

孕镶金刚石钻头高转速钻进磨损失效 与规程参数研究现状

李禹霄^{1,2}, 张 凯^{*1,2}, 闫晨艳^{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:孕镶金刚石钻头高速回转钻进是深地硬岩取心钻进的主要方法之一,虽然其广泛应用于各个领域,但仍存在钻进性能不稳定、钻头磨损异常等问题,原因在于对钻头-岩石界面规律及动态磨损过程的认知仍然不够清晰。本文综述了目前对孕镶金刚石钻头碎岩力学响应模型的研究现状,总结了钻头磨损机制在不同钻进规程参数下与碎岩方式和钻进速度间的关系,孕镶金刚石钻头磨损失效机制可以概括为钻头-岩石界面二体磨损和三体磨损的循环过程。介绍了国内外学者对超过常规转速区间下临界钻进规程的研究,新规程的探索对孕镶金刚石钻头高速钻进的发展具有重要意义。

关键词:孕镶金刚石钻头;钻进规程参数;高转速钻进;磨损失效;岩石破碎;钻头-岩石界面

中图分类号:P634;TE921 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)S1-0017-09

Research status of wear failure and drilling parameters parameters of impregnated diamond bit in high speed drilling

LI Yuxiao^{1,2}, ZHANG Kai^{*1,2}, YAN Chenyan^{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), Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Deep GeoDrilling Technology, MNR, Beijing 100083, China)

Abstract: High-speed rotary drilling with diamond-impregnated bit is one of the main methods of deep hard rock core drilling. Although it is widely used in various fields, it still has some problems, such as unstable drilling performance and abnormal bit wear. The reason is that the understanding of the law of bit/rock interface and dynamic wear process is still not clear. In this paper, the current research status of mechanical response models of diamond-impregnated bits for rock breaking is reviewed, and the relationship between the bit wear mechanism and the rock breaking mode and drilling speed under different drilling parameters is summarized. The wear failure mechanism of diamond-impregnated bits can be summarized as the cycle process of two-body wear and three-body wear at the bit/rock interface. This paper introduces the research of the critical drilling procedure in the interval beyond the conventional speed. The exploration of the new procedure is of great significance to the development of the high speed drilling of diamond-impregnated bit.

Key words: ID bit; drilling parameters; high speed diamond drilling technology; wear failure; rock fragmentation; bit/rock interface

收稿日期:2023-05-31; 修回日期:2023-08-09 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.S1.003

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(编号:42202346);国家重点研发计划“变革性技术关键科学问题”重点专项课题(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(编号:SDK202213);山东省煤田地质局重点科研专项项目(编号:鲁煤地科字(2022)33号)

第一作者:李禹霄,男,汉族,2000年生,硕士研究生,地质资源与地质工程专业,主要从事地质工程超高转速金刚石钻进技术的研究,北京市海淀区学院路29号,1477368177@qq.com。

通信作者:张凯,男,汉族,1989年生,副教授,博士,从事岩石破碎学、钻探机械与工具研发、超硬材料在地质工程中的应用、摩擦学与表面工程等方面的研究,北京市海淀区学院路29号,zhangkai66@cugb.edu.cn。

引用格式:李禹霄,张凯,闫晨艳,等.孕镶金刚石钻头高转速钻进磨损失效与规程参数研究现状[J].钻探工程,2023,50(S1):17-25.

LI Yuxiao, ZHANG Kai, YAN Chenyan, et al. Research status of wear failure and drilling parameters parameters of impregnated diamond bit in high speed drilling[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1):17-25.

0 引言

近年来,采矿和地质勘探行业的发展非常迅速,尤其是取心钻探技术。该技术的发展面向能源的现代化创新,对于地质钻探,钻进速度和钻进深度的提升以及高质量岩心的获取是其研究发展的重要方向。孕镶金刚石钻头回转取心钻进技术的应用大幅提高了硬岩取心钻探的效率,通过提高转速实现金刚石的微切削碎岩效果。虽然该技术应用广泛,但仍然面临着钻进性能不稳定、钻头磨损出刃异常等问题^[1-5]。原因在于对钻头-岩石界面规律了解不够彻底以及在不同岩层钻进中无法准确选择合适的钻进规程。

国内外许多学者对孕镶金刚石钻头-岩石界面规律和不同钻进规程下钻头磨损失效机理进行了研究。对于钻头-岩石界面规律的研究是提升碎岩效率和钻头寿命的前提和基础,参考PDC钻头切削碎岩模型^[6-7],将整个孕镶金刚石钻头碎岩简化为单金刚石颗粒加单孕镶块微切削碎岩问题,金刚石受力统一划分为垂直载荷和水平载荷,假设钻头切削和摩擦接触是两个独立的过程,确定了孕镶金刚石钻头碎岩的力学响应模型。不同磨损状态下的孕镶金刚石钻头受力情况不同,Franca等^[8]依据金刚石每转切深对孕镶金刚石钻头的磨损面积划分,讨论了不同磨损状态下的受力情况。俄罗斯钻探工作者对金刚石钻头碎岩开展了大量研究,将钻进规程与岩石破碎、钻头磨损结合起来,探讨了钻井响应与规程参数间的关系^[9]。

本文综述了常规钻进规程下孕镶金刚石钻头的碎岩力学响应模型和磨损约束模型,总结了不同转速、钻压以及冲洗液量下钻头碎岩机理、钻进速率以及岩屑排放间的关系。参考金属高速加工临界规程问题,总结了目前国内外对超过常规钻进规程的探索和研究,新规程的确立对高转速金刚石钻进在地质钻探中的应用具有重要的参考价值。

1 孕镶金刚石钻头碎岩过程及磨损特征

1.1 金刚石钻头-岩石界面规律

孕镶金刚石钻头的钻井响应模型主要由钻压 W 、钻头扭矩 T 、穿透速率 V 和角速度 Ω 四个变量间的关系组成。Franca等^[8]针对孕镶金刚石钻头提出了钻头微切削面与岩石界面作用的关系式。在恒定的钻进速度(mm/s)和转速(rad/s)下,界面规律由

W 、 T 和钻头每转切深 d 进行描述。切深 d 表示钻头在每一次完整旋转钻进所运动的距离(沿其旋转轴),其表达式如下:

$$d_b = \frac{2\pi V}{\Omega} \quad (1)$$

切削深度是钻井过程中的基本变量,对于已知的钻头和岩石,每转切深是控制其他钻进参数的重要指标,是控制切削力大小的主要参数。以此类推可以推出钻头单孕镶块每转切深 d_s 、单金刚石颗粒 d_d 的每转切深表达式:

$$d_s = \frac{d_b}{n_s} \quad (2)$$

$$d_d = \frac{d_s}{n_d} \quad (3)$$

式中: n_s 、 n_d ——钻头孕镶块及单孕镶块上金刚石的数目。

具体参数如图1所示。

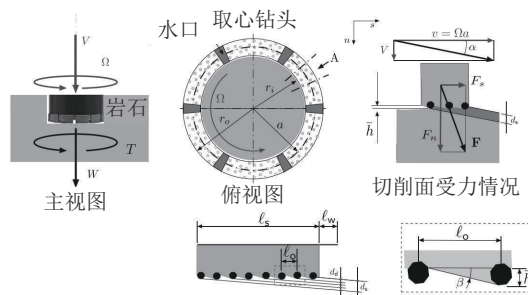


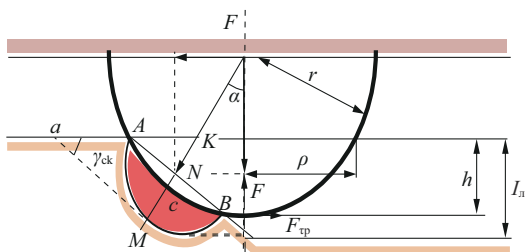
图1 孕镶金刚石取心钻头碎岩力学响应模型^[8]

除了上述几个变量,Franca等还引入了胎体磨损角 β 和切削角 α 来描述钻进参数与切削面特征间的关系。磨损角 β 表示金刚石出露的平均高度 h 与相邻金刚石颗粒间距 l_0 的比值,切削角 α 为穿透速率相对于切削方向的方向,用来表示金刚石颗粒底面与岩石表面的夹角。在平衡构型中, α 和 β 间的关系式如下:

$$\alpha \leq \beta \text{ 或 } \frac{d}{n_s(l_s + l_w)} \leq \frac{h}{l_0} \quad (4)$$

式中: l_s ——孕镶块的长度; l_w ——水口长度。

汤凤林等^[9]从每转切深角度引入裂隙长度 l 、晶格常数 a 、岩石破碎相对变形量 ϵ 以及一系列岩石温度等参数来描述金刚石微切削碎岩过程,如图2所示。将金刚石假设为球体,受钻压 W 和扭矩 T 作用,金刚石每转切深表达式如下:

图2 金刚石破碎岩石过程示意^[9]

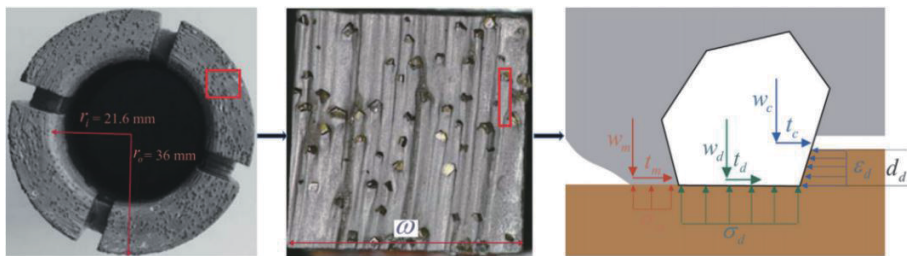
$$h = \frac{12\sqrt{W^2 + T^2} (1 + 2\sqrt{\frac{2l}{a}})}{\pi d E (3\epsilon - \alpha_n t \ln \frac{\tau}{\tau_0})} \quad (5)$$

式中: $2l$ ——裂隙长度, mm; a ——晶格常数, mm; d ——金刚石直径, mm; E ——岩石弹性模量, Pa; ϵ ——岩石破碎时岩石变形的相对变形量(长度); α_n ——岩石热膨胀系数, mm/°C; t ——岩石表层温度, °C; τ ——破碎载荷的施载时间, s; τ_0 ——固体中原子振动周期, $10^{-12} \sim 10^{-13}$ s。

随着钻压、扭矩、裂隙长度等参数的增加,金刚石切深 h 增加。反之,随着金刚石颗粒直径、弹性模量的增加而降低。对不同钻头和所钻岩石,岩石破碎裂隙深度 h_f 和金刚石切入深度并不相同。金刚石颗粒大小的选型对不同岩层钻进效果影响较大,叶纪超等^[10]通过在电子万能试验机进行金刚石压入试验,总结了金刚石颗粒大小对岩石破碎规律。表明在较硬岩层钻进时宜选择粒径较小的金刚石,软岩则选用大颗粒金刚石,对孕镶金刚石钻头的设计优化提供参考。

1.2 钻头磨损特征

孕镶金刚石钻头切削齿即孕镶块由镶嵌在碳化钨或其他金属合金中的金刚石制成,将金刚石固定在整个胎体中。钻井过程中胎体受岩屑不断冲蚀磨损,如图3所示。胎体的磨损使钝化的金刚石脱落并在磨损面上出露新的金刚石用来破碎岩石。这种自锐过程,可以保持钻头具有稳定的钻进性能,减少更换钻头的次数^[8]。

图3 孕镶金刚石钻头切削示意^[11]

Mostofi 等^[11]参考 PDC 钻头磨损研究方法, 通过每转切深对钻压 W 和扭矩 T 进行缩放, 引入两个新的变量比能 E 和钻孔强度 S 。单位是 MPa(N/mm²)。

$$E = \varepsilon_t + \frac{\mu_d \sigma_d l_d}{d} + \frac{\mu_m \sigma_m l_m}{d} \quad (6)$$

$$S = \varepsilon_1 \zeta_1 + \frac{\sigma_d l_d}{d} + \frac{\sigma_m l_m}{d} \quad (7)$$

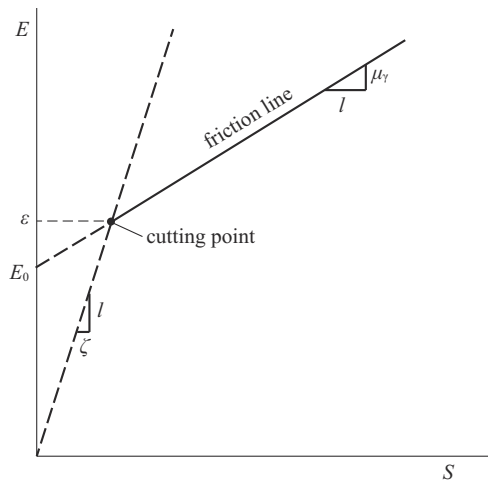
E - S 关系式如下:

$$E = \mu_d S + E_0 \quad (8)$$

$$E_0 = \varepsilon_t(1 - \mu_d \zeta_t) + \sigma_m l_m(\mu_m - \mu_d) \quad (9)$$

式中: ζ ——常数,其数值范围在 $[0.5-0.8]$ 范围内;
 μ_d ——金刚石摩擦系数, μ_m ——基体摩擦系数。

根据上式所绘制的 $E-S$ 图(图4)可以更直观的描述钻头的磨损过程^[6]。

图 4 $E-S$ 原理

切削点对应于理想钻进状态,提供给钻头的所有能量全部用于切削破碎岩石,切削点以左限制了

式(8)的有效性。切削点右侧摩擦线代表了相同刀具钻进相同地层时比能 E 和钻进强度 S 的约束。

孕镶金刚石钻头的磨损可以从金刚石和胎体两方面进行描述。金刚石的磨损响应包括塑性和脆性,在低应力、低切深下,金刚石通常发生塑性失效,在金刚石尖端处形成磨损面,磨损面通常是由机械磨损和高温石墨化共同产生的。通常为沟槽状或条带状,可以在金刚石表面或发生磨损边缘以及磨损点上发展^[12]。宏观断裂的金刚石表面覆盖多个尖点,并逐渐导致更严重的断裂,这些金刚石很少从基体中出露,整个金刚石或残留的金刚石碎片会在胎体中脱落,形成孔洞。磨损面在切削方向上有不同深度的沟槽。在高应力(大切深)下,金刚石受脆性失效机制产生微裂纹进而破碎,破碎程度随应力增加。通过 E - S 曲线可以将金刚石的磨损响应周期分为抛光、断裂和锐化3个阶段,如图5所示。

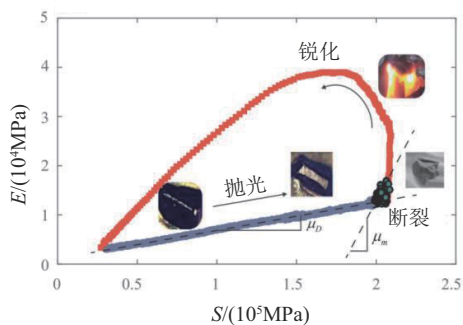


图5 孕镶金刚石钻头磨损响应周期

钻进过程中胎体被不断磨损,以保证金刚石的不断出露。胎体表面的磨损机制可以概括为二体磨损和三体磨损,二体磨损指基体与岩石的直接摩擦接触,而三体磨损由胎体、岩石和岩屑于一密闭空间内产生,磨损程度受岩屑流速和流量控制。金刚石脱落后,胎体重新受二体磨损作用,直至新的金刚石出露。不同阶段具有特定的磨损机制,这也使得钻头切削力不断变化。

Li等^[13]建立了岩屑对胎体表面的磨损模型,将胎体假设为一个简化模型,岩屑尖端为锥体,如图6所示。得出 $\epsilon = c \cdot H_m$,式中 c 为常数,胎体的耐磨性与硬度成正比,将硬度作为衡量孕镶钻头基体性能最重要指标之一。

为保证金刚石始终保持在最优的出刃程度,胎体和金刚石间的磨损速率差应控制在合理的范围内。胎体磨损速率过快会导致金刚石提前脱落,二

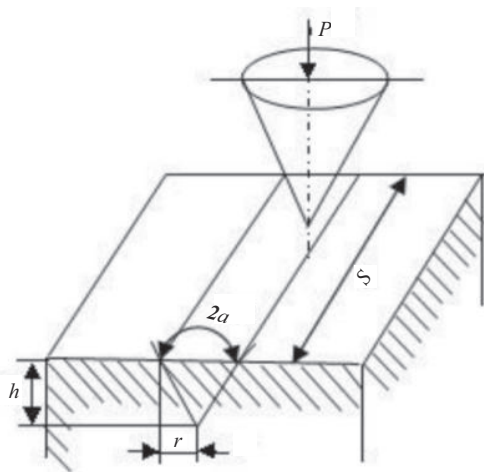


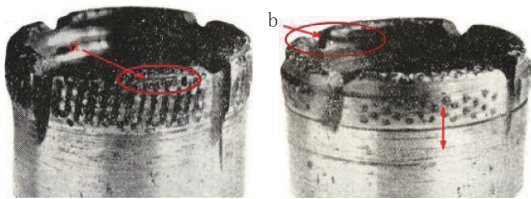
图6 基体压痕模型^[13]

者磨损速率相同时出刃基本为零,故只有当胎体磨损速率适当超过金刚石才可以使得孕镶金刚石钻头正常出刃破碎岩石。汤凤林等^[14]研究了孕镶金刚石钻头在不同出刃下钻头的磨损情况,包括岩屑颗粒磨损(出刃率30%作用)、岩屑密集层磨损(出刃率15%~20%作用)、岩屑和被破碎岩石颗粒形成的压实层磨损(出刃率8%~15%作用)以及预破碎岩石磨损(出刃率0~8%作用)。高出刃率是金刚石高效稳速钻进的关键,正常钻进条件下,井底破碎岩屑量应与排出岩屑量相同。钻进规程的选择对孕镶金刚石钻头钻进规程的影响同样重要,Flegner等^[15]研究了不同转速、钻压在取心钻进中的选择和调整。钻压的增大使钻头与岩石间隙变小,钻井液冲洗量降低,导致钻头磨损加快。同时会产生粒度较大的岩屑,由于不能及时排除,在水槽处剧烈旋转形成孔洞,导致胎体脱落,如图7所示。孕镶金刚石钻头的最佳转速需根据钻头尺寸和岩石类型来判断,每钻进10 cm至少需要100~200 r/min。程敏等^[16]综述了孕镶金刚石钻头在高转速、低钻压、大泵量钻进规程下的磨损失效形式,这也说明了钻进规程的选择对孕镶金刚石钻头碎岩和磨损失效形式具有重大影响。

2 金刚石钻头钻进规程参数

2.1 临界钻进规程

孕镶金刚石钻头钻进效率主要由机械钻速、单趟进尺数及钻进成本3部分进行衡量,钻进规程的选择和确定是钻进效率提升的重要方法之一。汤凤



a—钻头边缘金刚石凹槽;b—钻头内侧金刚石脱落磨损至刚体

图7 胎体磨损情况^[15]

林等^[9]提出了临界钻进规程,从物理学角度可以理解为力与速度的乘积也就是功率,当钻进过程中功率消耗急剧上升时表明达到了临界钻进规程,此时胎体温度急剧上升,钻头损伤加剧导致烧钻。而从数学角度考虑,钻压 P 和转速 n 的乘积为常数,是一个等轴双曲线(如图8所示)。不同岩石具有不同的临界钻进规程。正常规程钻进时,钻井液冲洗量的适量应用,可以保持井底的清洁程度同时保证孕镶金刚石钻头以稳定的出刃量破碎岩石。

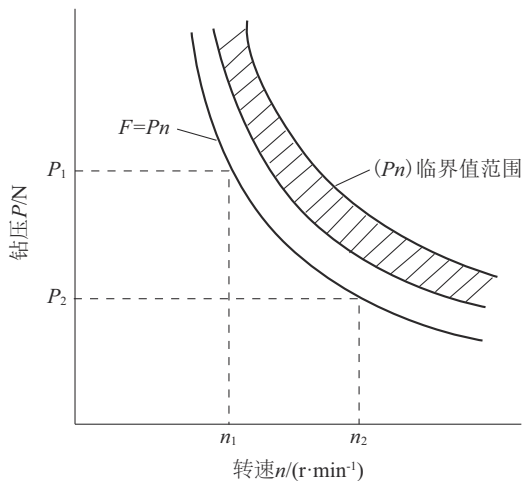


图8 钻压 P 和转速 n 适配区间^[9]

2.2 冲洗液量

冲洗液量的大小对孕镶金刚石钻进效率的影响很大,合理选择冲洗液量有利于提高钻进效率。汤凤林等^[14]通过大量实验得到了钻头每转进尺 h 和冲洗液量 Q 的关系,如图9所示。

测试了不同锐化程度的钻头每转进尺与冲洗液量的变化关系,随着冲洗液量的增加,井底岩屑环境得到改善,每转切深增加,随着冲洗液量的增加,井底岩屑排量达到临界区间,保证井底环境的同时保证孕镶金刚石钻头的合理出露,钻进效率达最高。

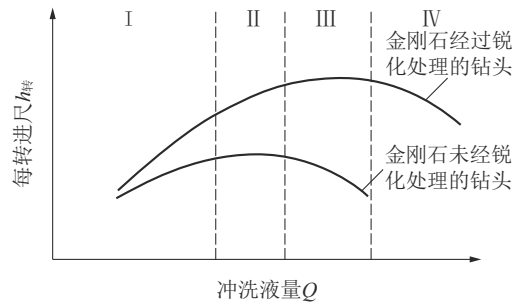


图9 钻头每转进尺 $h_{\text{转}}$ 和冲洗液量 Q 关系^[14]

当冲洗液量超过临界区间后,岩屑排放速度过快,井底岩屑不能对胎体充分磨损,钻头出刃较低,每转切深降低。俄罗斯学者提出了金刚石钻头正常钻进时合理岩屑规程条件,如下式:

$$Q/S_z = (16 \sim 31) \times 10^2 V_M \quad (10)$$

式中: Q ——冲洗液流量, m^3/s ; S_z ——水路总面积, m^2 ; V_M ——机械钻速, m/h 。

冲洗液量的合理选择可以有效促进井底岩屑的排放效率,但在研磨性强的地层钻进时,经常会遇到岩屑排出困难,井底形成“岩屑垫”,使钻头反复破碎。赵小军等^[17]、康鑫等^[18]通过分析孕镶金刚石钻头钻进花岗岩所产生的岩屑,定量研究了金刚石参数、钻进参数对岩屑粒度的影响。表明花岗岩岩屑粒径分布基本符合对数正态分布,岩石粒径大小随钻压增大而增大,超过临界钻压后,粒径变化不大。同样,转速在800~1000 r/min变化时,岩屑粒径变化明显。通过显微观察岩屑特征,发现孕镶金刚石钻头在钻进花岗岩时以体积破碎为主、塑性微切削为辅,如图10所示。

2.3 岩石破碎形式与钻进规程关系

汤凤林等^[9]根据压模试验结果得出,岩石为表面破碎、疲劳破碎和体积破碎3种方式。钻压较低时,岩石表面所受应力远小于岩石破碎强度,钻头的高速回转使金刚石对岩石高频研磨,岩屑较小,该模式为表面破碎。随着钻压的增加,岩石疲劳损伤累积裂隙发育,虽仍未达到岩石破碎强度,但仍可达到碎岩效果,该状态为疲劳破坏。而对于体积破碎,当钻压持续增大界面接触应力超过岩石破碎强度极限,岩石发生大块破碎,碎岩效果最佳。对于上述钻进参数与岩石破碎间的关系,汤凤林等对其进行归纳总结,给出了钻头每转切深与钻进规程参数的关系以及岩石表面疲劳破碎和体积破碎的转换过程,如图11所示。

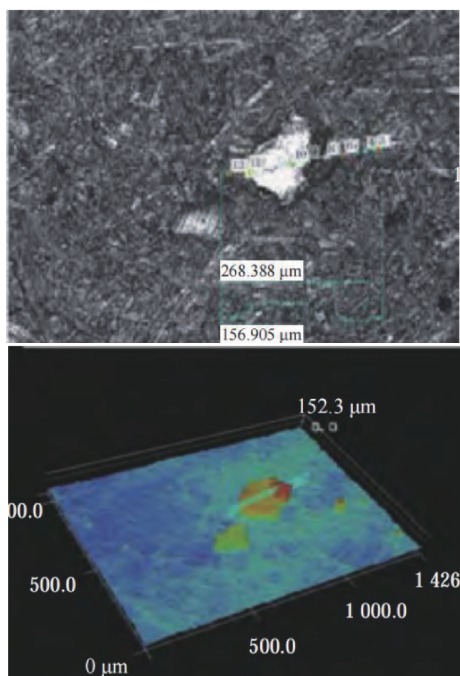


图10 塑性微切削与脆性破碎

汤凤林等总结了俄罗斯钻探工作者在金刚石钻进岩石破碎方面的研究工作,对于孕镶金刚石取心

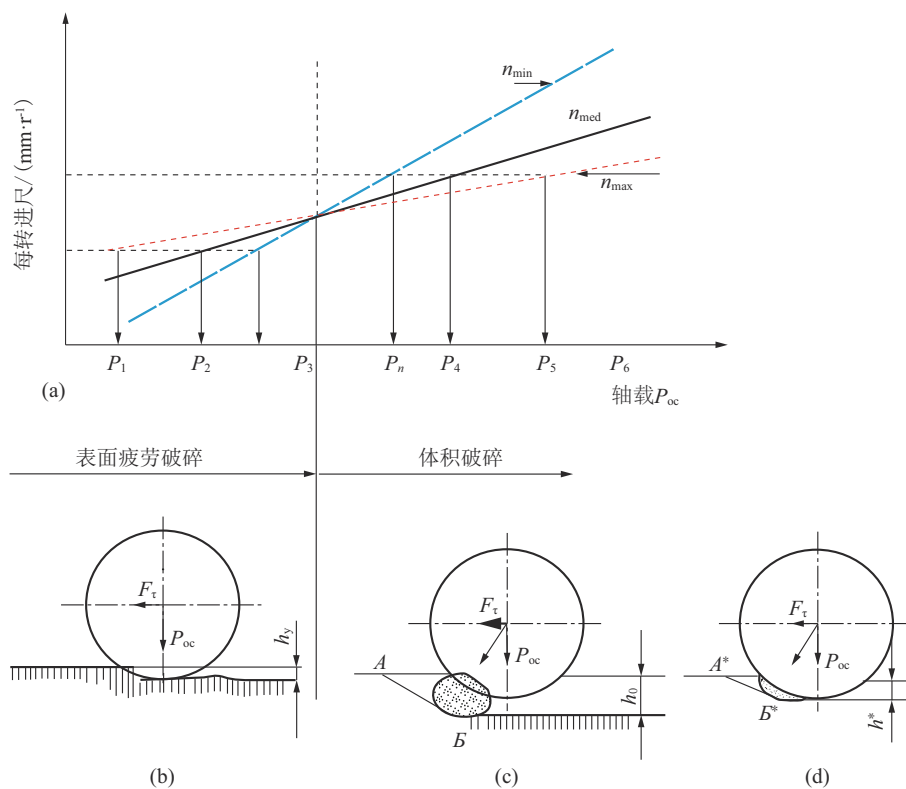
钻探,所钻岩石的岩心部位和钻头本身作用力为拉应力,而钻头下方与岩石间作用力为压应力,加载表面有变形。钻头端部下方剪应力最大,而岩心部位最小,保证了获得高质量岩心。金刚石高转速钻进过程中通常会形成岩石预破碎区,即微裂隙系统发育弱岩层。预破碎区的形成和发展对金刚石钻头高转速钻进高效率、低能耗具有重大意义。乌克兰科学院超硬材料研究所对预破碎区的衍生进行研究,对孕镶金刚石钻头在不同钻压下进行测试,

通过荧光液体对破碎岩石表面进行染色分析,确定预破碎区域面积^[9]。

钻进规程的确立为合理使用孕镶金刚石钻头钻进提供了保障,同时也可以用来实时检测计算孕镶金刚石钻头钻进中钻头的磨损情况,保证钻进效率。

2.4 高转速金刚石钻进规程

金刚石钻进常采用以高转速为主体的钻进规程,在一定范围内,转速越快,钻进效率越高。实际钻井中,当转速超过临界值后,钻头温升过快,磨损加剧,反而降低机械钻速^[19]。因此在常规钻进规程内,通常将转速控制在临界规程之下,转速一般低于



(a) 钻头每转进尺与钻进规程参数的关系; (b) 表面疲劳破碎过程; (c) 体积破碎过程; (d) 体积破碎过程

图11 钻头每转进尺与钻进规程参数的关系以及岩石破碎过程示意^[9]

2000 r/min,线速度仅为1~3 m/s^[19-20]。国内外研究者展开了通过大幅提高转速或线速度的金刚石钻进实验,测试结果表明,硬岩可以在超过常规转速区间内实现高效破碎。随着对该方向研究深入,金刚石高速钻进技术的临界规程与金属加工领域的切削“速度死谷”类似,如图12所示。临界规程可能存在速度上限 v_b ,在临界转速规程之上,还可能存在着另一个“正常规程”^[21]。对于该规程存在的合理性和测试的可行性,国外学者展开了探究并在试验中发现了不同于常规钻进规程的试验现象:当转速达到高转速钻进状态,即进入新的“正常规程”后,随着转速的增加,机械钻速显著增大,而机械比能却出现下降趋势。

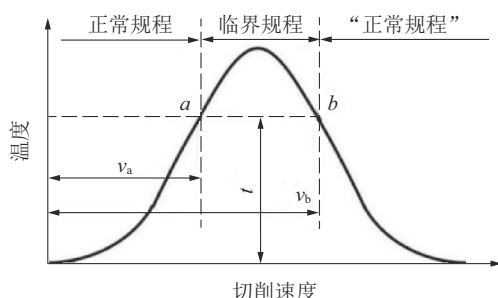


图12 超高速切削温度-速度曲线

美国喷气推进实验室(NASA's Jet Propulsion Laboratory, JPL)开展的火星钻探项目(NASA's MARS Drilling Program)研究中尝试应用了超高速进行钻进实验,专为钻进硬岩设计的金刚石钻头表现出了出色的超高速旋转钻进能力。此外,Black等^[22]利用超高速微钻测试系统(如图13所示),对0.82 in(1 in=25.4 mm,下同)电镀金刚石取心钻头的超高速钻进性能进行了试验测试。

测试结果表明:在转速达10000~50000 r/min

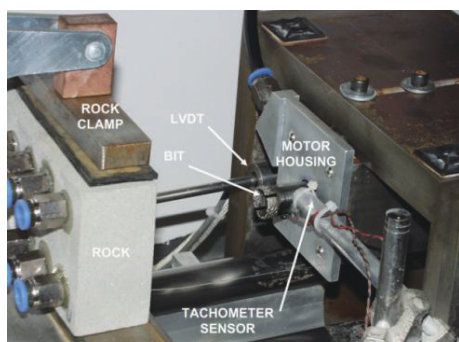


图13 微钻测试系统

的条件下,Berea砂岩的钻进效果良好,机械钻速最高可达85.3 m/h,初次验证了金刚石钻进技术采用超高速进行深地硬岩钻进的可行性。Judzis等^[23-24]利用超高速涡轮钻进测试装置对不同类型的4 1/8 in金刚石钻头的超高速钻进性能进行了全面测试,系统分析了不同硬岩的钻进性能。结果表明,超高速(10~30 m/s)条件下,钻进提速效果最高可达30 m/h。钻头转速一旦达到超高速钻进状态,随着转速的增大,机械钻速呈增大趋势,而机械比能表现出明显的下降,实验结果如图14所示。

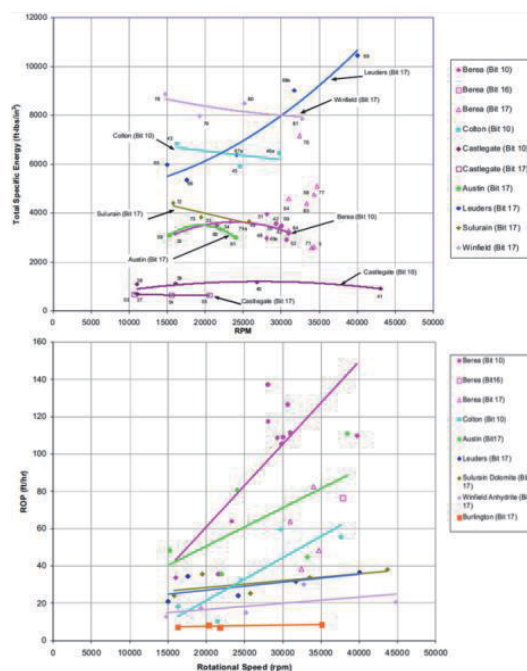


图14 机械钻速、比能随转速变化曲线

但是,虽然采用超高速进行钻进时可表现出在显著提高机械钻速的同时大幅降低钻压和能量输入的特征,但是超高速钻进技术的研究仍处于应用探索阶段,实验测试过程中仍存在一些亟待解决的问题。如:Judzis等^[23]在不同钻头类型的“超高速”钻进性能测试中发现,随着转速的增加,不同钻头类型的钻进效果存在差异,选用钻头类型如图15所示。与TSP钻头和孕镶金刚石钻头不同,设置有TSP和天然金刚石的混合金刚石钻头的机械比能表现出增大趋势,虽有提速效果,但碎岩能耗却增大了。

不同岩石在不同的钻进设备和钻进规程下达到新规程的条件不同,同样对临界转速的定义也不

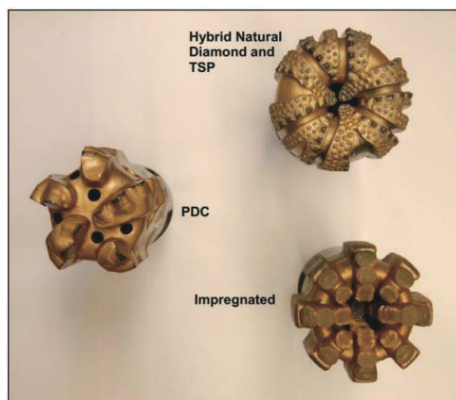


图15 试验选用钻头

同。该技术的应用研究对硬岩钻进效率的提升至关重要,核心在于“超高转速”下钻头-岩石界面规律的转变。“超高转速”对碎岩过程的影响如下:(1)金刚石在“超高转速”作用下单位切削距离增大,前刀面对岩石剪切作用更快,每转切深及钻头压入深度降低,破坏方式可能从以压碎作用为主的塑性碎岩方式向以周期性脆性断裂方式为主的脆性碎岩方式转变;(2)在“超高转速”作用下形成的岩屑小而多^[23],如图16所示,钻头岩石界面不同位置磨损行为发生转变;(3)“超高转速”钻进会对岩石切削过程中的塑性应变生热、摩擦生热及热量传递等多个过程产生影响,钻头与岩石界面间的切削热分配会发生变化,迅速剧烈的热传导将严重影响该钻进过程中的温升过程,新的热平衡的出现^[25-27]。

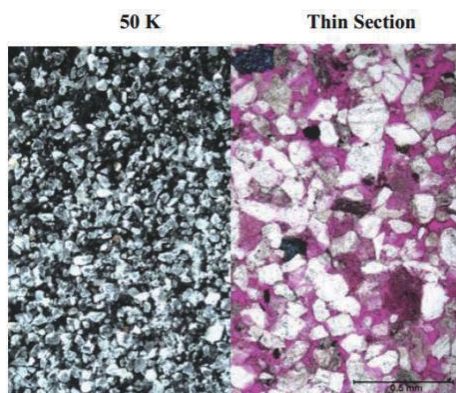


图16 50000RPM采集岩屑与Berea砂岩颗粒比较

国内学者同样对高转速金刚石钻进技术进行了探索,Gao等^[28]通过ABAQUS软件模拟实验,当切削速度超过一定值(8 m/s)后,岩石以脆性破坏为主,温升速率随切削速度增大而下降。可见,“超高

转速”钻进形成的临界条件应与岩石破碎机制转变密切相关,该结论与汤凤林在常规钻进规程下岩石破碎机制转变一致。随着切削速度的增加,热通量、应力标准差和MSE等3个参数随着切削速度(8 m/s)增加而快速增加,如图17所示。李其州等^[29]建立了超高速线性切削模型,从破碎比功、切削力以及切屑形成机理几个方面进行了分析。在切削速度为13 m/s的条件下,最佳切削深度为1.4 mm,此时破碎比功最小,PDC齿破岩效率最高。

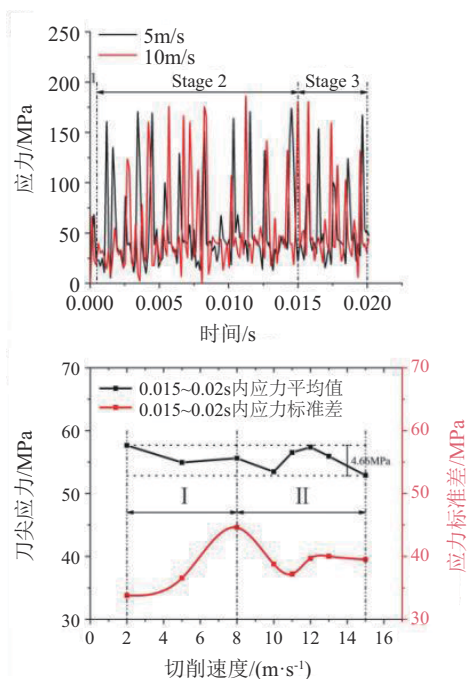


图17 不同切削速度下刀尖应力及应力标准差

综上,开展对高转速金刚石钻进技术的研究,理解认清其性能提升本质,确定该工况下钻头磨损失效机制及不同规程参数选择对其的影响程度,确定新的临界规程为孕镶金刚石钻头高速回转钻进技术的合理应用及其在万米深钻、月球钻探、火星钻探等领域的应用推广提供理论依据。

3 结论与展望

(1)保证钻头在钻进过程中始终处于最佳出刃状态是孕镶金刚石钻头设计研发的关键,对于高转速金刚石钻进技术的研究,不同规程参数下临界条件的确定对钻头受力及磨损响应规律影响较大,包括冲洗液量、钻压、扭矩、钻头水口设计等参数。将钻进规程与钻头磨损结合起来考虑,确定钻头动态

磨损过程至关重要。

(2)参考常规钻进规程下孕镶金刚石碎岩机理及岩石破碎机制的转化,高转速及金刚石钻进碎岩机制的转变原因可能在于金刚石以更快的频率磨削,预破碎区产生时间缩短,面积增大,使得岩石更快的进入体积破碎阶段。

(3)高转速金刚石钻进技术的应用与钻头-岩石-岩屑间的相互作用密不可分,对其进行深入分析,掌握其岩石破坏特征的变化及其对界面摩擦、钻头磨损、切削力及切削热分布规律等的影响,为该技术硬岩钻进中的应用、钻头强化设计和钻进工艺优化等提供理论依据和实验依据。

参考文献:

- [1] Lesso I, Futo J, Krepelka J, et al. Control with acoustic method of disintegration of rocks by rotary drilling[J]. *Metalurgija*, 2004, 43(2):3.
- [2] Krepelka F, Futo J. Acoustics aspects of technological process in the rock disintegration[J]. *Acta Montanistica Slovaca*, 2007, 12(1):4.
- [3] Futo J, Krepelka F, Chlebova Z, et al. Measuring procedure of experimental data acquisition and dataevaluation of acoustic emission in rock disintegration[J]. *Acta Montanistica Slovaca*, 2009, 14(3):6.
- [4] Lesso I, Flegner P, Sujansky M, et al. Research of the possibility of application of vector quantisation method for effective process control of rocks disintegration by rotary drilling[J]. *Metalurgija*, 2010, 49(1):5.
- [5] Lesso I, Flegner P, Pandula B, et al. New principles of process control in geotechnics by acoustic methods [J]. *Metalurgija*, 2007, 46(3):4.
- [6] Detournay E, Defourny P. A phenomenological model for the drilling action of drag bits[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* & *Geomechanics Abstracts*, 1992, 29(1):11.
- [7] Aribowo A G, Wildemans R, Detournay E, et al. Drag bit/rock interface laws for the transition between two layers[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 150:8.
- [8] Franca L F P, Mostofi M, Richard T. Interface laws for impregnated diamond tools for a given state of wear[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 73:10.
- [9] 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.
- [10] 叶纪超, 沈立娜, 杨甘生, 等. 金刚石压入岩石全过程研究[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2018, 38(5):17-20.
- [11] Mostofi M, Richard T, Franca L, et al. Wear response of impregnated diamond bits[J]. *Wear*, 2018, 410:9.
- [12] Miller D, Ball A. The wear of diamonds in impregnated diamond bit drilling[J]. *Wear*, 1991, 141(2):10.
- [13] Li S, Xiang Q, Zhang L. The Wear Mechanisms of Diamond Impregnated Bit Matrix [J]. *Machinery Electronics and Control Engineering III*, 2014, 441:4.
- [14] 汤凤林, Чихоткин в. ф, 段隆臣, 等. 机械钻速与金刚石底出刃、钻进规程参数关系的试验研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2019, 46(12):73-79.
- [15] Flegner P, Kacur J, Durdan M, et al. Significant damages of core diamond bits in the process of rocks drilling[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2016, 59:12.
- [16] 程敏, 庞丰, 孙荣, 等. 高转速/低钻压/大泵量的全面钻进孕镶金刚石钻头[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2015, 35(1):61-67.
- [17] 赵小军, 康鑫, 潘飞飞, 等. 孕镶金刚石钻头破碎花岗岩岩屑粒径分布研究[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2019, 39(1):84-88.
- [18] 康鑫, 段隆臣, 刘卫卫, 等. 孕镶金刚石钻头钻进花岗岩岩屑特性室内试验研究[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2023, 43(1):23-28.
- [19] 蔡家品, 贾美玲, 沈立娜, 等. 难钻进地层金刚石钻头的现状和发展趋势[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2017, 44(2):67-73.
- [20] 杨道合. 科学超深钻井过程中碎岩方法与孕镶金刚石取心钻头的预研究[D]. 武汉:中国地质大学, 2012.
- [21] 李合生, 曾忠, 曹炜. 超高速切削加工技术及其发展趋势[J]. *机械设计与制造*, 2005(5):162-164.
- [22] Black A, Judzis A. Smaller Footprint Drilling System for Deep and Hard Rock Environments Feasibility of Ultra-High Speed Diamond Drilling [C]//Technical Progress Report for the Department of Energy, October 2004, DOE Award Number: DE-FC26-03NT15401.
- [23] Judzis A, Robertson H, Black A. Feasibility of Ultra-High Speed Diamond Drilling [C]//Technical Progress Report for the Department of Energy, March 2006, DOE Award Number: DE-FC26-03NT15401.
- [24] Judzis A, Robertson H, Black A. Smaller Footprint Drilling System for Deep and Hard Rock Environments Feasibility of Ultra-High-Speed Diamond Drilling. Phase 1 Final Report [C]//Technical Progress Report for the Department of Energy January 2007, DOE Award Number: DE-FC26-03NT15401.
- [25] 周琴, 张在兴, 张凯, 等. 钻头切削齿破碎岩石的温度变化试验及机理分析[J]. *天然气工业*, 2020, 40(10):102-110.
- [26] 张在兴, 周琴, 张凯, 等. 岩石切削深度对切削齿温度分布的影响分析[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(S2):492-501.
- [27] 郑国敬, 周琴, 张凯, 等. PDC切削齿刀刃半径对温度分布影响的数值分析[J]. *石油机械*, 2020, 48(6):18-24.
- [28] Gao M, Zhang K, Zhou Q, et al. Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 190:10.
- [29] 李其州, 张凯, 周琴, 等. 切削深度对PDC齿超高速破岩机理的影响分析[J]. *石油机械*, 2022, 50(6):1-8.

(编辑 荐华)