

深部硬岩钻探中孕镶金刚石钻头碎岩单元强化 研究进展及建议

王 英¹, 李禹霄², 张 凯^{*2}, 李富强¹, 刘 晓¹

(1. 山东省煤田地质局第三勘探队, 山东 泰安 271000; 2. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

摘要:随着深部矿产资源的勘探开发与利用的不断发展,孔底环境更加复杂,孕镶金刚石钻头作为地质钻探的专用工具,复杂的深部硬岩地质环境对孕镶金刚石钻头性能也提出更高的要求。孕镶金刚石钻头的碎岩效率及寿命与其碎岩单元性能息息相关,本文对深部硬岩钻进中孕镶金刚石钻头的钻进磨损响应研究现状进行综述,目前研究还不够完善,仍需进一步开展微观深入分析,厘清响应机制。在此基础上,讨论了近年来碎岩单元的创新设计进展,重点从胎体内部结构强化及异形孕镶唇面结构等方面总结分析不同强化方式对切削单元强度、磨损量、钻进效率的影响,研究结果表明确实可以有效提高深部硬岩孕镶钻头的切削效率和工作寿命。从延寿增效的角度讨论了适用于深部硬岩钻进的孕镶金刚石钻头碎岩单元强化方向,为深部地质钻探用孕镶金刚石钻头的设计与制造提供参考。

关键词:深部硬岩;孕镶金刚石钻头;碎岩单元强化;碎岩效率;使用寿命

中图分类号:P634.4 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)05-0001-11

Research progress and suggestions on strengthening fragmented rock units of diamond bit in deep hard rock drilling

WANG Ying¹, LI Yuxiao², ZHANG Kai^{*2}, LI Fuqiang¹, LIU Xiao¹

(1. The Third Exploration Team of Shandong Coalfield Geologic Bureau, Tai'an Shandong 271000, China;

2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: With the continuous development of the exploration, development and utilization of deep mineral resources, the bottom environment of the hole is more complex. Pregnant diamond bit, as a special tool for geological drilling, the complex deep hard rock geological environment also puts forward higher requirements for the performance of pregnant diamond bit. The efficiency and life of crushed rock of pregnant diamond bit are closely related to the performance of broken rock unit. This paper summarizes the research status of drilling wear response of pregnant diamond bit in deep hard rock drilling. At present, the research is not perfect, so further in-depth analysis is needed to clarify the response mechanism. On this basis, discusses the innovation of broken rock unit in recent years, the emphasis from the internal structure and the analysis of different reinforcement way of the cutting unit strength, wear, drilling efficiency, the results show that it can effectively improve the deep hard rock pregnant drill cutting efficiency and working life. From the perspective of prolonging lifespan and increasing efficiency, this paper discusses the direction of strengthening the broken rock unit of impregnated diamond drill bits suitable for deep hard rock drilling, providing reference for the

收稿日期:2023-12-01; 修回日期:2024-03-01 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.05.001

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目“超高转速钻进临界速度及钻头碎岩磨损特征研究”(编号:42202346);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:王英,女,汉族,1973年生,工程技术应用研究员,勘查工程专业,长期从事地质岩心钻探、中深层地热钻探和煤层气钻探相关的研究工作,山东省泰安市泰山区乐园街17号。

通信作者:张凯,男,汉族,1989年生,副教授,地质工程专业,博士,长期从事岩石破碎学、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:王英,李禹霄,张凯,等.深部硬岩钻探中孕镶金刚石钻头碎岩单元强化研究进展及建议[J].钻探工程,2024,51(5):1-11.

WANG Ying, LI Yuxiao, ZHANG Kai, et al. Research progress and suggestions on strengthening fragmented rock units of diamond bit in deep hard rock drilling[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5): 1-11.

design and manufacturing of impregnated diamond drill bits for deep geological drilling.

Key words: deep hard rock; impregnated diamond bit; broken rock unit reinforcement; broken rock efficiency; service life

0 引言

随着我国矿产资源勘查工作的不断深入,浅部资源越来越少,深部矿产资源的勘探开发与利用正逐步成为我国矿产勘查工作未来发展方向。深部地质钻探孔底环境更加复杂,如在某矽卡岩型铁矿勘查钻进作业中钻遇的岩石主要为辉绿岩、辉长岩、玄武岩、矽卡化白云岩、角闪岩、磁铁矿等岩浆岩和变质岩,与浅层相比岩石在研磨性、硬度方面均有较大差别。在钻进深部复杂硬岩地层中,PDC钻头和牙轮钻头常出现磨损率高、切削效率低、过早失效等问题,极大地增加了钻进成本^[1]。与PDC钻头和牙轮钻头相比,孕镶金刚石钻头没有活动的零部件,结构比较简单,具有高强度、高耐磨性和抗冲击的能力,在此类地层中具有更好的钻进性能^[2]。但在深部硬岩钻进过程中,孕镶金刚石钻头仍会出现破岩速度慢、钻头寿命短、破岩成本高等问题,钻头的平均使用寿命仅为30 m左右,这就需要频繁的起下钻更换钻头,大大增加了钻进辅助时间,严重影响钻进效率。孕镶金刚石钻头作为地质钻探的专用工具,复杂的深部硬岩地质环境对钻头性能也提出更高的要求,越来越多地受到国内外研究学者的关注。

孕镶金刚石钻头是由多个孕镶块(碎岩单元)组成的旋转磨削钻头,每一个碎岩单元均由金属胎体粉末与金刚石(天然或合成)烧结而成。在孕镶金刚石钻头碎岩过程中,主要靠随机地分布在金属胎体中的金刚石颗粒切削岩石,这些金刚石颗粒主要靠金属胎体提供的把持力固定在钻头唇面上^[3-4]。在最佳钻进条件下,未磨损金刚石连续渐进出露在磨削面上,始终维持钻头唇面的锋利度,从而实现了稳定高效钻进。这就要求金属胎体的磨损速率应与金刚石颗粒的磨损速率相匹配,以保证金刚石颗粒能够及时出露,最大程度地发挥孕镶金刚石钻头的高效自锐性^[5-6]。然而,深部复杂的硬岩地层环境往往会加剧碎岩单元的磨损,打破钻头碎岩单元的这种“匹配”的磨损平衡,从而影响孕镶金刚石钻头的碎岩效率及寿命。因此,孕镶金刚石钻头的性能和寿命是由碎岩单元的钻进效率和磨损速率决定的,对其进行强化,大幅改善钻头切削单元的性能,

增强其深部硬岩的匹配性,可以有效提高钻头的钻进效率,延长钻头使用寿命。

近年来,国内外对孕镶金刚石钻头碎岩单元均开展了大量的研究。本文对孕镶金刚石钻头碎岩单元磨损及其强化研究现状进行综述,总结分析不同强化方式对切削单元强度、磨损量、钻进效率的影响,从延寿增效的角度讨论了适用于深部硬岩钻进的孕镶金刚石钻头碎岩单元强化方向,为深部地质钻探用孕镶金刚石钻头的设计与制造提供参考。

1 孕镶金刚石钻头碎岩单元钻进磨损研究现状

在深部硬岩钻进过程中,孕镶金刚石钻头的钻进响应既受岩石破碎过程的控制,也受磨损过程的控制,这些过程不断改变金刚石的承载面和结合基质。由于这两个过程共存,都影响整体钻进响应,胎体及金刚石颗粒的磨损速率往往很难协调,需要对钻头碎岩单元的钻进磨损过程进行分析研究,各个环节密切配合才能充分发挥钻头的潜力,大幅提高钻头寿命和效率^[7-8]。对于孕镶金刚石钻头的钻进过程可以通过动力学变量和运动学变量间的关系来描述^[9]。钻头尺度上的动力学变量为钻压 W 和钻头扭矩 T ,而对于孕镶块即磨削元件,动力学变量为磨削力的法向分量 F_n 和切向分量 F_s (图1)。对于钻进过程中的运动学变量包括角速度 Ω (rad/s)和钻进速度 V (mm/s),经过变换将上述变量合并为一个变量,即每转切深 d_b 。

$$d_b = \frac{2\pi V}{\Omega}$$

每转切深 d_b 对应钻头每旋转一圈所磨削破碎岩石的厚度(mm/r)。每个孕镶块的 d_s 是钻头切深的一小部分,取决于钻头唇面孕镶块的数量和排布。金刚石与岩石作用界面处的能量产生和耗散通常表现为前刀面的切削作用和后刀面的摩擦接触两部分。前刀面作用下,钻进系统输入能量全部用于破碎岩石。而在后刀面作用下,金刚石-岩石和基体-岩石两个接触面上发生摩擦接触。

从孕镶金刚石钻头唇面磨损电镜图可以看出,金刚石和基体的磨削面表现出不同的磨损模式(图2),这取决于不同的钻进参数。金刚石在低钻压下

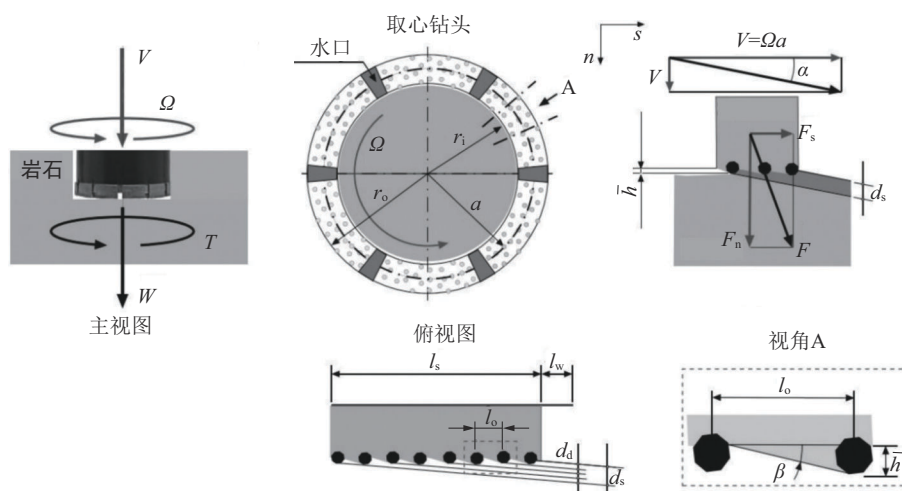


图1 孕镶金刚石钻头碎岩力学响应模型

Fig.1 Modeling the mechanical response of ID bits in rock fragmentation

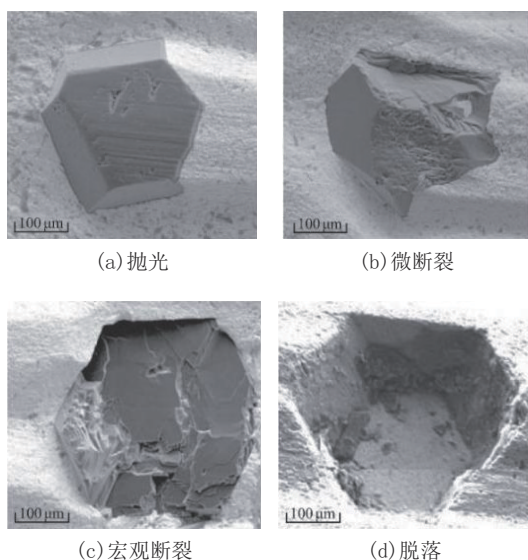


图2 金刚石磨损机理

Fig.2 Mechanism of diamond wear

会发生塑性破坏(抛光),在高钻压下会发生脆性破坏(微观和宏观压裂)。Mostofi等^[10]对孕镶金刚石钻头的磨损机理进行了研究,对孕镶金刚石钻头和齿段进行了一系列精密的切削和钻孔实验。孕镶金刚石工具的磨损响应分为抛光、断裂和锐化3个阶段。在抛光阶段,金刚石磨损平面长度不断增加,而在压裂阶段,金刚石压裂以局部两体基质/岩石磨损为主。基体持续的三体磨损最终导致金刚石脱落,在切削面上暴露出新的金刚石。每个阶段钻头的磨损响应与切削深度和摩擦接触程度的界面规律密切相关。

在抛光阶段,金刚石的塑性破坏最初发生在尖端随后向金刚石底面移动。磨损面以纵向条纹凹槽(金刚石石墨化)为主要特征(如图3所示)。一般情况下,金刚石磨损面面积随移动距离的增加而增大。金刚石脆性破坏中断了磨损面抛光引起的金刚石磨损面发展。在较浅和中等切深中,金刚石的脆性破坏会导致小尺度的压裂,这种压裂通常发生在金刚石尖端(图2b),称为“微断裂”。此外,在较大切深下金刚石脆性破坏归类为“宏观断裂”(图2c)。在较大切深下金刚石磨损面积通常会降低,这也使得磨损面积通常较小。

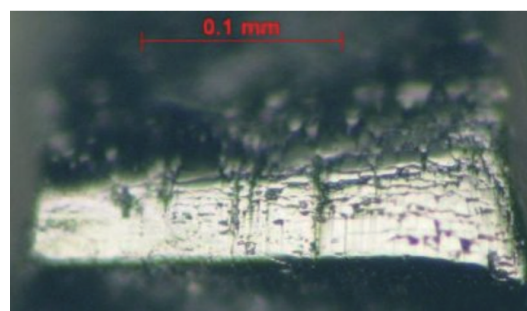


图3 磨损面纵向条纹凹槽

Fig.3 Longitudinal striated grooves on the wear surface

除去金刚石外,基体磨损同样也会影响钻头的碎岩响应。基体磨损存在不同的形式,其中磨损(二体磨损和三体磨损)和侵蚀是其主要机制。基体磨损的产生标志着锐化阶段的开始,岩屑在基体上产生三体磨损(滚动)和侵蚀(冲击)接触。在抛

光和断裂阶段,金刚石的磨损率可以忽略不计,但在锐化阶段(即钻头自锐),钻头唇面会产生大量热,这可能导致钻头发生烧钻。钻头抛光、断裂和锐化循环过程如 E - S 图所示(图4)。数据点在抛光阶段沿金刚石线移动,断裂阶段停留在曲线右侧。到达锐化阶段后数据点从右向左快速移动。

锐化阶段是一个相对较短的阶段,选取孕镶块磨损循环过程中的一段区域(A)对其进行详细描述(图5)。基体二体磨损为主要磨损机制。锐化阶段基体与岩石表面直接接触,界面接触面积增大导致唇面温度升高。在钻头以稳定切深钻进条件下,锐化阶段存在一个显著的响应规律。锐化开始阶段 t 存在一个初始峰值, w 基本保持不变。随着锐化阶段的进行 t 和 w 迅速下降。锐化开始时,随着磨损金刚石的脱落基体磨损长度增加,金刚石磨损长度

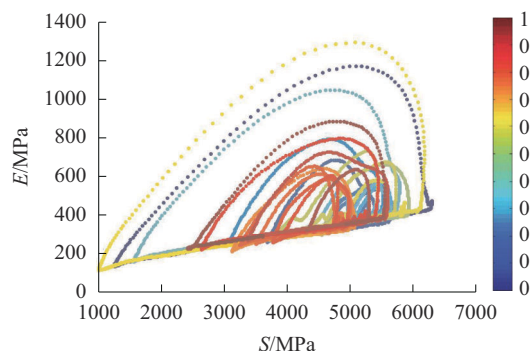


图4 E - S 空间中抛光、断裂和锐化循环过程

Fig.4 Polishing, fracture, and sharpening cycles in E - S space

降低。基体磨损长度对 t 的影响远远超过金刚石。基体磨损后,新的金刚石出露,基体、金刚石磨损长度重新下降。

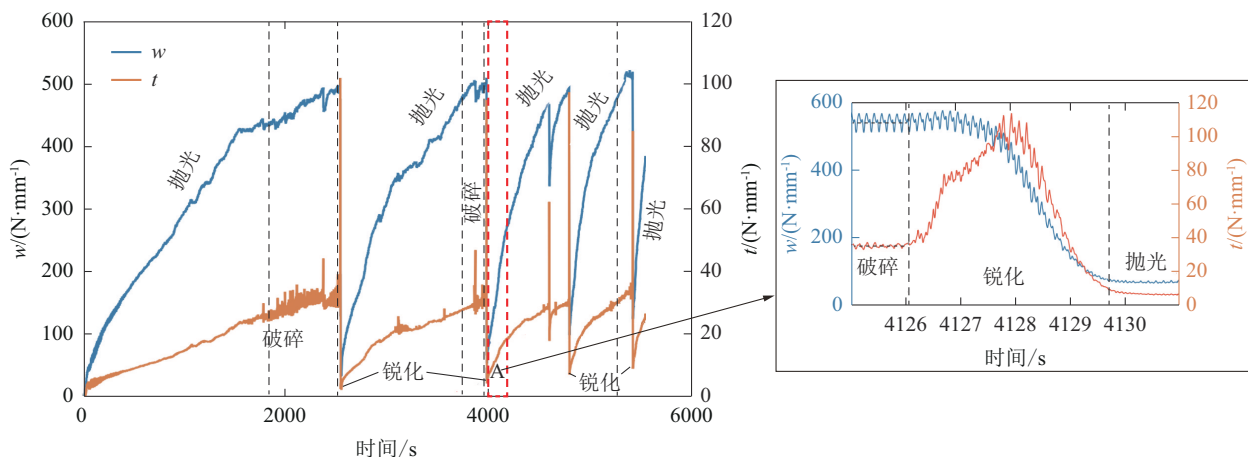


图5 定切深磨损响应曲线

Fig.5 Constant cutting depth wear response curve

通过对孕镶金刚石钻头磨损响应的研究,钻头寿命及钻进效率与孕镶块的出刃程度、出刃速率以及抛光—断裂—锐化3阶段循环过程紧密相关。根据实际钻进过程中所遇地层结合钻进参数,分析钻头磨损规律,提出对应强化方案是提高钻头性能的主要途径。

为了提高孕镶金刚石在复杂难钻强磨料地层中的钻进效率及钻头寿命,Song等^[11]开展了孕镶微钻头钻进实验,实验选用了18~20、25~30、30~35、60~70目4种金刚石粒度,以及75%、100%、125%、150%(400%浓度体系)4种金刚石浓度。得到了相关参数(金刚石浓度、粒度、钻压、转速)对孕镶钻头

切削单元的影响规律,为孕镶钻头的设计提供了依据。通过对不同配方的切削单元开展微钻试验,研究其切削性能,掌握“微切削”破岩条件下不同金刚石参数和钻进参数对孕镶钻头切削效率和耐磨性的影响。通过“微切削”模式,获得了金刚石粒度、浓度、钻压、转速对切削效率和耐磨性的影响规律,掌握了孕镶微钻头对不同岩石的适应性。

为提高孕镶金刚石钻头的工作效率和使用寿命,国内外专家学者对孕镶金刚石钻头碎岩单元的强化研究进行了大量的工作。贝克休斯推出了一种孕镶钻头,它包含分散的切削元件,在现场钻进中非常有效。孕镶金刚石钻头切削元件的适当平

滑度可以提高耐磨性和钻进效率^[12]。Pan等^[13]通过理论推导得出,金刚石粒度和浓度与金刚石出露高度成正比,与金刚石晶粒直径的平方成反比。Beaton等^[14]认为,金刚石磨损率与钻头本体磨损率同步可以提高钻头寿命。Yang等^[15]用金刚石钻头测试钻进瓷砖,发现金刚石磨损随钻头进尺周期性变化。Li等^[16]对仿生异形单元孕镶金刚石钻头进行了实验研究,发现其工作性能明显优于传统的取心钻头。Wang^[17]通过磨损比测试研究了自制仿生样品和常规样品的轴向振荡。与常规样品相比,仿生样品的磨损率提高了92.17%。

常规的孕镶金刚石钻头强化多从胎体配方、钻头结构、金刚石参数设计、制作工艺等方面开展,现有研究讨论分析较多,综合考虑现有研究现状,在钻头强化方面可总结为以下3点^[18-29]:(1)使用高质量、高强度、大粒度的金刚石来抵抗钻头载荷。(2)由于岩屑很小,钻头基体抗磨损能力应较弱,岩屑对钻头基体的磨损性应得到增强。(3)钻头工作面与岩层的接触面积应尽量小,以增加作用在钻头工作上的单位载荷。近年来,随着地质钻探深度的不断增加,孔底环境越来越复杂,常规钻头强化方法的强化效果受限。针对这种问题,国内外研究者展开了大量研究,提出了众多创新设计强化思路,本文重点从胎体内部结构强化及异形孕镶唇面结构等方面进行介绍。

2 孕镶金刚石钻头胎体内部结构创新设计

随着地质钻探深度的提高,针对孕镶钻头钻进“打滑”硬岩地层孕镶块磨损性能差以及孕镶块强度不足等问题,国内学者针对孕镶块碎岩单元强化开展了大量的研究。Wang等^[30]基于仿生理论,以蜥蜴体表为灵感,设计并制备了具有自再生非光滑表面的仿生孕镶金刚石样品(如图6所示)。表面由多个凹单元组成,在整个使用过程中,凹单元始终保持其形状和功能。对比试验结果表明,仿生样品具有优异的耐磨性和磨削性能。众所周知,磨粒残留物和磨损碎屑是基体磨损加剧的主要原因,接触界面间隙过小和磨损屑的堆积是造成上述有害磨损和磨削机理的两个主要原因。通过对仿生样品典型磨损表面的SEM显微图(图7)进行分析可以发现,大量残余颗粒移动到凹坑中,这种颗粒捕获效应大大降低了金属基体的磨损。研究表明,仿生

非光滑表面可以通过增加摩擦界面空间、捕获磨损碎片和润滑接触来减少或避免不良磨损的发生。仿生非光滑表面在外力作用下持续磨损,由于该区域耐磨性相对较低,仿生单元需要保持磨损量始终大于基体,从而始终保持其凹形。这种效应类似生物系统中的自我再生效应,以凹形为特征的非光滑表面能够动态地修复其形状并保持其功能,从而提高整个磨削过程中切削单元的抗磨损和切削性能,更好地适应深部“打滑”硬岩地层。

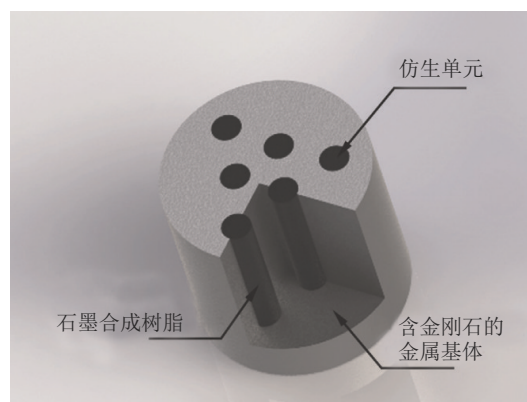


图6 仿生自再生结构局部切片样品

Fig.6 Local cross-sectional samples of biomimetic self-regenerative structure

Tan等^[31]研究了一种新型复合孕镶金刚石钻头,解决孕镶钻头在超硬、致密、非磨蚀性岩层中的打滑问题,新型钻头由烧结孕镶金刚石(SDI)切削齿和支撑体组成,基体耐磨性较低(图8)。该设计减小了钻头工作层与岩层的接触面积,增加了作用在工作层和单粒金刚石的载荷。支撑体的耐磨性较弱,因此在钻井作业中比SDI切削齿磨损更快。现场钻井应用表明,新钻头的钻进速度大约是其他钻头的3~4倍。

高转速增加了单位时间内地层的破碎体积,增加了钻头工作层的磨损。因此,通过提高转速可以显著提高钻头的钻进速度。要实现高转速下的高机械钻速和长钻头使用寿命,钻头基体配比和制造工艺必须协调一致。金刚石参数、金属基体配方、钻头结构、制造技术和钻井参数都是实现超硬、致密、非磨粒岩层高效钻井的重要因素。高烧结温度、高压、烧结时间的增加可以提高切削单元支撑体的耐磨性,抑制金刚石突出,显著降低钻进速度。因此,为更好地发挥SDI切削齿的作用效果,应该采

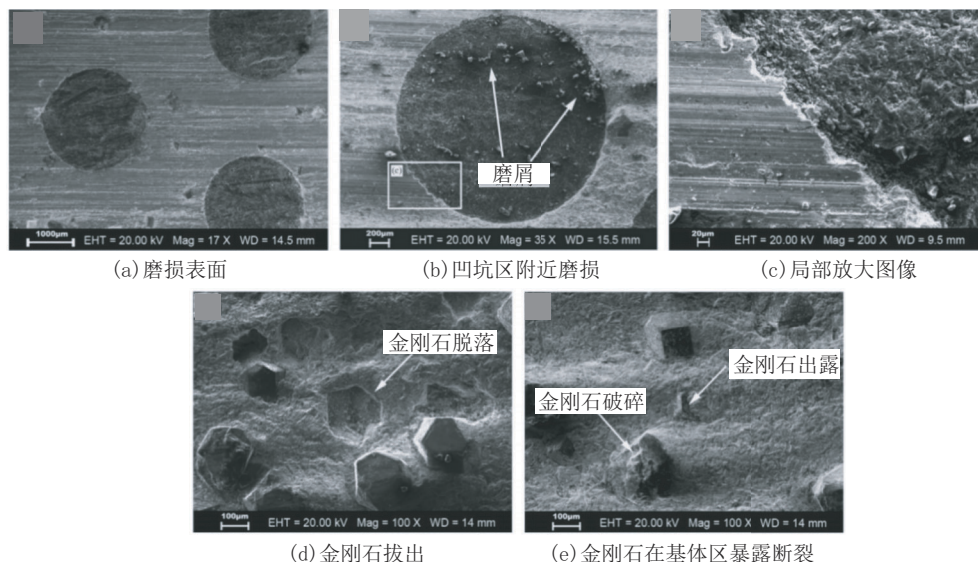


图7 仿生试样的典型磨损形貌SEM显微图

Fig.7 SEM micrographs illustrating the typical wear morphology of biomimetic samples

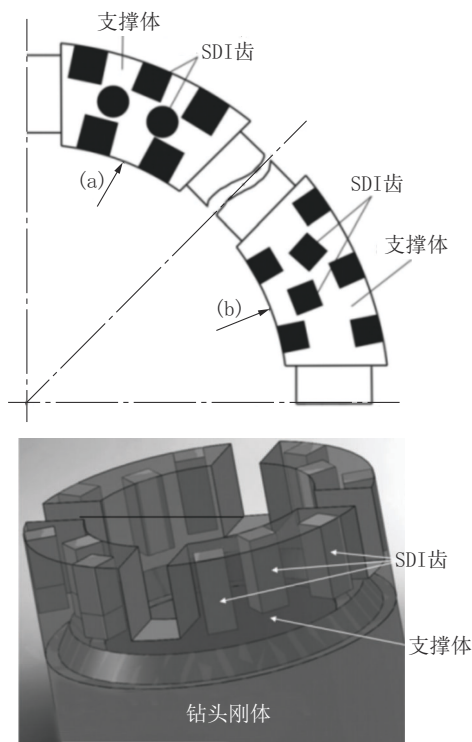


图8 新型复合孕镶金刚石钻头结构

Fig.8 Structure of novel composite ID bit

用更高的转速或更大的钻头载荷来增加支撑体的磨损,并确保钻头载荷集中在SDI切削齿上。切削单元耐磨性和SDI切削齿与钻头底面的面积比显著成正比。面积比小会导致磨损,形成环形沟槽。同时,较大的面积比阻碍了磨损,容易造成环空裂缝。

面积比匹配不当,反而会降低钻头的使用寿命。在未来的应用中,可以通过增加钻头工作层高度或调节SDI切削齿与钻头底面的面积比来延长使用寿命。因此,从孕镶钻头内部结构角度开展研究,向孕镶块内插入强化单元可以有效提高钻头的耐磨性,不同单元件间的磨损响应以及强化单元结构会对钻头性能带来较大改变。

在上覆岩层的压力作用下,深孔内岩石的密度会增大,不仅岩石密度和硬度会增加,而且岩石有由脆性致密岩向塑性致密岩转变的趋势。同时地层中形成岩矿物坚硬,粒度小,胶结强度高。在该类型岩石中钻进通常会加速钻头磨损速度,相同钻进深度所需钻头数量更多。针对孕镶钻头使用寿命降低问题,Jia等^[32]针对深孔硬岩的钻进特点,从结构、基体、金刚石参数等方面设计了一种新型高胎体孕镶金刚石钻头。可显著提高深孔钻井效率,降低钻进施工成本(图9)。

与传统钻头相比,新型金刚石钻头寿命提高1.5倍以上,钻速提高20%以上。该钻头可大大提高深孔硬岩的钻进效率。为增加“自由切割面积”和“挤压破碎区”,钻头的唇面形状可采用常规强化方法,设计为梯状、锯齿状。在钻孔的早期阶段,钻头可以在岩石上形成切割的形状,从而降低岩石的整体强度。通过机械破碎和研磨相结合的方法提高岩石破碎效率。

Yang等^[33]对须家河地层孕镶钻头的失效进行

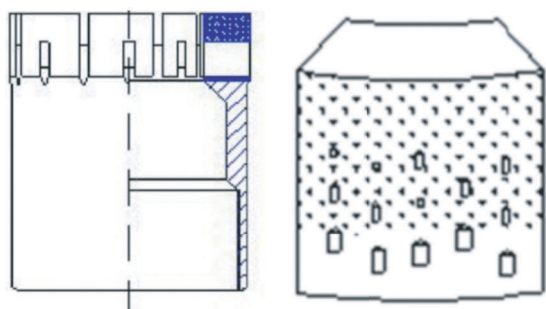


图9 高胎体孕镶金刚石钻头及保径设计

Fig.9 High core ID bit and gauge-protection design

了分析,为须家河地层设计了新型孕镶钻头和切削单元。为了提高钻头中心的切削效率,延长钻头寿命,在钻头中心设置了3个PDC切削齿。采用纵横刀的横刀排列技术,大大提高了切削元件的高度和金刚石密度。垂直切削齿与水平切削齿之间的间隙有利于岩屑的排出和钻井液对切削元件的冷却和清洗,在高速切削条件下大大提高了钻头的破岩效率和工作寿命。为防止岩屑堵塞流道,钻头水工结构设计为直径90 mm的大水口,可以充分清洁冷却钻头,增加通流面积。选用金刚石磨粒,减少钻头外径的磨损。钻头模型如图10所示。新型孕镶钻头兼顾了钻头的切削效率和耐磨性,垂直切削齿与水平切削齿的交叉排列,与常规孕镶钻头相比,新型孕镶钻头的切削效率和工作寿命显著提高,为复杂、高磨蚀地层提高孕镶钻头钻进速率提供了技术支持。

综上所述,对孕镶金刚石钻头胎体内部结构开展创新设计,确实可以有效提高深部硬岩孕镶钻头的切削效率和工作寿命,尤其在解决深部致密坚硬地层中的打滑问题效果明显。但部分研究还停留在实验室研发阶段,并未投入到实际钻探中来,下一步应继续结合常规孕镶金刚石钻头强化思路,从胎体配方、钻头结构、金刚石参数设计、制作工艺等方面对技术进一步改进,将会加速此钻头新技术的现场应用推广。

3 异形孕镶唇面结构创新设计

孕镶金刚石钻头唇面结构对钻头钻进影响巨大,常规唇面结构多年来一直未有大的改进,其对深部地层的适应性效果不佳。近年来,国内外研究者除胎体内部结构强化创新设计外,还在异形孕镶唇面结构创新设计方面展开了大量研究。

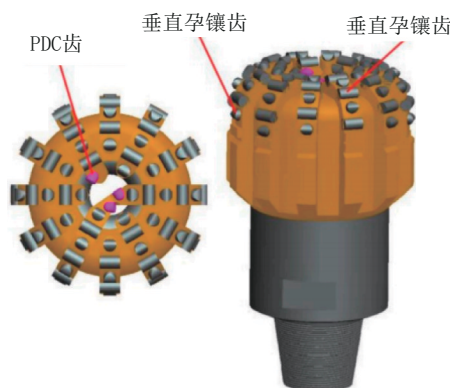


图10 须家河地层实验钻头实钻前后对比

Fig.10 Xujiache formation drill bit before and after actual drilling comparison

Liu等^[34]提出了一种基于岩石断裂力学的取心钻头设计方法,可以精确地求出取心钻头的几何形状、最佳的切削齿数,以获得最小的钻进能耗,最大限度地提高钻进速度。基于此方法设计了一系列新型钻头,在冲击和振动钻进过程中,沿切削刃底部环空有一系列切削齿,可穿透脆性材料。模拟实验钻进试验表明,取心钻头总比能随齿数的实验变化符合分析预测。以USDC(超声波钻孔取心器)为例,60°楔角的6齿取心钻头最适合实现最大钻速。

Li等^[35]针对海洋取心钻探中硬质岩层(如碳酸盐岩结壳、沉积岩坚硬燧石夹层)的金刚石取心钻头技术进行分析。金刚石取心钻头的设计针对深海硬岩地层,选择底部平坦形状作为钻头的主唇形,有利于压裂底部岩层。在此基础上,钻头底部被设计成尖头同心圆形状或尖头交错形状。在结构设计中充分考虑了金刚石工作层的抗冲击性和抗疲劳载荷性,以及水孔对金刚石工作层强度的影响。为解决钻头寿命短的问题,通过多层偏心螺旋齿、错位式水槽、过渡切削工作层(图11)等结构设计,对工作层高度进行了优化研究。最大限度地提高了基体工作层的高度,保证了基体的强度和抗冲击性。

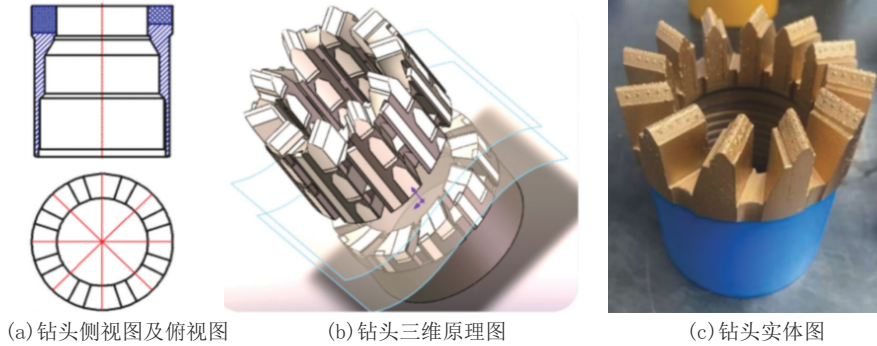


图11 深海硬岩地层金刚石钻头结构

Fig.11 Diamond drill bit structure used in deep-sea hard rock formations

Suprun 等^[36]对孕镶金刚石钻头切削单元的耐磨性进行了评价,研究了加固破碎岩单元的排列方式对钻头工作面的影响。根据破岩镶块加固钻头工作面的方法,推导出钻头工作面有效磨损率的计算公式。建立了钻头齿形变化的数学模型。该模型适用于组合基体的优化设计,包括齿形的选择、不同耐磨性破岩齿的数量和排列。Hybridite是由乌克兰国家科学院巴库尔超硬材料研究所开发的材料,这种复合材料结合了合成金刚石、天然金刚石和CVD金刚石的优点,具有很高的物理机械性能,因此可以用于钻头基体磨损增加的地方^[37]。模型参数是钻头工作层的有效磨损系数 $K=K_{\text{eff}}(r)$,这取决于其用TDCC或Hybridite破岩镶块加固的方法。为了更详细地预测岩心钻头 $f(r,t), t>0$ 的强化工作面轮廓形状,对于图12所示的模型,我们应该首先确定一个 $K=K_{\text{eff}}(r)$ 的“等效”材料,该材料在任何时刻 t 具有与实际钻头相同的磨损率和几何轮廓。选择等效材料的过程本质上类似于确定结构非均匀介质力学中的“有效”性质,这使我们能够使用相关的方法。“均质化”过程如图13所示。

针对深部的硬滑地层,研究人员根据土壤动物的爪趾特征进行了相关研究。以蜈蚣的爪趾作为单齿结构设计的仿生原型(图14),研究者进行了仿生取心钻头的结构设计,完成了钻头的试生产和现场试验,并对其使用寿命和钻进效率等指标进行了综合评价。这种结构可以使受力均匀,减少应力集中造成的破坏,延长钻头的使用寿命。环齿之间有一层软齿基质层,环齿的结构与蜈蚣爪趾的结构相似。在钻进过程中,工作层和软钻头基体层的耐磨性是不同的。因此,环齿的形状将自动形成。加固

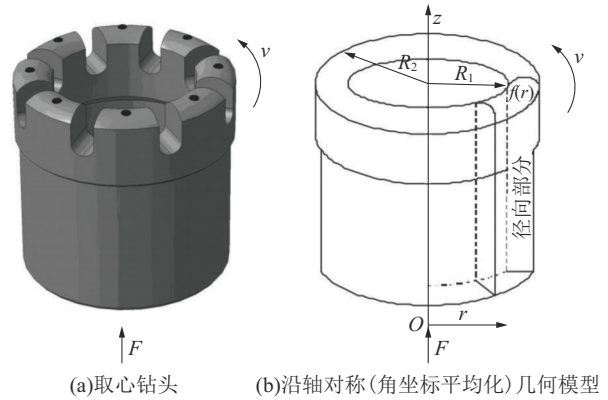


图12 取心钻头及其轴对称几何模型

Fig.12 Core sampling drill bit and its axisymmetric geometric model

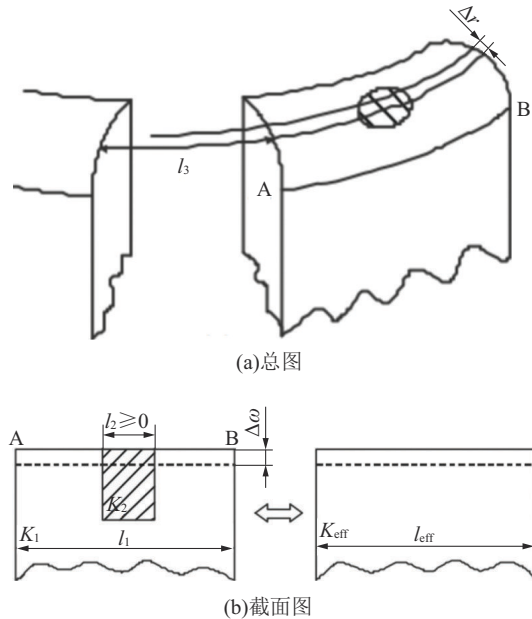


图13 确定有效磨损系数示意

Fig.13 Schematic diagram for determining the effective wear coefficient

肋能以体积破碎的形式破坏岩石。将传统的金刚石孕镶破岩机理转变为磨破碎和体破碎同时进行

的形式,提高了钻进效率。

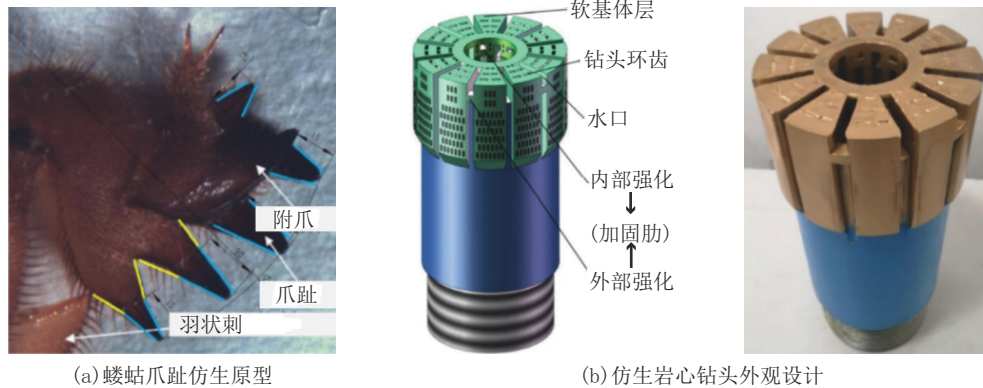


图14 以蜈蚣的爪趾作为单齿结构仿生的金刚石钻头

Fig.14 Biomimetic diamond drill bit with single tooth structure inspired by Mole's Claw

综上可知,对孕镶金刚石钻头异形孕镶唇面结构开展创新设计,同样可以有效改善深部硬岩孕镶钻头的切削效率和工作寿命,尤其在深部硬地层中的提速问题效果明显。目前大部分研究还停留在实验室研发阶段,效果虽然显著,但并未得到现场验证,各设计方法还不够成熟,还需持续改进,进一步完善。

4 结论与建议

(1)深部硬岩钻进中孕镶金刚石钻头的钻进磨损响应研究虽取得了一定进展,但研究还多停留在宏观层面,有待进一步深入研究。从部分研究成果中可以看出,虽然基于研究成果提出的强化方案大部分改进效果明显,但也存在改进效果不稳定的问题。可见,深部硬岩胎体及金刚石颗粒的磨损速率协调难的问题依然未能根本解决。未来仍需进一步深入细化研究钻头的钻进磨损响应,开展微观磨损细致分析,为深部地质钻探用孕镶金刚石钻头的设计提供依据。

(2)从胎体配方、钻头结构、金刚石参数设计、制作工艺等方面开展的常规孕镶金刚石钻头强化研究,并不能很好地满足深地复杂的孔底环境要求,常规强化方法的强化效果受限。国内外研究者从胎体内部结构强化及异形孕镶唇面结构等方面提出了众多创新设计强化思路,研究结果表明确实可以有效提高深部硬岩孕镶钻头的切削效率和工作寿命。但大部分强化效果未得到现场验证,还

需下一步继续结合常规孕镶金刚石钻头强化思路对技术进一步改进。创新孕镶金刚石钻头碎岩单元设计,大幅提升钻头的使用寿命和工作效率,解决深部硬岩传统孕镶金刚石钻头通常会出现的破岩速度慢、钻头寿命短、破岩成本高等问题,依然是未来深部地质钻探用孕镶金刚石钻头的设计与制造的重要研究方向。

参考文献(References):

- [1] 王滨,邹德永,李军,等.深部及复杂地层中PDC钻头综合改进方法[J].石油钻采工艺,2018,40(1):44-51.
WANG Bin, ZOU Deyong, LI Jun, et al. A comprehensive method to improve the performance of PDC bits in deep and complex formations[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018,40(1):44-51.
- [2] Liu W, Gao D. Study on the anti-wear performance of diamond impregnated drill bits [J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2021,99.
- [3] 李梦.无硬质相胎体仿生异形齿孕镶金刚石钻头研究[D].长春:吉林大学,2017.
LI Meng. Research on no-hardphase-matrix impregnated diamond bit with bionic abnormal shape[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [4] 李梦,苏义脑,孙友宏,等.高胎体仿生异形齿孕镶金刚石钻头[J].吉林大学学报(工学版),2016,46(5):1540-1545.
LI Meng, SU Yinao, SUN Youhong, et al. High matrix bionic abnormal shape impregnated diamond bit[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2016, 46(5): 1540-1545.
- [5] 王训波,谭刚,高晓亮.多层水口高胎体孕镶金刚石钻头研究

- [J]. 硬质合金, 2011, 28(2): 93-97.
- WANG Xunbo, TAN Gang, GAO Xiaoliang. Study on impregnated diamond bit using multilayer water way[J]. Cemented Carbide, 2011, 28(2): 93-97.
- [6] 王传留, 孙友宏, 高科, 等. 金刚石钻头可再生水口的试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(3): 694-698.
- WANG Chuanliu, SUN Youhong, GAO Ke, et al. Experimental study on bionic nozzle of diamond bit[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40(3): 694-698.
- [7] 蒋青光, 张绍和, 陈平, 等. 新型优质孕镶金刚石钻头研制[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2008(6): 12-16.
- JIANG Qingguang, ZHANG Shaohe, CHEN Ping, et al. Development of new type and high quality impregnated diamond bits[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2008(6): 12-16.
- [8] 杨俊德, 陈章文. 新型高时效金刚石钻头试验研究[J]. 超硬材料工程, 2007(1): 26-28.
- YANG Junde, CHEN Zhangwen. The experimental study on the new pattern diamond bit with high drilling speed[J]. Superhard Material Engineering, 2007(1): 26-28.
- [9] 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: 184-193.
- [10] Mostofi M, Richard T, Franca L, et al. Wear response of impregnated diamond bits[J]. Wear, 2018, 410: 34-42.
- [11] Song D, Ren Z, Yang Y, et al. Drilling performance analysis of impregnated micro bit[J]. Mechanical Sciences, 2022, 13(2): 867-875.
- [12] Botelho R., Barreto J., Anato W. Drilling optimization at the Aloctono Block in Venezuela with the utilization of latest technologies in impregnated bits and turbines[J]. SPE99602, 2006.
- [13] Pan B.S., Yang K.H., et al. Effect of diamond particle size on properties of impregnated diamond[J]. Coal Geol. Explor., 2002, 30(3): 62-64.
- [14] BeatonTim, JohnsonKeith. New technology in diamond drill bits improves performance in variable formations[J]. SPE 59113, 2000.
- [15] Yang J. D., Chen Z. W. Experimental study on new type high aging diamond bit[J]. Superhard Mater. Eng. 2007, 19(1): 26-28.
- [16] Li M., Su Y. N., Sun Y. H., et al. 2016. Diamond bit impregnated with bionic profiled teeth and high matrix[J]. Jilin Univ. (Eng. Ed.), 2016, 46(5): 1540-1545.
- [17] Wang Z. Z. Study on wear-resistant and synergistic mechanism of biomimetic coupled impregnated diamond bit[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [18] 苏力才, 李永卫, 李明星, 等. 孕镶金刚石钻头选择及高效钻进实践探讨[J]. 西部探矿工程, 2022, 34(6): 91-94, 97.
- SU Licai, LI Yongwei, LI Mingxing, et al. Selection and efficient drilling practices of pregrooving diamond drill bits: A discussion[J]. West-China Exploration Engineering, 2022, 34(6): 91-94, 97.
- [19] 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.
- [20] 高科, 王金龙, 赵研, 等. 仿生自补偿一体式高胎体孕镶金刚石取心钻头研究[J]. 钻探工程, 2022, 49(1): 16-24.
- GAO Ke, WANG Jinlong, ZHAO Yan, et al. Bionic self-compensating integrated high-matrix impregnated diamond coring bit[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1): 16-24.
- [21] 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.
- [22] 汤凤林, 赵荣欣, Нескоромных В.В., 等. 金刚石钻进技术指标综合研究及其计算机控制[J]. 钻探工程, 2023, 50(3): 1-7.
- TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, NESKOROMNYH V.V., et al. Comprehensive research on technical indexes in diamond drilling and their computer control[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(3): 1-7.
- [23] 汤凤林, 沈中华, 段隆臣, 等. 不同地层钻进用金刚石钻头分析研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(4): 87-92.
- TANG Fenglin, SHEN Zhonghua, DUAN Longchen, et al. Analytical research on diamond drill bits used in different formations[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(4): 87-92.
- [24] 梁振德, 韦锋. 适应深孔条件的孕镶金刚石钻头分析[J]. 中国设备工程, 2020(8): 161-162.
- LIANG Zhende, WEI Feng. Analysis of pregrooving diamond drill bits adapted to deep-hole conditions[J]. China Plant Engineering, 2020(8): 161-162.
- [25] 张绍和, 孔祥旺, 孙平贺, 等. 孕镶金刚石钻头设计与制造新技术回顾与展望[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1): 1-12.
- ZHANG Shaohe, KONG Xiangwang, SUN Pinghe, et al. Review and prospect of new technologies for design and manufacture of impregnated diamond bits[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 1-12.
- [26] 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.
- TANG Fenglin, CHIKHOTKIN V. F., DUAN Longchen, et al. Experimental research on dependence of penetration rate on diamond exposure at bit face and drilling parameters[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(12): 73-79.
- [27] 凌振武, 骆建诗. 提高金刚石钻头在深孔硬岩钻进中寿命的途径[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2018(12): 54.

- LING Zhenwu, LUO Jianshi. Ways to improve the lifespan of diamond drill bits in deep-hole drilling of hard rock[J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2018(12):54.
- [28] 王佳亮,张绍和.针对坚硬致密弱研磨性岩层的金刚石钻头研究进展[J].金刚石与磨料磨具工程,2016,36(2):78-83,88.
- WANG Jialiang, ZHANG Shaohe. Progress and development on impregnated diamond bit for ultra hard compact and weak-abrasion rock formation[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2016,36(2):78-83,88.
- [29] 沈立娜,张宜,郭庆斌,等.多级金刚石表孕镶钻头在坚硬岩屑砂泥岩互层的应用研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(12):36-39.
- SHEN Lina, ZHANG Yi, GUO Qingbin, et al. Research on the application of multi-stage surface set diamond bit in very hard rock and mudstone interbed[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(12):36-39.
- [30] Wang Z, Zhang Z, Sun Y, et al. Wear behavior of bionic impregnated diamond bits[J]. Tribology International, 2016,94:217-222.
- [31] Tan S, Fang X, Yang K, et al. A new composite impregnated diamond bit for extra-hard, compact, and nonabrasive rock formation[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2014,43:186-192.
- [32] Jia M L, Cai J P, Ouyang Z Y, et al. Design & application of diamond bit to drilling hard rock in deep borehole[C]//2014 International (China) Geological Engineering Drilling Technology Conference (Igedtc2014), 2014,73:134-142.
- [33] Yang Y, Song D, Ren H, et al. Study of a new impregnated diamond bit for drilling in complex, highly abrasive formation [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020,187.
- [34] Liu Y, Mavroidis C, Bar-Cohen Y, et al. Analytical and experimental study of determining the optimal number of wedge shape cutting teeth in coring bits used in percussive drilling[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of The Asme, 2007,129(4):760-769.
- [35] Li X, Xiong L, Xie W, et al. Design and experimental study of core bit for hard rock drilling in deep-sea[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023,11(2).
- [36] Suprun M V, Kushch V I, Zakora A P, et al. Assessment of wear resistance of a core drilling bit with hybridite reinforcing inserts [J]. Journal of Superhard Materials, 2015, 37 (6) : 431-437.
- [37] Flegner P, Kacur J, Durdan M, et al. Significant damages of core diamond bits in the process of rocks drilling[J]. Engineering Failure Analysis, 2016,59:354-365.

(编辑 荐华)