

超高速下单粒金刚石与岩石相互作用响应的研究

王悦^{1,2}, 张凯^{1,2}, 李其州^{1,2}, 周琴^{1,2}, 凌雪^{1,2}, 刘宝林^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 自然资源部深部地质钻探技术重点实验室, 北京 100083)

摘要:随着钻进深度的加深,破碎硬岩地层愈发困难,提高转速成为硬岩地层快速有效破碎的可行方法之一。孕镶金刚石钻头在硬岩层中具有较好的应用效果,常规转速下孕镶钻头与岩石之间相互作用机理较为完善,超高速下也有相应的应用和研究基础,但碎岩机理尚未完全清晰。为探究常规速度至超高速下单粒金刚石对岩石的切削力和硬岩的破碎变化情况,以孕镶钻头和岩石相互作用界面响应模型为基础,利用ABAQUS软件建立单粒金刚石切削岩石的二维模型,并提出一种近似分析方法,并进一步推导单粒金刚石受力表达式。结果表明:(1)单粒金刚石对岩石的切削作用主要集中在切削具与岩石接触界面的中上部,高速下比常规切削速度下单粒金刚石受切削力减小,且主要作用部位受到切削速度改变的影响。(2)金刚石颗粒作用岩石中存在塑性破坏和脆性破坏且两种破坏模式交替产生,超高速下岩石产生脆性破坏的比例相比于常规切削速度有所增加,且超高速下切削力波动范围更小,岩石破碎所需的能量更少。(3)提出一种孕镶金刚石钻头碎岩响应近似分析方法,将产生碎岩作用的金刚石颗粒等价于具有“刀尖”和“前、后刀面”的切削具进行分析,推导得到单粒金刚石受力表达式,其受力与切削速度、切削深度等因素有关。研究结果可以为提高转速切削硬岩地层的进一步研究及应用提供依据和参考。

关键词:孕镶金刚石钻头;单粒金刚石;超高速;碎岩模式转变;名义“刀尖”;碎岩响应

中图分类号:P634.1 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)03-0021-09

Research on the response of single diamond particles and rock interaction at ultra-high speed

WANG Yue^{1,2}, ZHANG Kai^{1,2}, LI Qizhou^{1,2}, ZHOU Qin^{1,2}, LING Xue^{1,2}, LIU Baolin^{1,2}

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Deep Geological Drilling Technology, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: With the deepening of drilling depth, breaking hard rock formations became more difficult, and increasing rotational speed has become one of the feasible methods to break hard rock formation rapidly and effectively. The impregnated diamond bit has a good application effect in the hard rock formation, the interaction mechanism between the impregnated bit and rock is relatively perfect at conventional speed, and there is also a corresponding application and research basis at high speed and ultra-high speed. However, the rock fragmentation mechanism at high speed to ultra-high speed is not completely clear. Based on the interface laws for impregnated diamond and rock, a two-dimensional model of single diamond cutting rock is established by using ABAQUS software, and an approximate analysis method is proposed to define and calculate the nominal “tool tip” position, and further derive the force

收稿日期:2022-10-12; 修回日期:2023-03-21 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.03.003

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目“超高速钻进临界速度及钻头碎岩磨损特征研究”(编号:42202346);国家重点研发计划项目“变革性技术关键科学问题”重点专项“南极冰下复杂地质环境多工艺钻探理论与方法”课题四“多工艺极地钻探装备研发与系统集成”(编号:2021YFA0719104);山东省深部金矿探测大数据应用开发工程实验室开放课题基金项目重点课题“超高速金刚石钻进机理及钻进响应模型研究”(编号:SDK202213);山东省煤田地质局重点科研专项项目“深地钻探小口径取心高效钻进技术研究”(编号:鲁煤地科字(2022)33号)

第一作者:王悦,女,汉族,1998年生,在读硕士研究生,地质工程专业,研究方向为超高速钻进技术,北京市海淀区学院路29号,2832982531@qq.com。

通信作者:张凯,男,汉族,1989年生,实验师,机械工程专业,博士,长期从事钻探机械与工具研发及摩擦学与表面工程研究和教学工作,北京市海淀区学院路29号,zhangkai66@cugb.edu.cn。

引用格式:王悦,张凯,李其州,等.超高速下单粒金刚石与岩石相互作用响应的研究[J].钻探工程,2023,50(3):21-29.

WANG Yue, ZHANG Kai, LI Qizhou, et al. Research on the response of single diamond particles and rock interaction at ultra-high speed[J]. Drilling Engineering, 2023,50(3):21-29.

expression of single diamond, in order to explore the rock cutting force and changes of hard rock breaking from conventional speed to high speed and ultra-high speed by single diamond. The result shows that the cutting action of single diamond on rock is mainly concentrated in the middle and upper part of the interface between the cutting tool and the rock. The cutting force of a single diamond at high speed is lower than that under conventional cutting speed, and the main action part is affected by the change of cutting speed. There are plastic fracture and brittle fracture in the interaction between diamond particles and rock, and the two failure modes occur alternately. The proportion of brittle fracture at high speed increases compared with conventional speed, and the fluctuation range of cutting force at high speed is smaller, and the energy required for rock breaking is much less. An approximate analysis method of rock-breaking response of the impregnated diamond bit is proposed, which equals the diamond particles as a cutting tool with "tip" and "front and rear" through analysis, the force expression of single diamond which is related to factors such as cutting speed and cutting depth is derived, and force is. The research results can provide a basis and reference for further research and application of breaking hard rock formations with increased rotational speed.

Key words: impregnated diamond bit; single diamond particles; ultra-high speed; transformation of rock fragmentation mode; nominal "tool tip"; response of rock breaking

0 引言

随着浅表层可开采资源的逐渐减少和枯竭,向深地资源进军已成为全球很多国家的必然战略。随着科学技术的不断发展,人类对地球的探索逐渐向更深部的地层迈进^[1]。在开展深部地层钻进过程中,碎岩工具通常应用破碎效果较好的孕镶金刚石钻头来钻进硬度大、研磨性强、可钻性差的岩层,但钻进过程中会面临着钻进速率低、钻进周期长、钻进成本增加等诸多问题。且深部岩石的物理力学参数如强度、弹性模量、泊松比等可能随着钻探深度的加深而增大^[2-3],钻遇地层复杂多变,不能保证钻探进程^[4-5],更加大了钻探工作的困难。当前已经有众多新方法新技术来解决提高钻进效率的问题,其中提高转速的方法已经在实际应用中取得了成效。

目前,转速的提高经历了常规转速向高转速的转变过程,超高转速钻进仍处于正在研究但未投入实践阶段。对于常规转速钻进的研究,孕镶金刚石钻头与岩石之间的相互作用规律及响应模型已经具有比较完善的理论,并且成功应用在了孕镶金刚石钻头的结构设计、钻井参数的制定等方面^[6-7]。在建立孕镶金刚石钻头与岩石相互作用响应模型的研究中,FRANCA等^[8]学者依据经典的Detournay-Defourny模型建立了孕镶金刚石钻头与岩石相互作用的响应模型,将相互作用分为3个阶段进行计算,将不同岩石类型、钻进条件和钻进效率进行定量表示。高转速钻进的研究中,涡轮钻具复合钻进技术是大幅提高钻井速度的有效手段,其配合孕镶金刚石钻头在研磨性强的地层中应用提速效果明显在深

井/超深井中可大幅提高钻井效率和精确度^[9]。国内外钻井工程中将孕镶金刚石钻头配合高速涡轮钻具钻进技术应用于致密坚硬、研磨性强、可钻性差的地层中,均可达到良好的提速效果、增大了钻井效率、节省了钻井周期和成本的效果^[10-13]。其中,转速水平能够达到800~1500 r/min,线速度约7~17.5 m/s。此外,美国TerraTek实验室对提高转速进行了进一步的探索,JUDZIS等^[14-15]首次对硬地层采用超高转速金刚石钻进进行研究,转速最高达到40000 r/min,线速度约160 m/s,研究结果发现,当转速突破10000 r/min时可以提高岩石的穿透率并降低能量输入和钻压负载,破岩效果有显著提升。高明洋等^[16]基于JUDZIS等的研究结果结合高速切削金属的理论^[17],利用ABAQUS软件模拟了常规和超高速下不考虑磨损时PDC切削齿对岩石的作用,发现当切削速度大于8 m/s后热通量、应变能密度和机械比能均有明显下降,破岩效率有显著提升。

虽然提高转速的方法取得了较好的研究成果,并在实际应用取得良好的成效,但以转速增加来提高钻进效率的理论并不明确,所以有必要研究超高转速工况下钻头与岩石相互作用过程,探究提高转速导致效率提升的机理,与常规转速下相互作用响应进行对比和总结。因此本文以上述研究结果为基础,利用ABAQUS软件建立以单粒金刚石为切削具与硬岩的相互作用模型,研究常规速度和超高速情况金刚石钻头对岩石切削作用造成的切削力的变化规律以及岩石破碎形式的变化,并建立相应的单粒金刚石与岩石的受力模型,进一步完善孕镶金刚

石钻头与岩石相互作用响应机理,为钻进硬岩中速度的选择以及对钻头的受力分析提供理论支持。

1 单粒金刚石与岩石相互作用界面响应模型

金刚石钻头作为破碎岩石的主要工具,其破岩效率取决于各个切削齿的受力和工作状态,因此,有必要探究金刚石钻头的受力规律,完善金刚石钻头碎岩理论。在金刚石钻头与岩石相互作用的探究中,多以PDC钻头、PDC切削齿为研究对象来建立响应模型。其中Detournay-Defourny模型(简称D-D模型)^[18]从单个PDC切削齿分析入手,拓展到全尺寸钻头,分别对锋利的切削齿和磨损后的切削齿的碎岩进行相应的分析^[19],得到锋利和磨损齿的响应模型。

在孕镶金刚石钻头与岩石相互作用响应的探究中,FRANCA等^[8]以D-D模型为依据,建立了孕镶钻头与岩石相互作用响应的模型(如图1所示)。具体建立过程如下:先将孕镶钻头简化为孕镶块,金刚石假设为大小均等的颗粒且均匀排布于胎体中,以孕镶块为实验对象,进行运动控制下的实验,最终推导出孕镶金刚石钻头与岩石相互作用过程的作用力的表达式。研究表明,钻头与岩石之间的能量耗散与两个独立的过程有关:纯切削过程和作用于刀具磨损面的摩擦接触过程,并将该两个过程分为了3个阶段,分别建立了各个阶段金刚石钻头切削力的模型:第一阶段为钻头与岩石由不完全不充分接触达到充分接触并开始稳定切削的过程;第二阶段为钻头中金刚石颗粒与岩石充分接触的纯切削过程,并伴随金刚石颗粒的磨损;第三阶段,钻头作用于岩石中胎体磨损产生额外摩擦的阶段。3个阶段中包含了钻头与岩石相互作用过程中受到钻压、扭矩、角速度和钻速之间的关系,文中以此作为理论基础。

2 金刚石破岩模型数值模拟

试验中能够得到各个参数对响应变化的影响,但并不能观察到钻头与岩石相互作用响应中岩石破碎的过程和岩石的状态,因此文中应用ABAQUS软件对单粒金刚石与硬岩相互作用进行探究。

2.1 定义几何模型及材料参数选择

为简化分析,本文将形态各异的金金刚石颗粒简化为球形,并作二维模拟分析处理。图2为孕镶块与岩石相互作用示意。

孕镶金刚石钻头受到钻压和扭矩的作用分别形

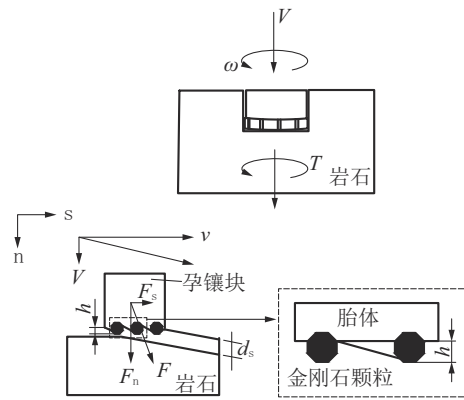


图1 孕镶金刚石钻头钻进和简化示意^[8]

Fig.1 Drilling and simplified schematic of impregnated diamond bits

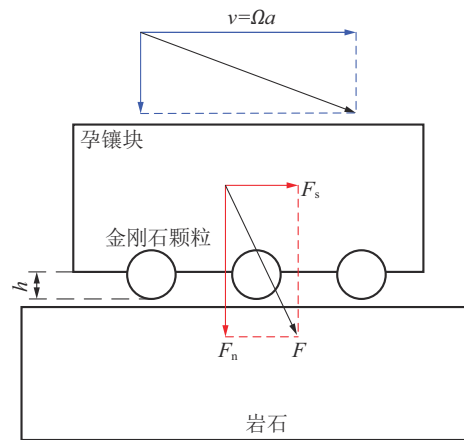


图2 孕镶块与岩石相互作用示意

Fig.2 Schematic diagram of impregnated block and rock

成竖直切削力 F_n 和水平切削力 F_s 。水平切削力 F_s 使岩石发生弹性变形、塑性变形或脆性破坏,是切削或磨削类钻头破碎岩石的关键;竖直切削力 F_n 主要以挤压的方式对岩石产生破坏,在切削或磨削过程中,竖向切削力会增大刀具与岩石之间的摩擦力,竖直切削力越大,刀具磨损得越快。文中岩石类型选取典型中硬岩大理岩。

为了探究单粒金刚石对岩石作用过程中的受力变化及岩石的破碎情况,文中建立单粒金刚石与岩石相互作用模型。根据图2,将孕镶块与岩石相互作用简化为单粒金刚石切削岩石的模型,主要探究金刚石单颗粒的受力规律,忽略金刚石颗粒的磨损。图3(a)为金刚石颗粒与岩石的装配以及网格划分示意,定义金刚石颗粒直径 D 为0.5 mm(取30/40目金刚石颗粒粒径的平均值),岩石长度为20

mm,高度为0.5 mm。划分网格时对岩石进行局部细化来减少计算量,且保持计算精度,划分后的网格数目为30365个。图3(b)为金刚石颗粒与岩石可能存在接触部分的节点分布,从金刚石颗粒最底部至最上端分别标注为N1至N16。金刚石颗粒与岩石的材料参数见表1。

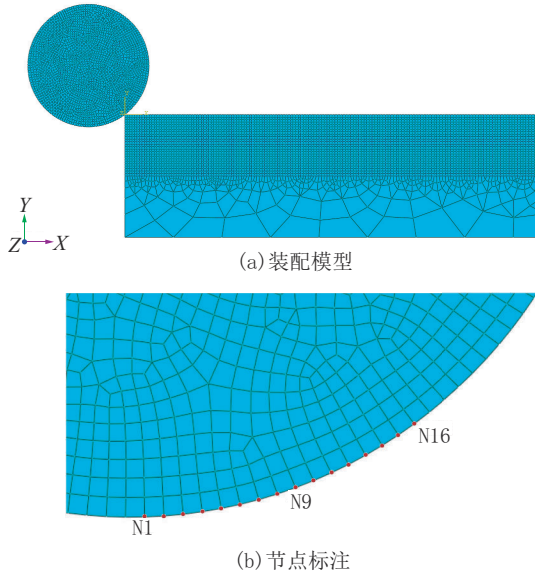


图3 金刚石颗粒与岩石的装配以及网格划分

Fig.3 Assemble model between diamond particle and rock and its network partition

表1 材料参数

Table 1 Material Parameters

材料	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性 模量/ GPa	泊 松 比	导热率/ [W· (m·°C) ⁻¹]	比热容/ [J· (kg·°C) ⁻¹]	热膨胀 系数/ (10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹)
金刚石	3520	890	0.07	543	400	2.5
大理岩	2650	40	0.25	3.5	840	52

2.2 岩石的本构模型及失效准则

本文选择在岩石切削领域广泛应用的Drucker-Prager塑性模型表征岩石的损伤和破坏^[20]。岩石的损伤是岩石内部微裂纹的萌生、扩展和断裂的过程^[21],在塑性损伤准则中,损伤起始时的等效塑性应变是应变率和应力三轴函数的函数,它是平均应力与Von-Mises应力的比值^[22],即:

$$\omega_{D_v} = \int \frac{d\bar{\epsilon}_{D_v}^{pl}}{\bar{\epsilon}_{D_v}^{pl}(\eta, \dot{\bar{\epsilon}}^{pl})} = 1 \quad (1)$$

式中: $\bar{\epsilon}_{D_v}^{pl}$ ——损伤开始时的等效塑性应变; $\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$ ——应

变速率; $\bar{\epsilon}_{D_v}^{pl}$ ——等效塑性应变率; ω_{D_v} ——随塑性变形而增加的损伤参数,一旦切削损伤开始,刚度就会降低,其损伤演化由式 $\sigma = (1 - D_v)\bar{\sigma}$ 控制; D_v ——损伤变量; σ ——任何时间的应力张量; $\bar{\sigma}$ ——未受损的应力张量。

2.3 模型边界及载荷条件

建立二维直线切削模型,根据现有研究^[23-24],将金刚石切削深度定为其直径的1/10~1/5,定义金刚石和岩石的初始温度为20 °C。按照常规转速下的钻进要求,计算得到切削的线速度在1~3 m/s,其中线速度与转速的关系式为 $v = 2\pi Rn/60$ (R 为钻头半径, n 为钻头转速)。模拟中以2、4、8、12 m/s作为切削速度进行试验。根据高明洋等^[16]的研究,切削速度2 m/s为常规速度,8 m/s和12 m/s为超高速。

2.4 模型验证及评价指标

为保证模型分析的准确性,本文采用叶赞^[25]对单粒金刚石与花岗岩相互作用的研究对得到的切削力曲线进行分析。以切削速度2 m/s为例,进行单粒金刚石碎岩过程仿真模拟,切削力曲线呈先突增后稍有下降且呈平稳波动状态,与叶赞的研究结果的变化趋势基本吻合,能够验证该模型的准确性,满足分析要求。

由于在二维切削模型中,单粒金刚石在竖直方向上没有相对运动,因此文中应用稳定切削阶段的平均切削力 F_s 作为评价单粒金刚石与岩石相互作用响应的指标,切削力越小,破碎单位体积岩石需要的力越小,切削效率越高^[26]。通过对节点切削力和整体切削力变化的观察,初步分析影响其变化的原因。

3 切削岩石的模拟结果分析

通过建模及不同参数下单粒金刚石破岩过程的模拟,对模拟的结果进行分析。首先对金刚石颗粒受力变化进行分析,由此总结切削力变化规律和岩石破碎规律,并对单粒金刚石进行简化计算受力。

3.1 切削力变化情况

对不同加载速率下岩石破裂影响研究中发现,在一定温度以内,加载速率越快,岩样主裂纹的形成和扩展速率增加,加快了岩样破坏的速率,破坏越趋于剧烈,且裂纹特征的改变会对岩石的物理性质、损伤演化特征产生巨大的影响^[27-28]。因此,切削速度的变化导致的刀具宏观切削力的改变、刀具与岩石

接触面切削力分布差异均可能会引起岩石破坏模式的变化。

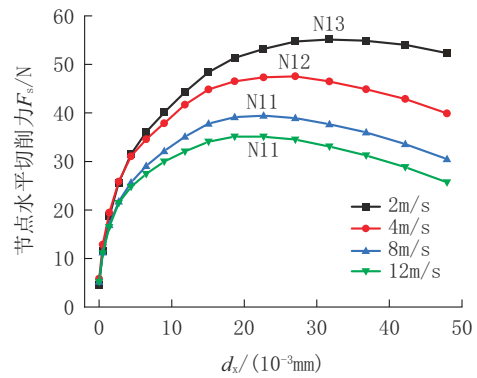
根据图3各节点位置,定义由金刚石颗粒底部到每个节点之间的竖直距离为 d_x 。图4(a)为相同宏观切削深度不同切削速度下平均水平切削力随 d_x 的变化曲线。由图4(a)可知,随着刀具切削位置的上移,水平切削力先迅速增加至峰值再相对缓慢减小。切削速度由常规下2 m/s增加到高速下12 m/s时,金刚石颗粒受到水平平均力的最高点的位置逐渐下移,这种细微改变就可能致岩石开始产生碎裂的位置即起裂点产生变化。

峰值节点前,水平切削力升高幅值明显增大,N11后曲线斜率缓慢下降,说明金刚石颗粒的中下部对岩石的水平方向作用力逐渐减小,颗粒的底部对岩石的水平作用很小。节点N1、N2处3种速度的水平切削力值大小近似,说明金刚石颗粒底部对岩石的作用基本不受速度改变的影响。峰值节点后,随着 d_x 的增加,水平切削力呈小范围减小,切削具受力和深度 d_x 可以近似为线性关系,说明金刚石颗粒的中上部位对岩石的破碎起到主要作用。

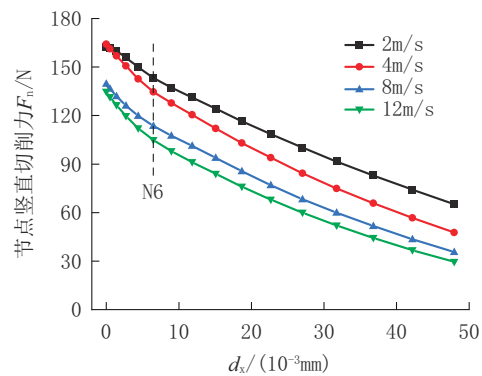
由常规切削速度增加到超高速时,切削力整体呈下降趋势,单粒金刚石中上部位对岩石产生主要作用,相当于PDC切削齿的前刀面对岩石产生的主要切削作用,根据上述分析,分别对X、Y方向的节点切削力进行分析。

图4(b)为同一切削深度不同切削速度下 F_n 随 d_x 的变化曲线。竖直切削力越大,刀具与岩石之间作用的摩擦力越大,在破岩过程中会产生更多的热量,且会导致切削具磨损加剧,加速其失效。由图4(b)可知,竖直切削力随着 d_x 的增大呈逐渐减小的趋势。将破岩过程中金刚石颗粒竖直方向受力分为两个部分。金刚石颗粒节点N6以下位置竖直切削力迅速减小斜率下降幅度较大,节点N6以上位置竖直切削力减小速率略有减小且斜率变化幅度可视为相同。单粒金刚石最底部,竖直切削力数值达到最大,此时刀具底部对岩石的挤压力严重,导致刀具底部与岩石之间产生较大的摩擦力,且该节点后曲线斜率改变较大,这部分属于金刚石颗粒受摩擦力较大的区域。

综上,刀具对岩石的破坏以水平切削力为主,伴随着竖向力对残余部位的压碎作用。从刀具上部到中下部作用方式逐渐由水平切削趋向挤压破坏; d_x



(a) 节点 F_s 随 d_x 的变化曲线



(b) 节点 F_n 随 d_x 的变化曲线

图4 相同切削深度不同切削速度下切削力随竖直距离的变化曲线

Fig.4 Curve of cutting forces with vertical distance under the same cutting depth and different cutting speed

达到一定值后,随着刀具作用位置的加深,合力增大的趋势变陡,竖向切削力明显增大导致摩擦力增大。该阶段几乎不存在水平方向对岩石的破坏,摩擦生热加剧,加快金刚石颗粒的磨损。切削速度由常规速度增大至高速后,水平和竖直方向的切削力均有所下降,即破碎岩石所需的能量减小,能够有效提高岩石破碎的效率。

3.2 岩石破碎情况

由切削力变化规律结合模拟中金刚石颗粒与岩石相互作用过程的云图变化,观察分析不同切削速度条件下岩石的破碎情况,探究切削中由常规速度到高速的转变对岩石破碎的影响。

图5和图6为常规切削速度(2 m/s)和高速切削速度(8 m/s)时岩石稳定破碎阶段的典型破碎周期内的应力云图。根据云图变化发现,不同速度切削岩石的破坏是脆性破坏和塑性破坏的交替进行,岩石经过挤压变形和裂纹的生成与扩展交替作用,形

成了大小不同的切屑,这与何录忠等^[29]的研究结果相同。图5(a)和(b)分别为常规速度和超高速下的脆性破坏过程,切屑的产生经历了应力集中,岩石失效,挤压变形,裂纹萌生发展至拉断,产生较小的切屑的过程,并且切削具底部对剩余未破碎的岩石产生压碎作用;常规速度下裂纹主要由切削具中部产生,而超高速下主要由切削具中下部产生,挤压变形明显,形成较大的脆性断裂。图6为不同速度下塑性破坏过程,云图中塑性变形以直接失效的形式体现,切削速度对塑性破坏过程几乎没有影响。因此,由云图可以看出,切削速度的增大可能改变了裂纹产生和扩展的位置导致岩石破碎模式的改变。

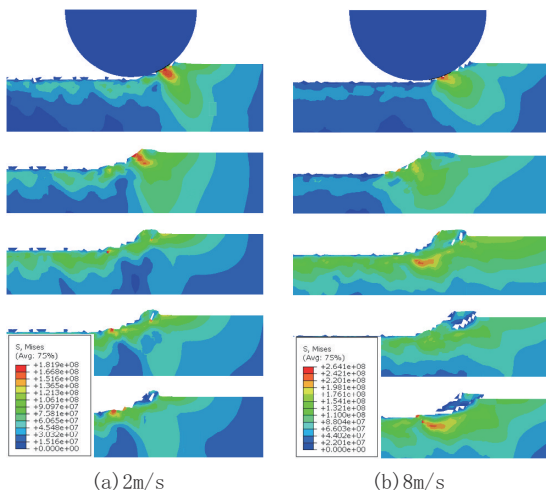


图5 脆性破坏应力云图

Fig.5 Stress nephogram of brittle failure

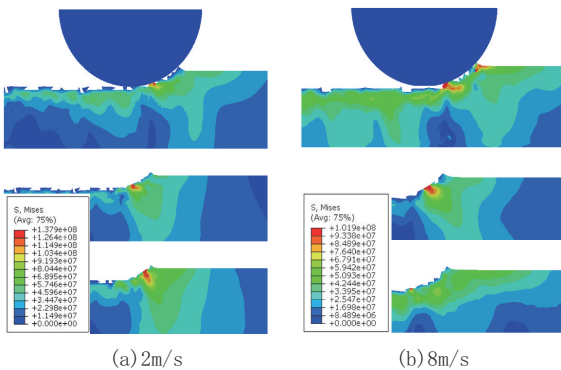


图6 塑性破坏的应力云图

Fig.6 Stress nephogram of ductile fracture

为了进一步对比常规速度和超高速下岩石破碎模式的变化,提取上述两组速度下稳定切削阶段的水平切削力曲线(见图7)。结合应力云图分析,发

现切削速度为2 m/s时岩石的稳定破碎阶段以塑性破坏为主,伴随着刀具中上部对岩石的脆性破坏;切削速度为8 m/s时岩石的稳定阶段脆性破坏明显增多,切削过程岩石的破坏始终呈塑性破坏和脆性破坏交替产生,而非单一破坏模式;且切削速度增大,岩石应变率增加从而增加材料脆性,导致其更容易发生脆性破坏而减小切削力^[30]。

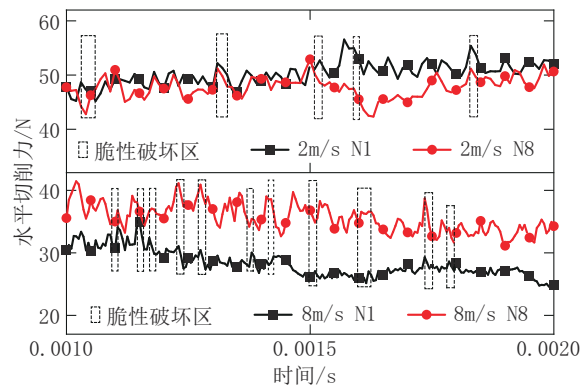


图7 稳定阶段水平切削力曲线

Fig.7 Curve of horizontal cutting force in the stable phase

虽然两种切削速度下岩石的破碎模式产生差异,但根据云图显示,单粒金刚石底部对岩石主要为挤压作用,且脆性破坏中岩石开始产生裂缝的位置几乎都是在受作用力最大的位置附近。相较于常规切削速度,超高速下切削力不仅波动范围减小,且整体也有减小的趋势,说明切削速度提高,破碎岩石需要的能量减小,破岩过程中产生的热量也会减少;切削力最终维持在小范围内波动,能够有效减缓破岩工具疲劳破坏及磨损,提高工具使用寿命。

3.3 金刚石颗粒与岩石相互作用响应模型

根据孕镶钻头与岩石界面相互作用响应模型,发现存在临界深度使得钻头与岩石相互作用过程中的响应发生变化。因此推测单粒金刚石在破岩过程中也会存在某一临界接触深度,其大小可能受到切削速度和切削深度等因素的影响。文中模拟结果表明,切削具不同部位作用于岩石的实际切削深度不同导致其受到的切削力发生改变且对岩石作用效果也不同,存在一个受力最大位置与PDC切削齿切削理论中的刀尖类似^[31]。因此,借鉴PDC切削理论分析的相关经验,根据PDC切削齿,将单粒金刚石对岩石作用中最大受力点定义为“刀尖”。将该“刀尖”

处到金刚石颗粒底部的距离定义为 d , 如图8所示。并将单粒金刚石与岩石接触的圆弧面划分为以微切削为主的“前刀面”和以挤压破碎为主的“后刀面”。

根据上述模拟分析结果对 d 进行推导。宏观切削深度为 d , 定义切削具与岩石初始接触点至水平切削力峰值点竖直距离为 d_1 , 初始接触点至切削具底部竖直距离为 d_2 。

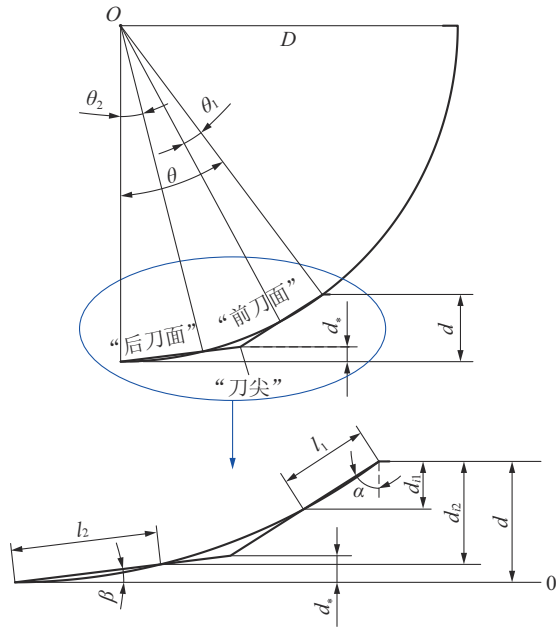


图8 “刀尖”及“前、后刀面”示意

Fig.8 Diagram of “tool tip” and “front and rear face”

设每个节点距离岩石表面的距离为 d_i ; 两刀面交于一点, 设该点到岩石原始表面的距离为 d_* 。随着切削速度的变化, 岩石表面到峰值节点的竖直距离 d_{i1} 也会产生变化; 磨损加剧点到岩石表面的距离 d_{i2} 基本不变。为了计算 d_* 的位置, 设 l_1 和 l_2 分别代表前后刀面连接前的长度, 由于尺寸、尺度较小, 将该两段弧长视为与线段长度相同。“刀尖”点到第一个节点和最后一个节点的水平距离分别为 a 和 b 。

定义前刀面与竖直方向成 α 角, 满足:

$$\cos \alpha = \frac{d_{i1}}{l_1} \quad (2)$$

同理定义“后刀面”与水平方向成 β 角, 满足:

$$\cos \beta = \frac{d - d_{i2}}{l_2} \quad (3)$$

将 l_1 和 l_2 分别表示为:

$$l_1 = \pi D \cdot \frac{\theta_1}{360^\circ} \quad (4)$$

$$l_2 = \pi D \cdot \frac{\theta_2}{360^\circ} \quad (5)$$

与岩石接触圆弧段对应的夹角 θ 为:

$$\cos \theta = \frac{D - d}{D} \quad (6)$$

将粒径和切削深度的关系用 a 和 b 表示:

$$a + b = \sqrt{D^2 - (D - d)^2} \quad (7)$$

$$\tan \alpha = \frac{a}{d_*} \quad (8)$$

$$\tan \beta = \frac{d - d_*}{b} \quad (9)$$

整理可得名义“刀尖”位置表达式:

$$d_* = \frac{\sqrt{d(2D - d)} - \frac{d}{\tan \beta}}{\tan \alpha - \frac{1}{\tan \beta}} = \frac{d - \tan \beta \cdot \sqrt{d(2D - d)}}{1 - \tan \alpha \cdot \tan \beta} \quad (10)$$

根据式(10)分别计算不同速度下的名义“刀尖” d_* 的位置, 发现粒径为 0.5 mm、宏观切削深度为 $1/10D$ 的情况下名义“刀尖”点的位置只发生微小改变, 通过计算得到名义“刀尖”位置距离金刚石颗粒底部约 0.012 mm。说明在其他条件不改变的情况下, 切削速度增大对金刚石颗粒对岩石主要作用部位有较小影响。

已知“刀尖”位置后, 应用其表达单粒金刚石受力。由于该过程中切削具与岩石接触的摩擦系数保持不变, 且切削过程中稳定阶段的接触面积保持不变, 简化后形成的具有“刀尖”的两个作用面相当于具有两个面的纯切削阶段, 将该过程单粒金刚石受力表示为:

$$\begin{cases} F_s = F_{s1c} + F_{s2c} \\ F_n = F_{n1c} + F_{n2c} \end{cases} \quad (11)$$

式中: 下标 1 代表“前刀面”, 下标 2 代表“后刀面”。

假设切削具对岩石所做的功 Γ 与岩石体移除的体积 V 成正比, 可以表示为:

$$\Gamma = F_{sc}L = \epsilon V \quad (12)$$

式中: L ——形成的沟槽的长度; ϵ ——岩石的固有比能; V ——移除的岩石的体积。

根据式(12)可以得到 F_{s1c} , 表示为:

$$\begin{cases} F_{s1c} = \epsilon A_c \\ F_{n1c} = \xi \epsilon A_c \end{cases} \quad (13)$$

式中： A_c ——金刚石颗粒与岩石接触的横截面积， $A_c = \omega d_s$ ； ω ——颗粒与岩石接触的深度； ξ ——合力与水平方向倾角的正切值。

“后刀面”受到较大的摩擦，将 F_{s2c} 表示为：

$$\begin{cases} F_{s2c} = \mu_d \sigma_d A_d \\ F_{n2c} = \sigma_d A_d \end{cases} \quad (14)$$

式中： μ_d ——金刚石与岩石接触界面的摩擦系数； σ_d ——金刚石与岩石相互作用界面的接触应力； A_d ——“后刀面”与岩石接触的面积， $A_d = \omega(d - d_*)$ 。

综合式(11)、(13)、(14)得到单粒金刚石受力表达式：

$$\begin{cases} F_s = \varepsilon(d - d_*) + \mu_d \sigma_d d_* \\ F_n = \xi \varepsilon(d - d_*) + \sigma_d d_* \end{cases} \quad (15)$$

由关系式(15)可以看出，金刚石颗粒在对岩石作用过程中的受力与岩石特性、切削深度以及“刀尖”位置有关，“刀尖”位置会随着切削速度、切削深度等因素的变化发生改变。因此，应进一步探究高速下不同切削深度、不同岩石类型情况下“刀尖”位置的变化规律，明确高速与常规切削速度下单粒金刚石与岩石相互作用响应的异同，进而完善单粒金刚石受力模型。

4 结论

(1)单粒金刚石对岩石的切削作用主要集中在切削具与岩石接触界面的中上部，超高速下比常规切削速度下单粒金刚石受切削力减小，且主要作用部位受到切削速度改变的影响。

(2)金刚石颗粒与岩石相互作用过程中存在塑性破坏和脆性破坏且2种模式交替产生，超高速下岩石产生脆性破坏的比例相比于常规切削速度有所增加，脆性破坏增多的趋势导致岩石更容易发生破碎。

(3)改变切削速度得到的金刚石颗粒与岩石接触部位不同导致金刚石颗粒受力产生差异，由此发现金刚石颗粒对岩石的主要作用位置影响岩石的破碎模式，从而影响岩石的破碎效率，定义切削具具有“前、后刀面”和名义“刀尖”，以 d_* 表示“刀尖”与单粒金刚石底部的距离，并计算出单粒金刚石的受力表达式。

参考文献(References)：

[1] 冉恒谦,梁健,张林霞,等.“十三五”地质钻探工程技术发展回顾及“十四五”展望[J].钻探工程,2021,48(S1):1-13.

RAN Hengqian, LIANG Jian, ZHANG Linxia, et al. Technology review of the geological drilling engineering of the “13th Five Year Plan” and prospect the “14th Five Year Plan”[J]. Drilling Engineering, 2021,48(S1):1-13.

[2] 林斌,徐冬.深部岩石力学参数随赋存深度变化规律研究[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2017,37(6):8.

LIN Bin, XU Dong. Study on the law of mechanical parameters of rock in deep coal bearing strata[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2017,37(6):8.

[3] 周宏伟,谢和平,左建平,等.赋存深度对岩石力学参数影响的试验研究[J].科学通报,2010,55(34):3276-3284.

ZHOU Hongwei, XIE Heping, ZUO Jianping, et al. Experimental study of the effect of depth on mechanical parameters of rock[J]. Chinese Sci Bull, 2010,55(34):3276-3284.

[4] 丁立钦,王志乔,凌雪,等.深部地质钻探钻遇弱面地层井孔围岩稳定分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):122-128.

DING Liqin, WANG Zhiqiao, LING Xue, et al. Deep geo drilling borehole stability analysis in anisotropic formations[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):122-128.

[5] 甘超,曹卫华,王鲁朝,等.深部地质钻探钻进过程流式大数据分析 with 动态预处理——以辽宁丹东3000 m科学钻探工程为例[J].钻探工程,2022,49(4):1-7.

GAN Chao, CAO Weihua, WANG Luzhao, et al. Streaming big data analysis and dynamic pre-processing in deep geological drilling process: A case study on the 3000m scientific drilling project in Dandong, Liaoning province[J]. Drilling Engineering, 2022,49(4):1-7.

[6] 常思,刘宝昌,韩哲,等.热-机碎岩孕镶金刚石钻头的设计及试验研究[J].钻探工程,2022,49(2):77-84.

CHANG Si, LIU Baochang, HAN Zhe, et al. Design and test of the impregnated diamond drill bit assisted by frictional heat[J]. Drilling Engineering, 2022,49(2):77-84.

[7] 方啸虎,崔祥仁,谢德龙.近年来钻探用超硬材料的发展与展望[J].钻探工程,2021,48(S1):18-24.

FANG Xiaohu, CUI Xiangren, XIE Delong. Development and prospect of the super hard materials applied to the drilling industry in recent years[J]. Drilling Engineering, 2021,48(S1):18-24.

[8] FRANCA L F P, MOSTOFI M, RICHAR T. Interface laws for impregnated diamond tools for a given state of wear[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2015(73):184-193.

[9] 管锋,万锋,吴永胜,等.涡轮钻具研究现状[J].石油机械,2021,49(10):1-7.

GUAN Feng, WAN Feng, WU Yongsheng, et al. Research status of turbodrill[J]. China Petroleum Machinery, 2021,49(10):1-7.

[10] 冯定,刘统亮,王健刚,等.国外涡轮钻具技术新进展[J].石油机械,2020,48(11):1-9.

FENG Ding, LIU Tongliang, WANG Jiangang, et al. Advances in foreign turbodrill technology[J]. China Petroleum Machinery, 2020,48(11):1-9.

[11] 赵洪山.元坝124超深井钻井关键技术[J].石油天然气学报,

- 2012, 34(5):91-94, 120.
ZHAO Hongshan. Key drilling technique used in Yuanba-124 ultra-deep wells[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(5):91-94, 120.
- [12] 张晨, 张武涛, 梁振勇, 等. 涡轮+孕镶提速技术在准噶尔南缘高103井的应用[J]. 新疆石油天然气, 2021, 17(2):31-35.
ZHANG Chen, ZHANG Wutao, LIANG Zhenyong, et al. The application of turbine and impregnated bit to enhance rop in Gao 103 well in southern margin of junggar basin[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2021, 17(2):31-35.
- [13] 王树超, 王维韬, 雨松. 塔里木山前井涡轮配合孕镶金刚石钻头钻井提速技术[J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(2):156-159.
WANG Shuchao, WANG Weitao, YU Song. Combination of turbodrill and impregnated diamond bit to enhance ROP in drilling of wells in piedmont zone, Tarim Basin[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 38(2):156-159.
- [14] JUDZIS A, BOUCHER M, MCCAMMON J, et al. Investigation of smaller footprint drilling system; Ultra-high rotary speed diamond drilling has potential for reduced energy requirements[C]// IADC/SPE Drilling Conference. Miami, Florid: OnePetro, 2006.
- [15] JUDZIS A, ROBERTSON H, BLACK A. Smaller footprint drilling system for deep and hard rock environments feasibility of ultra-high-speed diamond drilling, final report[R]. Office of Fossil Energy, DOE Award Number DE-FC26-03NT15401, 2010.
- [16] 高明洋, 张凯, 周琴, 等. 基于ABAQUS的PDC高速切削岩石机理研究[J]. 石油机械, 2019, 47(2):1-7.
GAO Mingyang, ZHANG Kai, ZHOU Qin, et al. Research on PDC high speed rock cutting mechanism based on ABAQUS [J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(2):1-7.
- [17] 何宁. 高速切削技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2012: 1-46.
HE Ning. High Speed Cutting Technology [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2012: 1-46.
- [18] Detourmay E, Defourny P. A phenomenological model for the drilling action of drag bits[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1992, 29(1):13-23.
- [19] ZHOU Y N, ZHANG W, GAMWO I, et al. Mechanical specific energy versus depth of cut in rock cutting and drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2017, 100:287-297.
- [20] 贾彦杰, 蒋平, 童华. 基于Drucker-Prager准则的扩孔器单齿正交切削岩石三维力学模型[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1429-1436.
JIA Yanjie, JIANG Ping, TONG Hua. 3D mechanical modeling of soil orthogonal cutting under a single reamer cutter based on Drucker-Prager criterion [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1429-1436.
- [21] 张晖辉, 刘峰, 常福清. 岩石损伤破坏过程声发射试验及其能量特征分析[J]. 公路交通科技, 2011, 28(3):48-54.
ZHANG Huihui, LIU Feng, CHANG Fuqing. Experimental study of acoustic emission characteristics during rock failure process and energy propedies [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(3):48-54.
- [22] YARI N, KAPITANIAK M, VAZIRI V, et al. Calibrated FEM modelling of rock cutting with PDC cutter[C]//International Conference on Engineering Vibration. MATEC Web of Conferences 148, 16006, 2018.
- [23] 张林中. 金刚石切削岩石的模拟[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2008:16-19.
ZHANG Linzhong. The simulation of cutting rocks by diamond [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2008:16-19.
- [24] 易兴洋. 花岗岩加工过程中影响切削机理的关键因素研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018:22-26.
YI Xingyang. Study on key factors affecting cutting mechanism in granite processing [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018:22-26.
- [25] 叶赞. 孕镶钎焊金刚石钻头的磨损试验及其切削过程的数值仿真[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
YE Yun. The wear experiment and cutting simulation of impregnated brazed diamond bit [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2010.
- [26] 汤凤林, Нескоромных В. В., 宁伏龙, 等. 金刚石钻进岩石破碎过程及其与规程参数关系的研究[J]. 钻探工程, 2021, 48(10):43-55.
TANG Fenglin, NESKOROMNYH V. V., NING Fulong, et al. Research on the rock fragmentation process and its relationship with drilling parameters in diamond drilling [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(10):43-55.
- [27] 陈琳, 徐小丽, 徐银花. 温度与加载速率对岩石力学性质的影响[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(1):170-177.
CHEN Lin, XU Xiaoli, XU Yinhu. Effect of temperature and loading rate on mechanical properties of rock [J]. Journal of Guangxi University (Nat Sci Ed), 2016, 41(1):170-177.
- [28] 张艳博, 刘志超, 梁鹏, 等. 单一裂纹几何特征对岩石力学性质影响程度研究[J]. 煤矿开采, 2019, 24(1):16-21.
ZHANG Yanbo, LIU Zhichao, LIANG Peng, et al. Influence of single fracture geometrical feature to rock mechanical properties [J]. Coal Mining Technology, 2019, 24(1):16-21.
- [29] 何录忠, 周琴, 李斌斌, 等. 岩石切削机理模型分析及实验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(9):85-88.
HE Luzhong, ZHOU Qin, LI Binbin, et al. Analysis on rock cutting mechanism model and the experimental study [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(9):85-88.
- [30] 陈明, 安庆龙, 刘志强. 高速切削技术基础与应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2012:27-40.
CHEN Ming, AN Qinglong, LIU Zhiqiang. Fundamentals and Applications of High Speed Cutting Technology [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2012:27-40.
- [31] 王家骏, 邹德永, 杨光, 等. PDC切削齿与岩石相互作用模型[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(4):104-109.
WANG Jiajun, ZOU Deyong, YANG Guang, et al. Interaction model of PDC cutter and rock [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(4):104-109.

(编辑 荐华)