the rock has the most significant influence on the cutting force and vibration response, followed by the internal friction angle, and the elastic modulus has a relatively small influence. The average cutting force of different lithologies is ranked as granite > conglomerate > limestone > sandstone, and the vibration acceleration is positively correlated with the average cutting force. This research provides a theoretical basis for the identification of rock physical parameters based on the dynamic response of drill bits, with important implications for the parameter optimization of deep drilling for unconventional energy resources, the identification of formation lithology and the development of intelligent drilling technology.

**Key words:** PDC bit; cutter; numerical simulation; dynamic response; cutting force; vibration acceleration; lithology identification; intelligent drilling; unconventional energy resources

## 0 引言

随着全球能源需求的增长与浅层资源的枯竭,向地球深部进军已成为保障国家能源安全的重大战略<sup>[1]</sup>。深地油气钻井工程因此成为前沿领域,随着我国对非常规地质能源勘探开发力度的持续加大,深层及复杂岩性地层的钻井作业日益频繁。但其面临着极端高温高压、复杂地层等严峻挑战,传统钻井决策存在“盲钻”风险<sup>[2]</sup>,这导致机械钻速降低、工具磨损加快、钻井成本剧增。为实现深地油气资源的经济高效开发,亟待发展能够适应极端复杂地层、具备智能感知与决策能力的新一代钻井技术,其核心在于如何实时、精确地感知地下岩层信息。传统的随钻测井技术虽能提供部分地层信息,但其传感器通常位于钻头后方数米至数十米,存在信息滞后和探测“盲区”等问题<sup>[3]</sup>。因此,通过钻头自身与岩石相互作用过程中产生的动态响应实时反演地层特性,成为智能钻井领域的前沿课题<sup>[4]</sup>。

近年来,聚晶金刚石复合片钻头(PDC钻头)以其在钻进中软至中硬地层的高效性,使用率越来越高<sup>[5]</sup>。在此背景下,PDC钻头动态响应特征构成了揭示地下复杂地质环境的关键数据来源。研究表明这些信号是岩石物理性质的直接反映,例如仿真分析表明软硬交错地层的倾角与软硬程度会显著影响钻头所受反力的平均值与冲击峰值<sup>[6]</sup>;实验研究则能通过分析扭矩、机械比能等参数,有效区分

不同类型裂缝,现场与测井符合率超过82%<sup>[7]</sup>。但由于PDC齿破岩过程中的岩石损伤演化与切削齿动力响应难以直接观测,因此,数值模拟方法成为深入研究该复杂力学行为的有效途径。通过建立PDC齿破岩有限元模型,可以系统、可控地研究单一及多因素耦合作用下,切削齿的受力状态、裂纹扩展规律及振动响应特征<sup>[8]</sup>。马清明等<sup>[9]</sup>建立了基于摩擦接触的有限元数值模型,采用黏滑摩擦模型表征接触界面的力学行为,系统探究了切削深度与前倾角对PDC齿受力分布的影响规律。Deng等<sup>[10]</sup>基于显式动力学求解方法与动态损伤本构模型,建立了PDC齿破岩的有限元数值模型,系统研究了PDC齿切削过程中岩石的损伤演化与裂纹扩展规律,并分析了前倾角与切削深度等参数对破岩过程的影响。祝效华等<sup>[11]</sup>利用有限元数值模拟分析了PDC齿切削角度与破碎效果之间的关联。况雨春等<sup>[12]</sup>采用离散元软件PFC3D,通过虚拟巴西劈裂与单轴压缩试验标定了岩石本构模型参数,并据此构建了PDC切削齿破岩数值模型,定量分析了切削力与侧倾角的关系,并与有限元模拟结果进行了对比验证。Sun等<sup>[13]</sup>采用实验与有限元-离散元耦合模拟方法,研究了PDC齿动态冲击破岩行为,该成果为深部硬岩高效冲击钻井的参数优化提供了理论依据。Zhang等<sup>[14]</sup>采用实验室试验与FDEM数值模拟相结合的方法,系统研究了岩石细观结构非均质

性的变形破坏特性及裂纹演化过程,揭示了非均质岩体对岩石力学行为和破坏机制的关键影响。除此之外,围绕PDC齿破岩效率的提升,现有研究主要沿着工具革新与方法创新两条路径展开。在工具层面,王虎等<sup>[15]</sup>系统总结了异形PDC齿的研究与应用进展,并通过优化切削齿的几何形状与布置方式适应不同岩层,以此间接应对岩石物性的变化。在方法层面,赵研等<sup>[16]</sup>探讨了超声波振动辅助PDC切削技术,该研究通过引入高频外部能量场,仿真分析了振动参数下的岩石动态响应,该技术显著改变了岩石的破碎模式和受力状态。

综上,当前研究多立足于岩石破碎效果及工具方法研究,而针对岩石具体物性参数(如抗压强度、弹性模量、内摩擦角等)对PDC齿破岩特征及动力学响应的影响机制研究较少。据此,本文的创新点在于:基于数值模拟方法,揭示了不同物性参数下PDC齿切削力、振动加速度等响应信号的变化规律及其内在关联;并通过对比分析不同岩性在破碎过程中的响应机理,明确了岩石物性参数对切削齿破岩行为与动态响应的系统性影响。研究成果阐明了岩体对PDC齿破岩作用的响应规律,为建立基于钻头动态响应的岩石物理参数识别方法提供了理论依据,对提高破岩效率具有重要意义。

## 1 切削齿破岩基本理论

### 1.1 岩石破坏准则

作为一种经典的压力相关理想弹塑性本构模型,Drucker-Prager(D-P)准则在岩土力学数值模拟分析中得到了广泛应用。该准则由于考虑了静水压力及中间主应力的影响,在研究岩石破碎失效过程中,其计算结果通常较Mohr-Coulomb模型更为精确<sup>[17]</sup>,其表达式如下:

$$f = aI_1 + \sqrt{J_2} - \delta \leq 0 \quad (1)$$

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (2)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right] + (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \quad (3)$$

式中: $f$ ——关于岩石屈服的函数; $a$ 、 $\delta$ ——均为岩石材料常数,与岩石内摩擦角、黏聚力相关; $I_1$ ——应力第一不变量; $J_2$ ——应力偏量第二不变量; $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ ——三向主应力; $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yz}$ 、 $\tau_{zx}$ ——三向切应力。

### 1.2 基于Cohesive单元的岩石裂纹扩展模型

PDC钻头钻进时,井底岩石的裂纹来源主要有两方面,一种是岩石自身的天然裂纹,另一种通过PDC齿压入和磨削产生<sup>[18]</sup>。如图1(a)所示,PDC齿运动方向前部接触的岩石受到压力的作用,形成压剪裂纹,产生岩屑并脱离岩石本体之后,PDC齿继续向前运动。由于PDC齿与岩石间摩擦力,PDC齿下部接触的岩石受到与运动方向相反的摩擦力和黏聚力作用,使该部分岩石形成拉伸裂纹,如图1(b)所示。

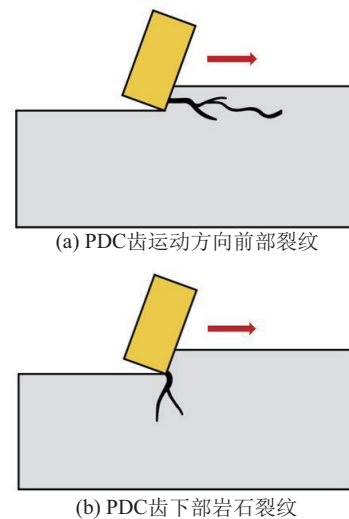


图1 PDC齿切削岩石裂纹萌生过程

Fig.1 The crack initiation process of PDC cutter cutting rocks

为模拟PDC齿前端处岩石的裂纹扩展过程,本文在建立的岩石有限元模型中全局插入Cohesive单元。Cohesive单元是一种用于模拟弹塑性材料裂纹萌生和扩展的工具,广泛用于钻头破岩数值模拟研究中<sup>[19]</sup>,其原理是在相邻元素间建立一种黏结接触关系,当应力超过一定阈值时,Cohesive单元将允许有限的相对位移发生,并模拟裂纹的扩展过程,如图2所示。

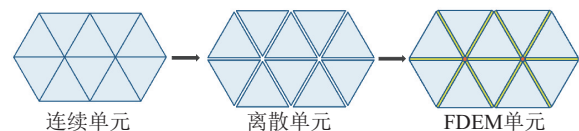


图2 基于Cohesive单元的裂纹扩展原理

Fig.2 Schematic diagram of crack propagation model based on Cohesive element

对于损伤过程,黏聚力单元中有两种牵引力:分别是法向应力和切向应力。以法向应力及其对应的裂纹张开位移为例,介绍线性黏聚力单元牵引分离模型,如图3所示。初始为弹性阶段,在该阶段单元未发生损伤;随着牵引力的增大,裂纹张开位移线性增加。当牵引力到达最大值 $t_{\max}$ 时,对应的张开位移为损伤初始位移 $\delta_0$ ,Cohesive单元开始发生损伤。随后牵引力随着张开位移的增大而线性减小,直到张开位移达到损伤失效位移 $\delta_f$ ,此时该Cohesive单元完全失效,离散单元之间完全分离。图中黄色区域面积为断裂能 $G_1$ 。

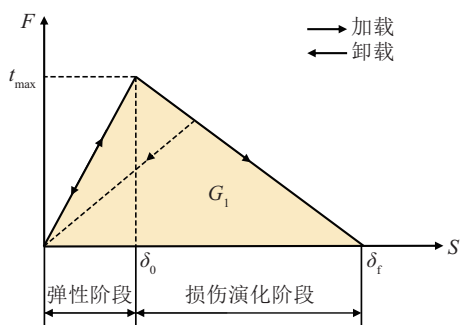


图3 损伤破坏本构关系

Fig.3 Schematic diagram of the constitutive relationship of damage and destruction

### 1.3 切削齿动力学响应

对于单个PDC齿,受到由被切削岩石的法向力与岩石PDC齿间的切向力的共同作用,单个PDC齿破岩中的受力情况如图4所示。PDC齿与岩石相互作用过程中,由于PDC齿对岩石的挤压作用,岩石会对PDC齿切削表面形成法向作用力 $F_{1n}$ 和沿切削面的切向作用力 $F_{1t}$ ,二者共同作用形成齿前作用力 $F_1$ ;并且由于岩石在PDC齿刮切作用下,会对PDC齿下部地层岩石形成法向支撑力 $F_{2n}$ 和沿着切削方向相反的切向力 $F_{2t}$ ,二者共同作用形成齿下作用力 $F_2$ 。因此,岩石施加给PDC齿的总力 $F_0$ 为齿前作用力 $F_1$ 和齿下作用力 $F_2$ 的合力。

将PDC齿受到的总力 $F_0$ 沿切削方向分解可得到切向力 $F_{0t}$ ,即PDC齿在岩石破碎时起主要作用的切削力。PDC齿切削力主要影响因素有岩石物理性质及岩性种类等,只要掌握影响切削力的主要因素,就能得出切削力变化的一般规律。

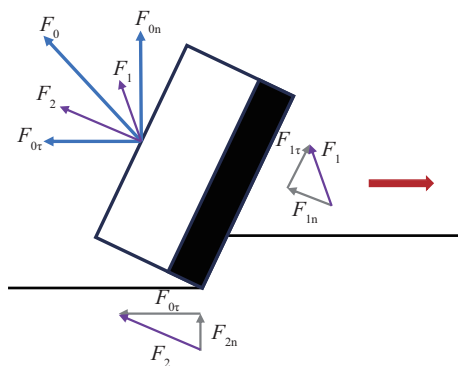


图4 单个PDC齿破岩过程中的受力

Fig.4 Schematic diagram of the force conditions of a single PDC cutter breaking rock during the process

## 2 PDC齿破岩过程数值模拟建模

本节采用基于ABAQUS软件的数值模拟方法,研究PDC齿破岩过程中钻进参数对岩层力学属性的响应特征。ABAQUS作为一套功能强大的有限元工程模拟软件,能有效处理从简单线性问题到复杂非线性问题。本文使用ABAQUS软件的显式(Explicit)动力学求解技术<sup>[20]</sup>。

### 2.1 基本假设与模型构建

鉴于PDC钻头实际工况复杂、影响因素众多,难以直接进行完整模拟,为简化仿真计算,本研究忽略次要因素,并对模型作如下基本假设:

(1)PDC切削齿的硬度与强度远大于岩石材料。

(2)忽略钻井液对钻头破岩过程的影响。

(3)采用单元删除法处理完全破碎的岩石单元,使其不影响后续钻进过程;未完全失效的岩石单元则予以保留,并视作形成的岩屑。

二维PDC齿切削破岩过程构建岩石模型时,直接利用ABAQUS自带的建模工具构建岩层与PDC齿模型,模型尺寸分别为60 mm×20 mm与4 mm×13 mm的矩形平面。对于非均质岩体岩样,为探讨其切削规律,需在PDC齿前端切削部位即岩层上部随机构建部分圆形颗粒,由于破岩时非均质岩体常伴随颗粒破碎剥落现象,因此设置圆形颗粒尺寸在0.8~1.8 mm范围内,使得颗粒尺寸不超过PDC切削齿尺寸,以确保仿真结果具有足够的真实性与可靠性。

### 2.2 材料赋予与网格划分

PDC齿的材料属性参数如表1所示。针对岩石



物性对破岩机理的影响分析,通过查阅相关资料获得花岗岩的材料属性参数,如表 1 所示。对于不同岩性条件下切削齿动力学响应特征进行分析,花岗岩、砂岩、石灰岩、砾岩及其相应 Cohesive 单元的材料属性参数<sup>[21-23]</sup>如表 2 所示,其中 Cohesive 单元的

破坏位移是一个难以精确获取且随岩性变化的参数,将其设为统一值旨在排除该参数带来的干扰,从而可以更清晰地观察和解读由抗压强度、弹性模量、内摩擦角等核心物性参数差异所主导的系统响应。

表 1 PDC 齿及花岗岩的材料属性参数  
Table 1 The material parameter properties of PDC cutter and granite

| 材 料   | 密度/(kg·m <sup>-3</sup> )                   | 弹性模量/MPa    | 泊松比       | 抗压强度/MPa | 内摩擦角/(°) |
|-------|--------------------------------------------|-------------|-----------|----------|----------|
| PDC 齿 | 3.51×10 <sup>3</sup>                       | 897000      | 0.07      |          |          |
| 花岗岩   | 2.30×10 <sup>3</sup> ~2.80×10 <sup>3</sup> | 26000~60000 | 0.26~0.29 | 100~250  | 45~60    |

表 2 不同岩石及其相应 Cohesive 单元的材料属性参数  
Table 2 Material property parameters of granite, sandstone, limestone, gravel and their corresponding Cohesive element

| 岩 石 | 离散单元                     |          |       | Cohesive 单元 |         |          |          |
|-----|--------------------------|----------|-------|-------------|---------|----------|----------|
|     | 密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 弹性模量/MPa | 泊松比   | 破坏位移/mm     | 黏聚力/MPa | 抗拉强度/MPa | 抗压强度/MPa |
| 花岗岩 | 2.50×10 <sup>3</sup>     | 40000    | 0.25  | 0.1         | 58.78   | 8.91     | 111.31   |
| 砂岩  | 2.60×10 <sup>3</sup>     | 5220     | 0.11  | 0.1         | 26.13   | 2.84     | 50.57    |
| 石灰岩 | 2.48×10 <sup>3</sup>     | 31200    | 0.17  | 0.1         | 39.24   | 6.58     | 105.95   |
| 砾岩  | 2.44×10 <sup>3</sup>     | 30610    | 0.219 | 0.1         | 25.11   | 6.05     | 61.57    |

有限元模拟分析中,对于 PDC 齿采用四面体单元划分网格,全局网格尺寸为 0.2 mm;岩石模型采用求解精度更高的三角形网格进行划分。同时,为获得较好的切削效果,有必要将岩石区域剖分成不同尺寸,在可能与钻头接触并发生破坏的区域进行网格加密。对于研究岩石物性的仿真模拟,岩石上层区域将网格尺寸设置为 0.2 mm,岩石下层区域将网格尺寸设置为 1.0 mm;对于研究不同岩性的仿真模拟,在靠近 PDC 齿区域将网格尺寸设置为 0.2 mm,远离 PDC 齿区域将网格尺寸设置为 1.0 mm,之后在网格模型中插入离散单元,以模拟岩石间隙中的黏性物质。

2.3 接触设置与边界条件

由于仅研究岩石的破碎过程,因此将 PDC 齿设置为刚体,同时定义一个 RP 点,将该点与钻头刚体进行绑定,方便后续施加载荷及结果提取。采用 ABAQUS 软件的通用接触技术,将 PDC 钻头的表面与岩石的每个节点定义为相互接触,法向接触为“硬接触”公式,切向接触选择罚函数摩擦公式,摩擦系数设定为 0.30,并考虑岩石破碎体积的表面接触特征。边界条件是在远离岩石模型两边施加完全固定约束。速度载荷通过定义的 RP 点施加在 PDC 钻头上,在分析步时间的约束下,可以模拟实

际工作中 PDC 钻头的转速。PDC 齿切削破岩数值模拟模型如图 5 所示。

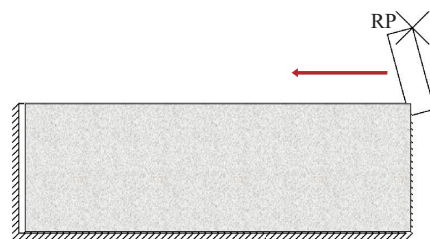


图 5 PDC 齿切削破岩数值模拟模型  
Fig.5 Schematic diagram of the numerical simulation model for PDC cutter cutting rock breaking

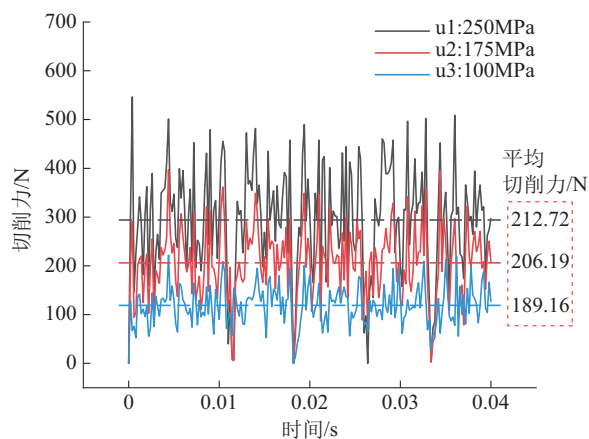
3 模拟结果与讨论

3.1 物性参数影响下切削齿动力学响应特征

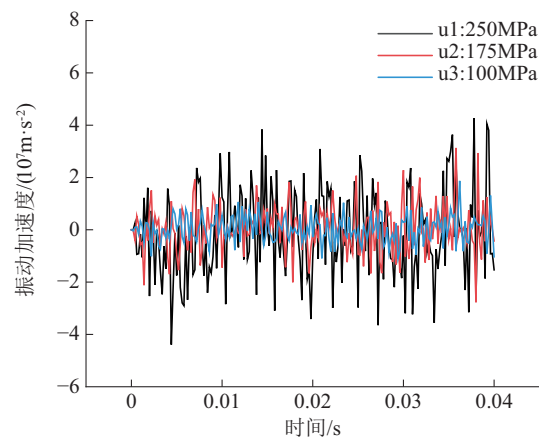
在 PDC 齿破岩过程中,岩石的抗压强度、内摩擦角、弹性模量等关键物性参数共同决定了其动态破碎机理与碎屑形貌特征。

抗压强度决定了岩石发生体积破碎的难易程度,图 6 为模拟切削不同抗压强度岩石时的切削力和振动加速度曲线。随着岩石抗压强度升高,PDC 齿动力学响应发生显著变化,直接增大了岩石发生塑性变形与宏观破碎所需的临界载荷,破岩阻力急

剧增大,如图6(a)所示。这意味着维持有效切削需输入更高的机械比能,破岩效率随之下降,且破岩过程的动态不稳定性增强。高抗压强度岩石多表现为脆性,其破碎模式从连续的塑性损伤转变为间歇性的裂纹生成与扩展。这种脆性崩裂导致PDC齿与岩石间的接触应力发生突变,引发系统振动频率升高。并且,当平均切削力显著提升时,振动加速度振动频率也随之增强,如图6(b)所示。



(a)不同抗压强度下PDC齿切削力对比



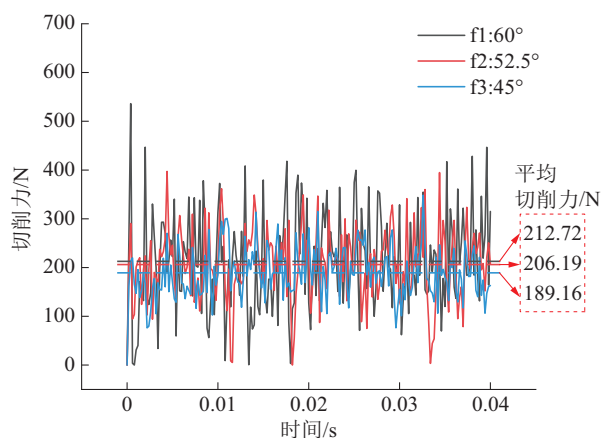
(b)不同抗压强度下PDC齿振动加速度对比

图6 切削不同抗压强度岩石时的切削力和振动加速度曲线

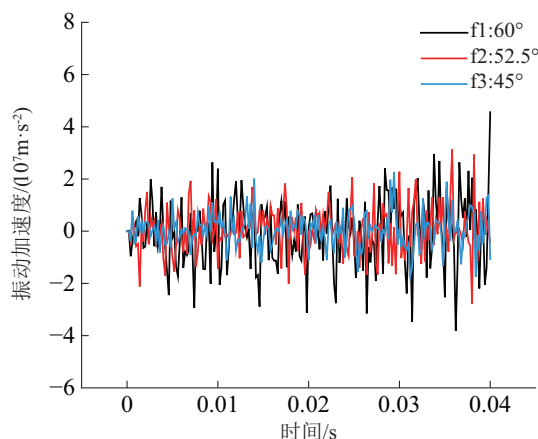
Fig.6 Curves of cutting force and vibration acceleration during cutting rocks with different compressive strengths

内摩擦角作为表征岩石剪切强度的关键参数,主要通过调控岩石的剪切破坏机制影响破岩过程。图7展示了模拟切削不同内摩擦角岩石时的切削力和振动加速度曲线。随着内摩擦角增大,岩石的抗剪切能力增强,导致切削力呈现适度上升趋势,振动加速度、振动频率随之增强,这一变化主要源于岩石在剪切过程中需克服更大的摩擦阻力,导致破

坏所需的能量输入相应增加;并且,高内摩擦角岩石往往表现出更为显著的脆性断裂特征,在刀具作用下容易发生突发性、间歇性的微观破裂,从而引起周期性载荷波动,使得破岩过程中的动力响应变化更为显著,振动频率明显升高。



(a)不同内摩擦角PDC齿切削力对比



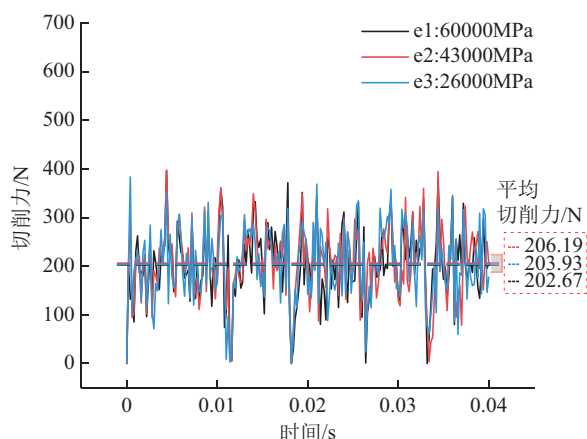
(b)不同内摩擦角PDC齿振动加速度对比

图7 模拟不同内摩擦角岩石时切削齿的切削力和振动加速度曲线

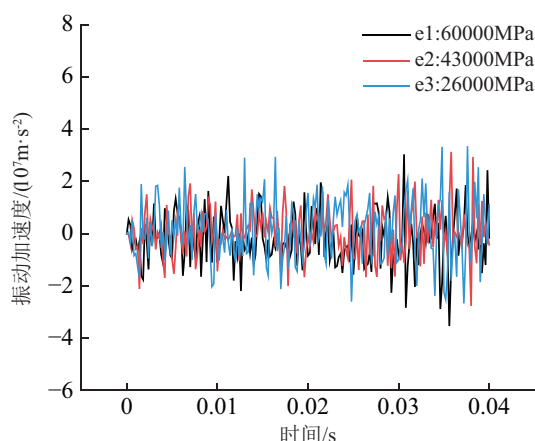
Fig.7 Curves of cutting force and vibration acceleration during cutting rocks with different internal friction angles

弹性模量主要反映岩石在弹性阶段的刚度特性,对切削力和振动加速度的直接影响相对有限,这主要是因为破岩过程本质以塑性变形和脆性断裂为主,受控于岩石的抗压强度、内摩擦角等强度参数,而非其弹性恢复能力。模拟切削不同弹性模量岩石时的切削力和振动加速度曲线如图8所示。在刀具侵入岩石的过程中,决定切削力大小的主要是岩石发生屈服和破碎所需的能量,而弹性变形阶段所储存的能量通常会在卸载时释放,并不直接贡

献于岩石的持续性破坏。因此,即便弹性模量发生变化,其对切削力的影响往往被发挥主导作用的强度参数所掩盖。在振动响应方面,弹性模量的影响同样不显著。破岩过程中的振动主要源于岩石的断续性断裂、刀具与岩石的相互作用及岩石内部的非均匀性。弹性模量虽然影响应力波在岩石中的传播速度<sup>[24]</sup>,但对断裂事件的产生频率和能量释放强度影响较小,因此振动加速度没有随弹性模量变化而发生明显的规律性改变。



(a)不同弹性模量PDC齿切削力对比



(b)不同弹性模量PDC齿振动加速度对比

图8 切削不同弹性模量岩石时的切削力和振动加速度曲线

Fig.8 Curves of cutting force and vibration acceleration during cutting rocks with different elastic moduli

### 3.2 切削齿破碎不同岩性过程及响应机理

在相同切削深度、切削角度等条件下,要达到相同的切削效果,不同岩性所需的切削力不同。本节分别针对均质、非均质岩石被切削效果及不同种类岩石切削力进行对比分析,探究不同岩性条件下切削齿动力学响应特征。

PDC齿对均质、非均质岩石的破岩过程仿真结果如图9所示。PDC齿切削破岩过程可概括为三个渐进阶段。首先,齿前岩石在集中压应力下形成压实区,并储存大量应变能;随后,该能量驱动压实区前方岩石产生微裂纹并汇成网络,形成弹塑性断裂区;最终,切削轨迹以上的岩体被剪切剥离,形成清除区,直接产生宏观岩屑<sup>[25]</sup>。对于均质岩石(砂岩、石灰岩、花岗岩),岩样的破碎程度取决于引入Cohesive单元的黏聚力。随着黏结物黏聚力的升高,岩样内部的断裂程度随之降低,这导致PDC切削齿留下的沟槽形貌更为规整、连续,且产生的岩屑总量显著减少,如图9(a)~(c)所示。与均质岩体相比,非均质岩体(砾岩)的切削过程存在显著差异。当切削齿作用于内部碎屑颗粒时,易引发颗粒的整体剥落或局部断裂。这一过程的破坏程度及模式主要取决于颗粒间联结基质中胶结物的黏聚力,如图9(d)所示。

图10为PDC齿对不同岩性岩样进行破碎时的切削力。基于PDC齿破岩机理,在该过程中切削力会呈现出先快速增长、达到峰值后迅速下降至接近零值的周期性波动特征,这一力学响应与PDC齿在实际工作过程中的破岩机理吻合,验证了模型对岩石动态断裂与切削力演化规律表征的有效性。对于均质岩石,PDC齿切削力对岩石胶结物强度十分敏感,当胶结物强度提高时,要达到相同的切削效果,所需的切削力会大幅度增加,如图10(a)所示。相较于均质岩体,PDC齿切削力对非均质岩体的响应主要与内部碎屑颗粒强度有关。砾岩作为典型的非均质岩体,本质上是由高强度砾岩颗粒与较低强度的胶结基质构成,在切削载荷作用下,基质区域先发生屈服与局部破碎,形成初始损伤区,而坚硬的砾岩颗粒则在应力集中达到其强度极限时发生脆性断裂或整体崩解。这种破坏过程是切削力出现急剧升高的根本原因,之后破碎效果与破岩机理类似,如图10(b)所示。在不同岩性条件下,PDC齿的平均切削力对比如图10(c)所示,在周期性破碎过程中,PDC齿在切削不同岩石时所表现出的平均切削力由高至低为:花岗岩>砾岩>石灰岩>砂岩。这一排序直观反映了岩石多种属性协同作用形成了不同程度的宏观抗破碎能力,也与图10(a)、10(b)中所示的切削力波动幅度与频次特征相一致,进一步印证了平均切削力作为评价岩石可钻性



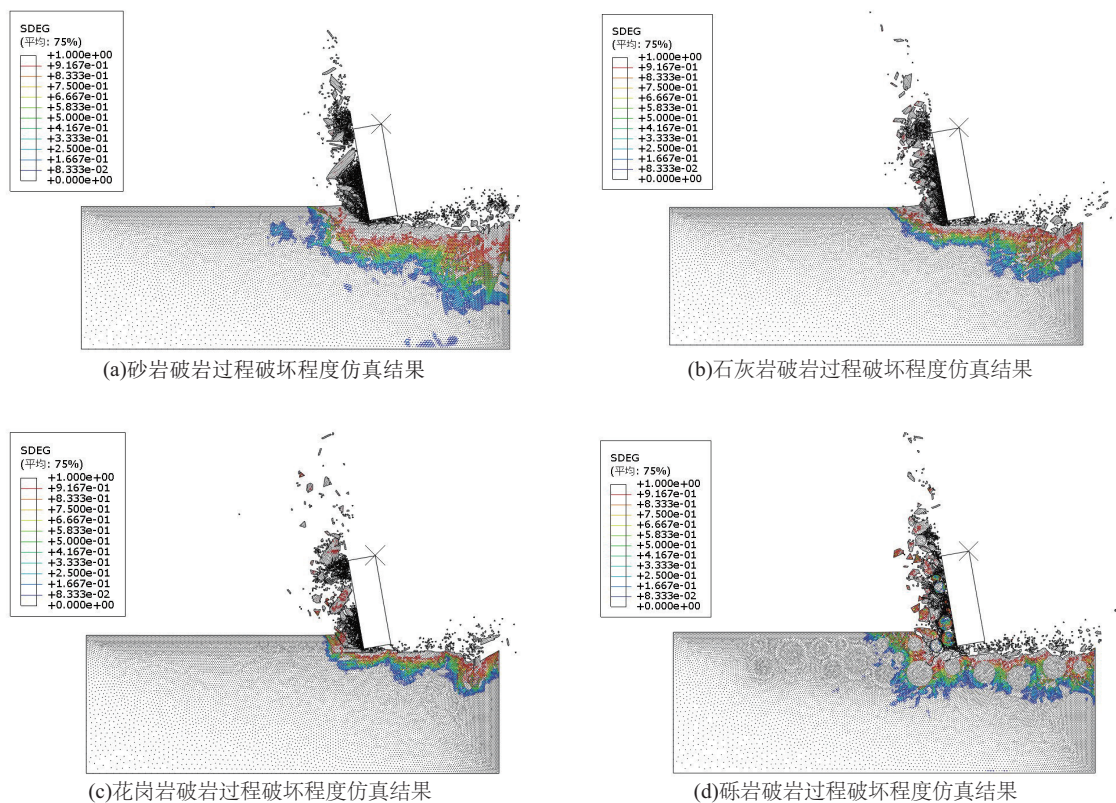


图9 PDC齿对均质、非均质岩石的破岩过程仿真结果

Fig.9 Schematic diagram of the simulation results of the rock breaking process of homogeneous and heterogeneous rock

与破碎能耗的关键指标的有效性。

除平均切削力外,PDC齿的振动加速度也是表征不同岩性条件下切削系统动力学行为的关键指标之一。PDC齿的振动加速度特征与平均切削力存在明确的关联性,是岩石宏观抗破碎能力在动力学响应上的直接体现。如图11所示,在不同岩性条件下,振动加速度随平均切削力的升高通常伴随整体性、持续性的振动加剧,且振动幅值随之提升,由RMS值得切削相应岩石时振动加速度整体波动强度由高到低为:花岗岩( $7.2 \times 10^5 \text{ m/s}^2$ )>砾岩( $6.2 \times 10^5 \text{ m/s}^2$ )>石灰岩( $3.6 \times 10^5 \text{ m/s}^2$ )>砂岩( $2.3 \times 10^5 \text{ m/s}^2$ ),这直接反映了平均切削力所表征的岩石综合抗破碎能力。

#### 4 结论

本文采用Cohesive单元与Drucker-Prager准则建立了PDC齿在不同岩石物性与岩性下的二维切削模型,分析了研究岩石物性与不同岩性条件下PDC齿的切削力与振动加速度响应特征,得到了岩体对PDC齿破岩机理的响应规律。

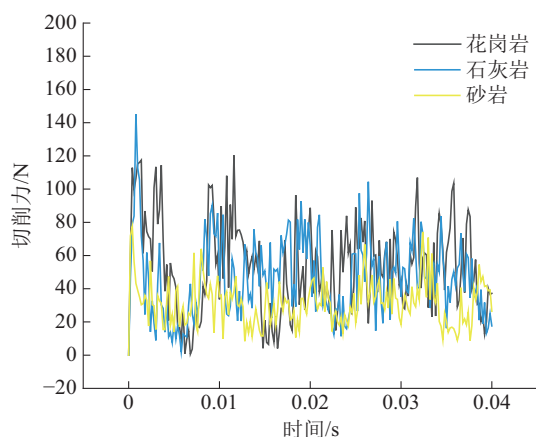
(1)不同岩石物性参数对破岩机理的影响程度存在显著差异,其影响程度按从大到小排序为:抗压强度>内摩擦角>弹性模量。具体表现为:抗压强度对切削力与振动加速度的影响最为显著,其增大会直接加剧破岩过程的动态不稳定性;内摩擦角的影响次之,同样会提升切削力与振动响应,但增长幅度相对较小;而弹性模量对切削力和振动响应的影响相对较小。

(2)在相同切削条件下,切削不同岩性岩层表现出明显的动力学响应差异:平均切削力由高至低为:花岗岩>砾岩>石灰岩>砂岩;均质岩体破岩过程满足PDC齿破岩机理,非均质岩体(如砾岩)的破岩过程呈现颗粒剥落与局部断裂特征,且切削力波动更为剧烈。

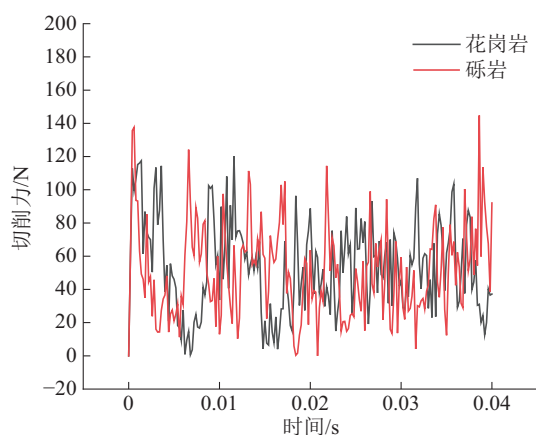
(3)振动加速度与平均切削力密切相关,振动响应随平均切削力的增加而增强,这表明振动加速度可作为评价岩石可钻性与破岩能耗的重要动力学指标。

(4)研究成果为智能钻井与岩性识别提供了理论支持,通过钻头动态响应反演岩石物理参数,并

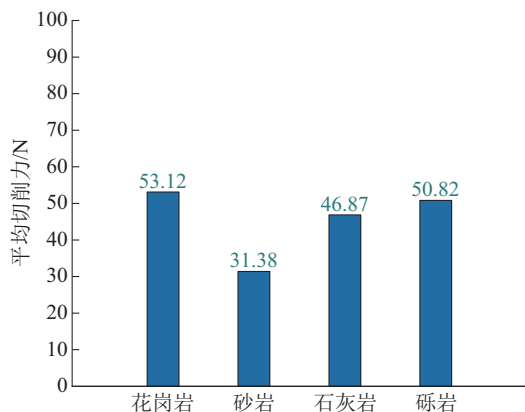




(a) 均质岩石PDC齿破岩过程切削力对比



(b) 非均质岩石PDC齿破岩过程切削力对比



(c) 不同岩性岩石PDC齿破岩过程平均切削力对比

**图10 PDC齿对不同岩性岩样破岩过程的切削力**  
**Fig.10 Schematic diagram of the cutting force of PDC cutter in the rock-breaking process for rock samples of different lithologies**

通过动力学响应参数时域、频域特征分析建立振动信号与岩性映射关系,有望实现钻进过程的实时感知与优化控制,从而提升深部钻井效率与安全性。

综上,本研究通过数值仿真初步阐明了岩石物

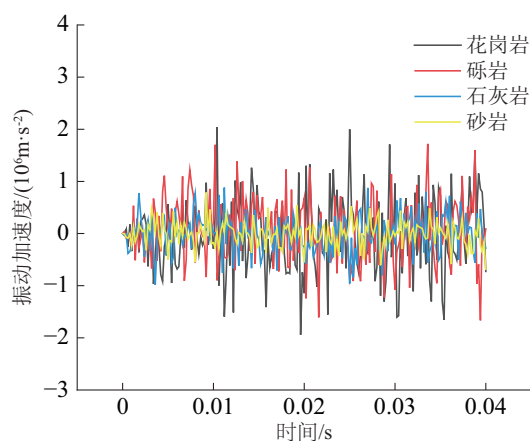


图11 PDC齿对不同岩性岩样破岩过程的振动加速度

**Fig.11 Schematic diagram of the vibration acceleration of PDC cutter in the rock-breaking process for rock samples of different lithologies**

性对破岩动力学行为的影响规律,为后续研究建立了基础分析框架。尽管选取了花岗岩、砾岩、石灰岩和砂岩四类典型岩性进行模拟,但尚未完全考虑实际地层中常见的非均质性、层理及节理等地质特征,因此模型在复杂地质条件下的适用性仍有待探讨。此外,研究目前缺乏实验室切削试验或现场钻进数据的支持,仿真所得的切削力、振动频率等关键参数尚未与实测结果进行对比验证,在后续工作中,模型的合理性与可靠性需通过试验进一步检验。

#### 参考文献 (References):

- [1] 谭宾,张斌,陶怀志.深地勘探钻井技术现状及发展思考[J].钻采工艺,2024,47(2):70-82.  
TAN Bin, ZHANG Bin, TAO Huaizhi. Status and development considerations of deep earth exploration drilling technology [J]. Drilling & Production Technology, 2024, 47(2): 70-82.
- [2] 胡文革. 顺北油气田“深地工程”关键工程技术进展及发展方向[J].石油钻探技术,2024,52(2):58-65.  
HU Wenge. Progress and the way forward of key engineering technologies for "deep underground engineering" in Shunbei oil and gas field [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(2): 58-65.
- [3] 李丰丰,蔡文渊,倪小威,等.过井眼洞穴型地层钻头电阻率测井响应特征分析[J].石油物探,2023,62(5):990-998.  
LI Fengfeng, CAI Wenyuan, NI Xiaowei, et al. Response in at-bit resistivity logging for cavernous formations through the borehole [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2023, 62(5): 990-998.
- [4] 岳小磊,岳中文,马文彪,等.基于数字钻进的层状岩体界面及岩石强度识别试验研究[J].采矿与安全工程学报,2025,42(2):440-451.

- YUE Xiaolei, YUE Zhongwen, MA Wenbiao, et al. Experimental study on identification of layered rock mass interface and rock strength based on digital drilling[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2025, 42(2): 440-451.
- [5] 沈飞. 基于钻头与岩石相互作用的切削齿磨损机理仿真研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2024.
- SHEN Fei. Simulation study on cutting tooth wear mechanism based on the interaction between drill bit and rock[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2024.
- [6] 文国军, 张冯豆, 贺鑫, 等. 基于Abaqus的软硬交错地层钻进过程仿真及动态特性分析[J]. 地质科技通报, 2023, 42(5): 10-19.
- WEN Guojun, ZHANG Fengdou, HE Xin, et al. Drilling process simulation and dynamic characteristic analysis of soft-hard staggered strata based on Abaqus[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 10-19.
- [7] 毛敏, 杨毅, 张立刚, 等. 裂缝性储层PDC钻头随钻响应特征实验研究[J]. 钻采工艺, 2023, 46(1): 1-7.
- MAO Min, YANG Yi, ZHANG Ligang, et al. Experimental research on response characteristics of PDC bit in fractured formation while drilling[J]. Drilling & Production Technology, 2023, 46(1): 1-7.
- [8] 王茜, 彭冯佳, 李思洋, 等. 融合注意力机制的BiLSTM随钻岩性智能识别[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(11): 238-250.
- WANG Qian, PENG Fengjia, LI Siyang, et al. Intelligent lithology identification while drilling using BiLSTM integrating attention mechanism[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(11): 238-250.
- [9] 马清明, 王瑞和. PDC切削齿破岩受力的数值模拟研究[J]. 钻采工艺, 2006(4): 78-80, 3, 2.
- MA Qingming, WANG Ruihe. Numerical simulation study on force of pdc cutters cutting rock[J]. Drilling & Production Technology, 2006(4): 78-80, 3, 2.
- [10] Deng R, Guo E H, Chen K, et al. Study on damage law of rock by PDC cutter cutting[J]. International Core Journal of Engineering, 2019, 5(11): 145-153.
- [11] 祝效华, 李海. PDC切削齿破岩效率数值模拟研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(1): 182-191.
- ZHU Xiaohua, LI Hai. Numerical simulation on mechanical special energy of PDC cutter rock-cutting[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(1): 182-191.
- [12] 况雨春, 曾昭安, 张毅, 等. 基于离散元方法的PDC钻头破岩仿真研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(3): 835-841.
- KUANG Yuchun, ZENG Zhaoan, ZHANG Yi, et al. Simulation of PDC bit cutting rock based on discrete element method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(3): 835-841.
- [13] Sun Z W, Huang Z W, Zou W C, et al. Cracking behaviors of rocks subjected to the dynamic percussion of a single PDC cutter: a finite-discrete element study[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2025, 58(3): 3039-3071.
- [14] Zhang C Q, Liu Z J, Pan Y B, et al. Influence of amygdale on crack evolution and failure behavior of basalt[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 226: 106843.
- [15] 王虎, 胡永, 赵洪波. PDC异形齿破岩研究与应用进展[J]. 钻探工程, 2025, 52(5): 10-17.
- WANG Hu, HU Yong, ZHAO Hongbo. Research and application progress of special-shaped PDC cutters in rock breaking[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(5): 10-17.
- [16] 赵研, 张丛珊, 高科, 等. 超声波辅助PDC切削齿振动破岩仿真分析[J]. 钻探工程, 2021, 48(4): 11-20.
- ZHAO Yan, ZHANG Congshan, GAO Ke, et al. Rock breaking simulation analysis for the ultrasonic vibration-assisted PDC cutter[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(4): 11-20.
- [17] 蔡美峰, 何满朝, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 2013.
- CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan. Rock Mechanics and Engineering[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2013.
- [18] Zhang C, Zhang F F, Gao K, et al. Mechanism and optimization of outer bit leading drilling for enhanced rock-breaking efficiency in deep-sea scientific drilling[J]. Ocean Engineering, 2025, 338: 121853.
- [19] Saadat M, Taheri A. A cohesive grain based model to simulate shear behaviour of rock joints with asperity damage in polycrystalline rock[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 117: 103254.
- [20] 陈泓云. 基于随钻测量的地下工程岩性识别研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2024.
- CHEN Hongyun. Research on lithology identification of underground engineering based on measurement while drilling[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2024.
- [21] Zhang C S, Zhao Y, Gao K, et al. Numerical simulation and experimental study on rock fragmentation and crack propagation characteristics with hole enlargement under impact load[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2025, 58(3): 3015-3037.
- [22] Chen H, Chen Z L, Li X L, et al. Experimental study on conglomerate-breaking mechanism by rotary cutting with triple-ridged PDC cutters and planar PDC cutters[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2025, 246: 213595.
- [23] 杨宏宇. PDC齿作用下砾岩的损伤过程模拟及试验研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2023.
- YANG Hongyu. Simulation and experimental study on the damage process of conglomerate under PDC cutter action[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2023.
- [24] 丁宇. 岩体结构及力学特性随钻智能获取的理论与方法[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- DING Yu. Theory and method of intelligent acquisition of rock mass structure and mechanical properties while drilling[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.
- [25] Zhang C, Gao K, Lv X S, et al. Experimental study on the rock-breaking mechanism of annular-grooved structure and rotary direction for impregnated diamond bits[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2025, 249: 213812.

(编辑 王跃伟)