

PDC 异形齿破岩研究与应用进展

王 虎¹, 胡 永¹, 赵洪波^{2*}

(1. 新疆亚新煤层气投资开发(集团)有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830063; 2. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083)

摘要: PDC 齿作为切削单元, 决定了 PDC 钻头的破岩性能, 不同齿形的 PDC 钻头对钻井提速和使用寿命影响较大。通过优化 PDC 齿的结构和材料性能, 可显著提高钻头的破岩效率和耐用性。近年来, 随着材料科学、制造技术和数值模拟的进步, PDC 异形齿在钻井提速方面取得了较好的应用效果。本文总结了异形齿破岩机理、布齿设计以及现场应用等方面研究进展, 并给出下一步发展建议, 以期后续 PDC 异形齿选型和钻头设计提供有益参考。

关键词: PDC 异形齿; PDC 钻头; 钻井提速; 试验与模拟; 进展与建议

中图分类号: P634.4⁺1; TE921 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)05-0010-08

Research and application progress of special-shaped PDC cutters in rock breaking

WANG Hu¹, HU Yong¹, ZHAO Hongbo^{2*}

(1. Xinjiang Yaxin Coalbed Methane Investment and Development (Group) Co., Ltd., Urumqi Xinjiang 830063, China;
2. Oil & Gas Survey Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China)

Abstract: The influence of different polycrystalline diamond compact (PDC) cutter geometries on drilling efficiency has drawn significant research attention. Substantial improvements in rock-breaking efficiency and bit durability can be achieved through optimization of cutter structural design and enhancement of material properties. Recent advancements in materials science, manufacturing technology, and numerical simulation have facilitated notable progress in the application of non-planar PDC cutter geometries for drilling efficiency. This paper systematically reviews research advancements in rock-breaking mechanisms, cutter layout design, and field applications of special-shaped cutters through experimental and numerical investigations. Furthermore, it proposes recommendations for future development directions, aiming to provide valuable insights for enhancing PDC drilling performance. The comprehensive analysis integrates fundamental mechanisms with practical engineering considerations, offering a scientific framework for optimizing cutter configurations in the challenging formation drilling scenarios.

Key words: special-shaped PDC cutter; PDC bit; drilling speed increase; experiment and simulation; progress and suggestion

0 引言

聚晶金刚石复合片(Polycrystalline Diamond Compact, PDC)作为切削单元, 决定了PDC钻头的

破岩性能, 不同齿形的PDC钻头对钻井提速和使用寿命影响较大。近年来, 非传统几何PDC齿形被广泛研究, 以提高破岩效率, 增强抗冲击、抗磨损性

收稿日期: 2025-03-05; 修回日期: 2025-05-05 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.05.002

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20230262、DD20240052); 中国地质调查局油气资源调查中心英才培养项目“异形齿PDC钻头破岩机理研究及新型钻头研制”(编号: 油科创[2023]-YC03); 新疆亚新煤层气投资开发(集团)有限责任公司外委项目“尼勒克煤田胡吉尔台东地面井瓦斯治理项目(一期)HDCS-10井技术服务”

第一作者: 王虎, 男, 汉族, 1974年生, 高级工程师, 钻井工程专业, 从事石油工程技术工作, 新疆乌鲁木齐市高新区(新市区)四平路266号, 642678749@qq.com。

通信作者: 赵洪波, 男, 汉族, 1988年生, 高级工程师, 地质工程专业, 博士, 主要从事科学钻探、油气钻井技术及工艺研究等工作, 北京市海淀区北四环中路267号, zhaohb@email.cugb.edu.cn。

引用格式: 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.

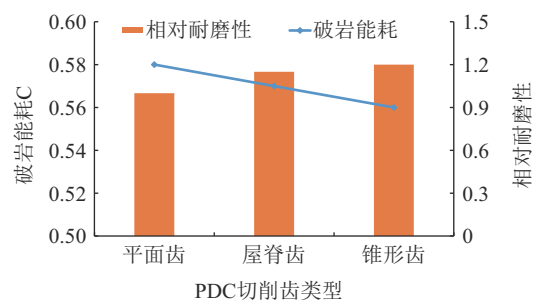
能^[1]。PDC异形齿是切削齿二维平面设计的突破,基于复合片材料的综合性能,采用非平面切削结构切削破碎岩石,比较常见的异形齿有凹面齿、凸面齿、奔驰齿、脊形齿、楔形齿、椭圆齿、鞍形齿、锥形齿、菱形齿、尖圆齿、双曲面齿以及尖齿等,其中脊形齿(如屋脊齿、斧形齿、三棱齿等)、锥形齿、尖齿在钻头设计中被广泛应用。目前,多齿形线复合形成的特殊异形齿(如斜屋脊齿、曲面屋脊齿、圆弧曲面齿、波浪齿等)也逐渐应用于钻头设计中^[2]。斯伦贝谢公司针对不同齿形与不同地层的适应性做了总结和分析,探讨了软-中-硬地层优选PDC齿形。不同的异形齿在切削难易度、耐磨性等某一方面或多方面表现出良好的破岩效果和较长的使用寿命,应用于深部钻井中钻进非均质和研磨性地层时,具有较高的钻效和较长的进尺^[3-4]。

1 理论研究进展

PDC钻头破岩效率与钻井参数、地层岩性、钻头结构密切相关。PDC齿材料和齿形对PDC钻头的耐磨性、热稳定性和破岩效率影响很大^[5](见图1)。目前,国内外开展PDC切削齿破岩机理研究主要采用台架实验与数值模拟,基于破岩比功理论,通过改变结构(切削角)、状态(转速、围压等)、齿形等因素来研究破岩规律^[6-8]。主要包括:(1)开展不同钻压(受力)、切削深度、切削速度、前(后)倾角(切削角)等条件下多种齿形单齿切削破岩机理研究;(2)建立切削齿切削岩石有限元模型,对比分析岩石破碎程度,模拟不同岩性(花岗岩、大理岩、白云岩等)和不同状态(温度、钻压、转速)下PDC破岩效果^[9-11];(3)开展全尺寸钻头或微钻头破岩试验,分析破岩过程受力或切削齿磨损情况^[12]。

1.1 破岩方式

不同齿形破岩方式和造成的岩石损伤状态差异较明显,基于有限元法并利用ABAQUS建立几种常见的PDC齿切削破碎岩石模型,分析岩石损伤状态。PDC齿破岩以切削为主,通过吃入岩石在切削齿前方和下方形成塑性破碎区。当切削齿行进时,接触区岩层被剪切破碎同时被强制移除,该区域为移除区,在移除区周缘构成影响区,影响区越宽,其纵向破碎越多。受齿形自身结构影响,尖齿(图2d)和锥形齿(图2c)切削面远小于平面齿(图2a)和屋脊齿(图2b),相同切削行程内破碎体积较小。



注: C表示与岩石相关的常数

图1 不同PDC齿破岩能耗与相对耐磨性

Fig.1 Energy consumption and relative wear resistance of different PDC cutter for rock breaking

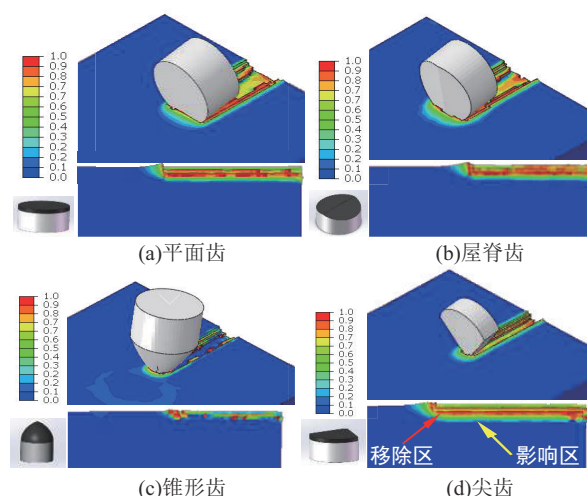


图2 基于ABAQUS分析的不同类型切削齿

破碎岩石时的损伤状态分布^[12]

Fig.2 Distribution of damage states when different types of PDC cutter break rocks

从图2中可以看到,锥形齿破碎岩石时接触区几乎全都呈现绿色,表明移除区岩石损伤程度低,发生脆性破碎并产生较多块状岩屑。移除区外缘即切削齿未触及区域构成的影响区较小,这说明纵向破碎远远小于其他3种齿形。锥形齿破岩方式是在钻压作用下(模拟时用切入深度来表示钻压)压入地层,“犁削”出沟槽,产生大量的“碎片化”岩屑,未触及区域对岩石影响极小;而尖齿、平面齿和屋脊齿破岩时,切削部位大多为红色区域且处于连续状态,移除区内岩石损伤程度高,达到充分破碎状态,存在着大量的塑性破碎或是塑性破碎与脆性破碎结合,破碎单位体积岩石需要相对较大的能量(破岩比功)。

1.2 脊形齿研究进展

2016年,斯伦贝谢公司设计独特的屋脊齿(axe-shape cutter)结构,基于屋脊齿研发的钻头有效提升钻进效率,得到了推广和应用。一些学者针对屋脊齿开展了岩石力学参数(密度、单轴抗压强度、弹性模量、泊松比)、切削工艺参数(切削速度、切削齿后倾角、切削深度)以及脊角对破岩效率(破岩比功、吃入性能、切削力)的影响规律研究,该齿更易吃入地层,且破碎同体积岩石所需切削力和破岩比功更小,破岩效率更高^[13];屋脊齿破岩效率与岩石密度无明显关系,但在高抗压强度、高弹性模量以及高泊松比地层中破岩效果显著降低。

Shao等^[1]在屋脊齿的基础上设计了一种结合齿形和切削结构布局——“窄齿间距”优点的三脊形PDC齿(见图3),进一步提高切削效率和耐用性。通过单齿破岩试验和数值模拟发现,三脊齿引起的应力集中显著大于屋脊齿,其在垂直方向上产生更大的点荷载,与岩石相互作用时,进入岩石的应力分布也更深更宽,产生更大、更明显的应力分布区,有利于裂纹扩展,从而提高破岩效率。相同切削条件下,三脊齿钻头相比屋脊齿钻头扭矩更小,耗能更低。磨损和冲击试验表明,三脊齿在耐磨性和抗冲击性方面均优于屋脊齿,可以延长钻头寿命^[2]。

王新锐等^[14]对屋脊齿和四脊齿破岩开展了有限元仿真和结构对比研究,认为多脊齿的切削力及破岩比功随脊角成反比,但脊角在 $132^{\circ}\sim 158^{\circ}$ 范围内吃入岩层较为稳定,在不同岩层中其最佳切削深度不同,当钻进花岗岩等较硬地层时,其最佳切削深度为2 mm,为实钻时钻压选择提供了理论依据。

非平面三棱齿工作面具有特有的脊形结构,相同条件下三棱齿切削破碎砂岩时的切向力及其波动幅度均小于常规平面齿^[15],三棱形切削齿和屋脊齿直线切削岩石时,产生的剪应力更大,更易压入地层形成破碎坑,且所需的切削力较小,岩石产生的预破碎区域更大,破碎非均质岩石时的切向力波动幅度小,更易破碎岩石^[16]。耐磨性比常规平面齿提高58%以上,抗疲劳冲击性能提高5%以上,同时磨削载荷平均降低40%,更加适用于钻进冲击大、研磨性强的混合硬岩地层(如花岗岩)。

1.3 锥形齿研究进展

2010年,加拿大学者研发出一种PDC锥形齿(stinger cutter),在花岗岩等硬岩地层具有良好的切

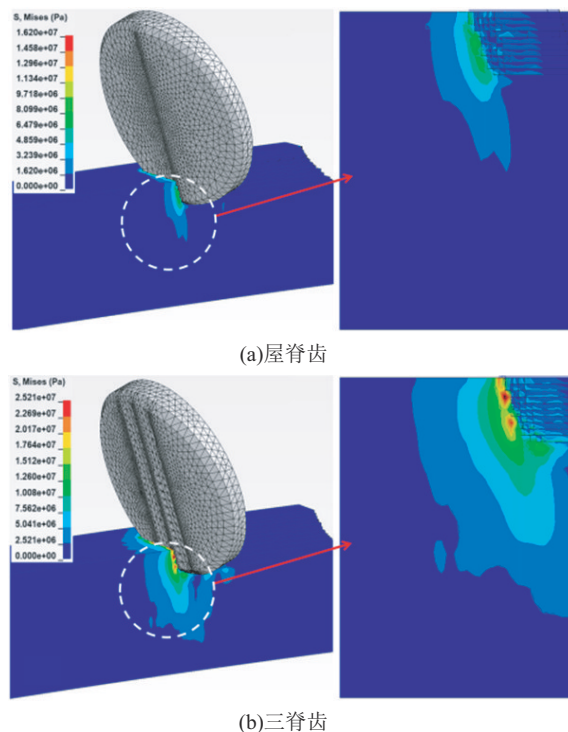


图3 基于ABAQUS分析的屋脊齿和三脊齿与岩石作用应力云图^[2]

Fig.3 Stress distribution of axe-shaped cutter and three-ridge cutter interacting with rocks

削能力,抗冲击性和耐磨性相比平面齿分别提高了100%和33%^[17]。国内学者围绕锥形齿的破岩机理、破岩效果,开展了大量基于不同布齿结构的锥形齿全面钻头研制及推广^[18]。锥形齿与平面齿剪切破岩不同(图4),轴向力和扭矩共同作用下连续旋转破岩,其特殊之处在于将岩石“犁”出沟槽,将岩石沿切向犁出条带状并剥离,侧向上挤压岩石并发生破坏作用,其破岩方式为“犁削”破岩^[18]。锥形齿在预破碎时,可以使岩石切痕间的“凸脊”产生损伤,形成破碎坑。由于岩石的抗拉强度一般小于抗剪强度,锥形齿破岩更容易,可提高破岩效率和钻头寿命^[19]。

锥形齿因在切削岩石过程中能够将载荷更好地集中于一点进行破岩,具有所需切削力更低(46.14%)、扭矩更小、钻进过程更平稳等优势。同时锥形齿较厚的金刚石面提高了钻头切削强度,在实际应用中其机械钻速都高于平面齿钻头,受到了许多学者的关注。Xiong等^[20]对比锥形齿与平面齿破碎花岗岩特性,分析微观破岩特征,揭示了锥形齿破岩模式。邹德永等^[21]开展了大量研究工作,主要包括3个方面:一是通过试验分析了切削齿后倾角、锥顶

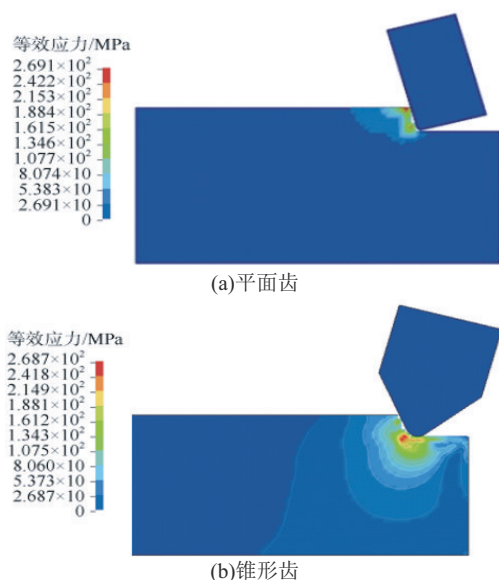
图4 PDC平面齿与锥形齿应力云图^[18]

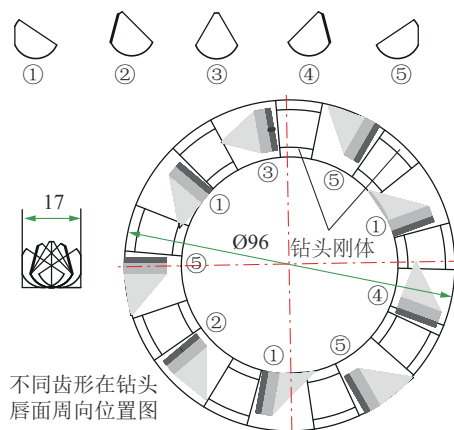
Fig.4 Stress distribution of PDC conventional cutter and string cutter while cutting rocks

角(锥顶宽度)及钻压等因素对锥形齿破岩效率的影响规律,基于后倾角和切削深度关系,优选出不同岩性下的最优后倾角($20^{\circ}\sim 25^{\circ}$),相同钻压下,锥形齿越尖,破岩效率越高^[22],在钻进花岗岩时最高机械钻速达 8.22 m/h ^[23];二是通过对单齿进行破岩试验、冲击试验和数值模拟,发现用锥形齿代替常规钻头后排平面齿可减小钻头扭矩,提高钻头稳定性^[24];三是基于锥形齿形状及后倾角的钻头磨损规律研究表明,正切削齿后倾角在 $12^{\circ}\sim 17^{\circ}$ 、锥顶角在 $68^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 时,锥形齿的耐磨性能最佳^[25]。锥形齿PDC钻头能极大地提高交互夹层、含燧石硬质研磨性地层、灰岩等地层钻进效率。与常规切削齿相比,锥形齿破岩的岩屑中大尺寸占比更高,单位体积破岩能耗更低,在实际油气勘探钻井中,针对较硬地层(硬灰岩层、含砾岩层等)作为辅助切削齿可有效提高机械钻速^[26]。

1.4 RDE齿研究进展

近年来,国内外学者综合了“点接触”式致裂破岩的牙轮钻头和以“剪切”式破岩的常规平面齿PDC钻头特点,提出了非常规切削齿,包括以V形齿为主的RDE(Ridge Diamond Element)齿等。基于高温高压塑性泥岩岩石力学实验,通过仿真实验和软件模拟,认为V形齿在切削泥岩时攻击性更强、破碎效率更高,在实际应用中,采用较小后倾角和较大齿组间距布设方式,在高温高压环境下切削

塑性泥岩可提速2.52倍^[27]。为了避免受力过于集中,对V形齿进行优化改进,在钻头内外侧设计“歪尖角”结构(见图5中①⑤),作为副切削齿进一步提高保径区域工作面积。结合V形齿和钻头切削结构合理布置“窄齿间距”的特点,对V形齿进一步优化改进,设计出尖端为圆角的W形齿(见图6)。



不同齿形在钻头唇面周向位置图

图5 优化后的V形齿布齿方式

Fig.5 Optimized V-shaped cutter arrangement method



图6 基于平面齿切割后的W形齿

Fig.6 W-shaped cutter based on planar cutter

由于W形齿结构的特殊性,不同切入深度破岩效果差异较大(见图7)。当切深为 0.5 mm 时,破岩后存在较大块的岩屑,因其尖端呈圆角,岩石破碎状态和锥形齿破岩相似。当切削深度为 1 mm 、 1.5 mm 时,切削岩石过程岩石损伤状态呈现塑性破碎,与V形齿破岩相似(见图2d)。实际钻井时,切入深度与钻压有关,低钻压时以脆性破碎为主,产生较大块的岩屑,逐渐增大钻压,W形齿破岩方式发生转变,由脆性破碎逐步转向塑性破碎。

2 典型异形齿布齿与应用

2.1 混合布齿

2.1.1 PDC不同齿形混合布齿

为了弥补单一齿形PDC钻头破岩效果的不足,

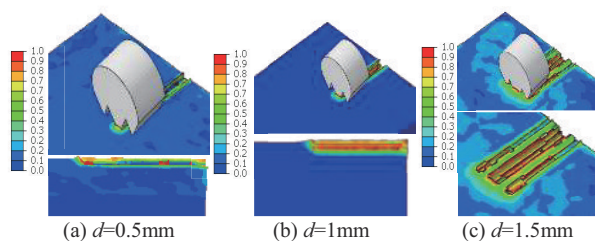


图7 基于ABAQUS分析的不同切削深度下W形切削齿破碎岩石损伤状态

Fig.7 Damage status of fractured rocks by W-shaped cutter at different cutting depths

尤其对于硬地层、研磨性地层或者软硬互层,一些学者基于混合布设切削齿的理论模型、软件模拟等开展PDC混合布齿研究,增强了破岩效果。近年来,锥形齿和平面齿混合布齿设计研发的钻头在国外一些油田的硬岩地层全面钻进中取得了良好的效果,混合布齿的钻头相比传统PDC钻头具有更好的稳定性,扭矩波动也较小^[28-32]。为了提高PDC钻头在软硬互层中的工作寿命,一般将切削结构设计为双排齿,即在每个刀翼上分别布置主切削齿和副切削齿。对于常规PDC齿,切削齿对岩石的影响区域主要集中于齿刃的水平前方,且最大应力出现在切削刃的前端。随着切削齿的前进,岩石内部的裂纹沿着切削方向近似水平延伸,并逐渐发展至岩石自由表面,剪应力作用是岩石破碎的主要因素。平面齿与锥形齿混合布设的复合钻头在花岗岩和砂岩全面钻进中,当钻压超过一定数值时,机械钻速呈指数增长。复合钻头较常规平面齿钻头和锥形齿钻头有较高的机械钻速,在硬岩中可获得较高的破岩效率^[33]。

张建阔等^[34]研制了一种锥形PDC齿与常规PDC齿同轨布齿的混合钻头,该钻头以PDC平面齿为主切削元件,锥形齿为副切削元件,开始工作时PDC齿以剪切破岩为主,当PDC齿吃入地层一定程度后,锥形齿开始犁削岩石形成裂纹(见图8)。该混合切削结构能以较小的切削力破碎岩石^[35],具有切削和犁削双重破岩特点,在非均质硬地层钻进具有良好的抗冲击性能和破岩效率。

刘伟吉等^[36]针对混合齿形PDC钻头布齿间距,进行了平面齿+异形齿混合布齿数值仿真研究,认为在切削花岗岩切深为1.0mm时,“平面齿+斧形齿”的最优布齿间距为6mm,“平面齿+锥形齿”为

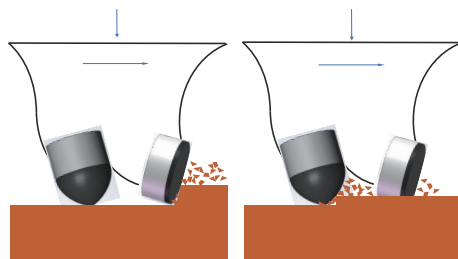


图8 主平面齿+副锥形齿切削-犁削混合破岩

Fig.8 Mixed rock breaking process of PDC conventional cutter + string cutter while cutting plowing

8mm,“平面齿+三棱齿”为9mm,破岩效率最高。

2.1.2 PDC齿+孕镶块混合布齿

为了能在强研磨性硬地层中高效持续钻进,一些学者通过混合齿、全齿力学分析,以及不同切削深度下线性切削过程模拟和仿真,认为PDC和孕镶块混合布齿高差和切削深度对钻进效率影响较大。刘笑傲等^[37]、于金平等^[38]针对硬岩地层PDC钻头磨损的形式、机理和分布规律进行了系统研究,开展PDC和孕镶块复合钻头的设计研究,认为PDC和孕镶块混合齿钻头具有PDC钻头破岩效率高和孕镶金刚石钻头工作寿命长的双重优点。王滨等^[39]在研究钻进火成岩PDC钻头的磨损形态、机理及规律时发现,PDC齿的失效形式主要为,发生在冠顶处切削齿的磨料磨损和发生在整个冠部的冲击损坏,并且钻头冠顶及外锥切削齿磨损最严重,认为孕镶块应布置在冠顶及外锥部位来提高钻头寿命,且后排采用孕镶块加强的混合钻头提速效果比较明显(见图9)。当PDC齿磨损超过一定高度时,PDC钻头钻速低于同钻压下孕镶钻头,相比PDC钻头,PDC和孕镶块混合布齿钻头可以提高破岩效率。在钻头设计中,为达到提高钻速和寿命的双重目的,孕镶块参与破岩的时机十分重要。PDC齿切入地层后,孕镶块与地层接触,有效限制了PDC齿切入深度,起到磨削地层和保护PDC齿的作用^[40]。前排PDC齿与后排孕镶块的最优出露高差为1~2mm(见图10),在钻进花岗岩地层时机械钻速、寿命相比常规PDC钻头分别提高1.5、2倍^[39]。

2.2 现场应用

Baker Hughes等国外公司基于异形齿研发的PDC钻头在复杂地层直井、水平井钻进中有效提升了机械钻速和钻头寿命,近5年,国内异形齿钻头研发与应用得到了快速发展,其中常规平面齿与异形

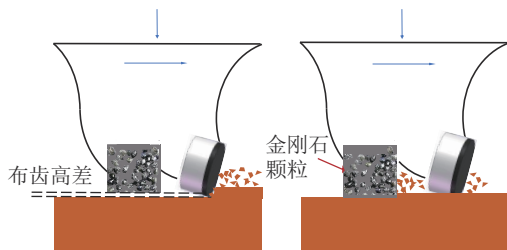


图9 PDC和孕镶块(副切削齿)混合布齿破岩
Fig.9 PDC and pregnant block (secondary cutting teeth) mixed tooth arrangement for rock breaking

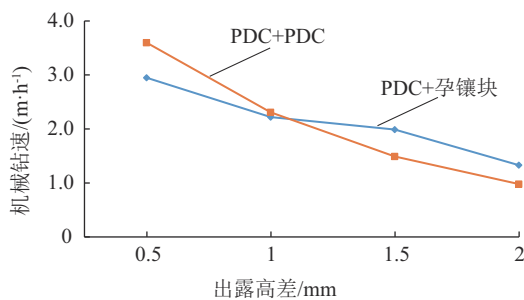


图10 出露高差与钻速关系
Fig.10 Relationship between exposure height difference and drilling speed

齿混合布齿设计的PDC钻头占90%以上。

陈新海^[41]针对巴彦河套新区深部白垩系地层以及太古界片麻岩地层等复杂地层,优化配置平面齿、斧形齿、多棱齿及锥形齿,开展混合布齿研究,提高钻头与地层的配伍性,可显著提高钻进效率。沈立娜等^[42]针对砂质泥岩和砂泥岩互层钻进效率低、钻头寿命短的难题,通过W形齿与平面齿交错布置,研制一种新型高效耐冲击复合片取心钻头,在新疆吉木萨尔油田芦草沟组多口钻井应用中机械钻速提高了2.4~3.1倍。冯云春^[43]针对龙凤山气田储层岩石石英含量高、研磨性强的特点,研发出6刀翼三棱平顶齿PDC钻头,提高了钻头寿命和机械钻速。荣准等^[44]针对五宝场硬塑性地层,对斧形曲面齿PDC钻头进行了试验研究,其破岩比功较常规齿降低11.39%。赵洪波等^[45-46]针对砂泥岩互层开展了系列异形齿PDC钻头的研制,其中HQ系列绳索取心钻头在广西、贵州、安徽页岩气调查井实钻中,相比金刚石钻头和平面齿PDC钻头机械钻速均得到了大幅提升,Φ216 mm三棱齿五刀翼全面钻头和Φ216 mm屋脊齿取心钻头在三门峡盆地油气调查中机械钻速提升15%以上。李基伟等^[47]研发的Φ212.7 mm斧形齿PDC钻头在东海盆地西湖凹陷

钻进细砂岩、泥岩等花港组强研磨地层时,机械钻速比邻井提高了27%。

3 结论与建议

切削齿形状对破岩性能有显著影响,PDC异形齿材料进步与结构优化是PDC钻头未来发展的主要方向。基于PDC异形齿选型、切削齿布置设计等开展个性化PDC钻头研发,应用于科学超深井、深部油气井等有助于解决复杂地质条件下钻效低、寿命短的难题。

(1)开展PDC异形齿全尺寸钻头破岩数值模拟与室内台架试验,探讨热-压-液-固耦合作用下破岩规律,优化PDC齿三维结构设计,指导现场钻井参数选择,为PDC异形齿应用于超万米科学钻探和深部复杂地层油气钻井提速提供理论依据。

(2)在人工智能大数据框架下,优化钻压、扭矩与钻头(切削齿)受力相互关系,进一步探讨PDC异形齿-岩石相互作用模型、钻速方程、磨损机理。

(3)进一步探索PDC钻头破岩效率评价新方法。综合研究PDC钻头寿命和破岩效率,优化PDC异形齿单齿攻击性能和破岩效率,提出评价异形齿PDC钻头破岩效率新方法。

参考文献(References):

- [1] Shao F Y, Liu W, Gao D L, et al. Development and verification of triple-ridge-shaped cutter for PDC bits[J]. SPE Journal, 2022, 27(6): 3849-3863.
- [2] 马亚超, 罗逸非, 荣准, 等. 沙溪庙组硬质砂岩地层异形PDC齿的设计与研究[J]. 工程设计学报, 2025, 32(2): 262-271.
MA Yachao, LUO Yifei, RONG Zhun, et al. Design and study of special-shaped PDC cutter for hard sandstone strata of Shaximiao formation [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2025, 32(2): 262-271.
- [3] Zhu X H, Luo Y X, Liu W J, et al. Rock cutting mechanism of special-shaped PDC cutter in heterogeneous granite formation [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 210: 110020.
- [4] 刘维, 高德利. PDC钻头研究现状与发展趋势[J]. 前瞻科技, 2023, 2(2): 168-178.
LIU Wei, GAO Deli. Research status and development trends of polycrystalline diamond compact Bits [J]. Science and Technology Foresight, 2023, 2(2): 168-178.
- [5] 高德利. 非常规油气井工程技术若干研究进展[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 153-162.
GAO Deli. Some research advances in well engineering technology for unconventional hydrocarbon [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 153-162.
- [6] Liu W J, Deng H X, Zhu X H. Investigation on the

- rock-breaking performance of specially-shaped PDC cutter under confining pressure conditions[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2024, 237: 212824.
- [7] 刘伟吉, 王燕飞, 郭天阳, 等. 单齿切削破碎非均质花岗岩微观机理研究[J]. *工程力学*, 2022, 39(6): 122-133.
LIU Weiji, WANG Yanfei, GUO Tianyang, et al. Investigation on the rock cutting mechanism of heterogeneous granite using a grain-based modeling approach[J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(6): 122-133.
- [8] 刘伟吉, 阳飞龙, 董洪铎, 等. 异形PDC齿混合切削破碎花岗岩特性研究[J]. *工程力学*, 2023, 40(3): 245-256.
LIU Weiji, YANG Feilong, DONG Hongduo, et al. Investigate on the mixed-cutting of specially-shaped PDC cutters in granite[J]. *Engineering Mechanics*, 2023, 40(3): 245-256.
- [9] 史怀忠, 傅新康, 陈振良, 等. 高温高压条件下PDC钻头破碎花岗岩试验研究[J]. *石油机械*, 2021, 49(12): 1-9.
SHI Huaizhong, FU Xinkang, CHEN Zhenliang, et al. Experimental study on granite broken by PDC bit under high temperature and high pressure[J]. *China Petroleum Machinery*, 2021, 49(12): 1-9.
- [10] 李其州, 张凯. 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, 15.
LI Qizhou, ZHANG Kai. Influence of cutting depth on rock breaking mechanism of PDC cutter at ultra-high speed[J]. *China Petroleum Machinery*, 2022, 50(6): 1-8, 15.
- [11] Fu X K, Huang Z W, Shi H Z, et al. Comparison of fracture characteristics of different PDC cutters penetrating carbonate rock[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 223: 211536.
- [12] 赵洪波. 页岩气调查优快取心钻进破岩机理与新型钻头研制[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2023.
ZHAO Hongbo. Research on rock-breaking mechanism of high-efficiency coring drilling and new Bits development for shale gas survey[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2023.
- [13] 赵润琦, 陈振良, 史怀忠, 等. 斧形PDC齿破碎致密硬砂岩特性数值模拟研究[J]. *石油机械*, 2021, 49(10): 8-16.
ZHAO Runqi, CHEN Zhenliang, SHI Huaizhong, et al. Numerical simulation study on characteristics of tight hard sand broken by axe-shaped PDC cutter[J]. *China Petroleum Machinery*, 2021, 49(10): 8-16.
- [14] 王新锐, 张辉, 张矿生, 等. 多脊PDC切削齿破岩有限元仿真及其几何结构影响[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(4): 63-71.
WANG Xinrui, ZHANG Hui, ZHANG Kuangsheng, et al. Rock breaking simulation and optimization design of multi-ridged PDC cutters[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2022, 46(4): 63-71.
- [15] 刘建华, 令文学, 王恒. 非平面三棱形PDC齿破岩机理研究与现场试验[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(5): 46-50.
LIU Jianhua, LING Wenxue, WANG Heng. Study on rock breaking mechanism and field test of triangular prismatic PDC cutters[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(5): 46-50.
- [16] 谢哈, 况雨春, 秦超. 非平面PDC切削齿破岩有限元仿真及试验[J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(5): 69-73.
XIE Han, KUANG Yuchun, QIN Chao. The finite element simulation and test of rock breaking by non-planar PDC cutting cutter[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(5): 69-73.
- [17] Durrand C J, Skeem M R, Hall D R. Thick PDC, shaped cutters for geothermal drilling: a fixed cutter solution for a roller cone drilling environment [C]//44th U. S. Rock Mechanics Symposium and 5th U. S.-Canada Rock Mechanics Symposium. Salt Lake City, Utah: ARMA, 2010: ARMA-10-524.
- [18] 陈昱汐. 基于犁切破岩的锥形金刚石切削齿钻头及其应用[J]. *钻采工艺*, 2016, 39(4): 105-107.
CHEN Yuxi. Technology and application of new type conical diamond element bit[J]. *Drilling & Production Technology*, 2016, 39(4): 105-107.
- [19] 何仁清. 锥形PDC齿破岩过程的数值模拟研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.
HE Renqing. Numerical simulation study on stinger PDC cutter's cutting rock process[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2014.
- [20] Xiong C, Huang Z W, Yang R Y, et al. Comparative analysis cutting characteristics of stinger PDC cutter and conventional PDC cutter[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 189: 106792.
- [21] 邹德永, 郭玉龙, 赵建, 等. 锥形PDC单齿破岩试验研究[J]. *石油钻探技术*, 2015, 43(1): 122-125.
ZOU Deyong, GUO Yulong, ZHAO Jian, et al. Experimental study on rock breaking of conical PDC cutter[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(1): 122-125.
- [22] 杨顺辉. 锥形PDC齿钻头的研制及室内试验评价[J]. *石油机械*, 2015, 43(2): 14-17.
YANG Shunhui. Development and laboratory tests evaluation of PDC bit with conical cutter[J]. *China Petroleum Machinery*, 2015, 43(2): 14-17.
- [23] 邹德永, 孙源秀, 于鹏, 等. 锥形齿PDC钻头台架试验研究[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(2): 48-52.
ZOU Deyong, SUN Yuanxiu, YU Peng, et al. Experiment study on bench test of stinger PDC bit[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2015, 39(2): 48-52.
- [24] 孙源秀, 邹德永, 郭玉龙, 等. 切削-犁切混合钻头设计及现场应用[J]. *石油钻采工艺*, 2016, 38(1): 53-56.
SUN Yuanxiu, ZOU Deyong, GUO Yulong, et al. Design and field application of plow-cutting PDC bit[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2016, 38(1): 53-56.
- [25] 王滨, 邹德永, 林森, 等. 锥形PDC齿耐磨性能试验研究[J]. *石油机械*, 2015, 43(7): 23-26.
WANG Bin, ZOU Deyong, LIN Sen, et al. Wear resistance test of conical PDC cutter[J]. *China Petroleum Machinery*, 2015, 43(7): 23-26.
- [26] 徐卫强, 史怀忠, 曹权, 等. 锥形PDC齿破碎砾岩特性试验研究[J]. *石油机械*, 2021, 49(9): 9-16.
XU Weiqiang, SHI Huaizhong, CAO Quan, et al. Experimental study on conglomerate breaking characteristics of conical PDC cutter[J]. *China Petroleum Machinery*, 2021, 49(9): 9-16.
- [27] 罗鸣, 朱海燕, 刘清友, 等. 一种适用于超高温超高压塑性泥岩的V形齿PDC钻头[J]. *天然气工业*, 2021, 41(4): 97-106.
LUO Ming, ZHU Haiyan, LIU Qingyou, et al. A V-cutter PDC bit suitable for ultra-HTHP plastic mudstones[J]. *Natu-*

- ral Gas Industry, 2021, 41(4): 97-106.
- [28] Farouk H, Elwekeel W, Shokry A E, et al. Innovative PDC bit design increases drilling efficiency in Egypt's notoriously difficult western desert deep lithology column [C]//SPE North Africa Technical Conference and Exhibition. Cairo, Egypt: SPE, 2015: SPE-175756-MS.
- [29] German V, Pak M, Azar M, et al. Conical diamond element bit sets new performance benchmarks drilling extremely hard carbonate/chert formations, perm region Russia [C]//SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. London, England, UK: SPE, 2015: SPE-173144-MS.
- [30] Gunawan F, Krisnanto W, Mardiana M R, et al. Conical diamond element PDC bit as a breakthrough to drill hard geothermal formation in Indonesia [C]//IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition. Bangkok, Thailand: SPE, 2018: SPE-191100-MS.
- [31] Luna O, Salinas G, Lozano C, et al. Conical diamond element bit on high-torque RSS mitigates vibration maximizing ROP in hard carbonates saving 90 hours of rig time, offshore Mexico [C]//SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference. Quito, Ecuador: SPE, 2015: SPE-177029-MS.
- [32] Radhakrishnan V, Chuttani A, Anggrani F, et al. Conical diamond element technology delivers step change in directional drilling performance [C]//IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference. Singapore: SPE, 2016: SPE-180515-MS.
- [33] 刘忠, 胡伟, 缪明才, 等. PDC钻头混合布齿切削试验装置[J]. 石油机械, 2019, 47(5): 44-49.
- LIU Zhong, HU Wei, MIAO Mingcai, et al. Cutting test device for PDC bit with mixed cutter arrangement [J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(5): 44-49.
- [34] 张建阔, 刘天科, 路峰. 硬地层同轨道锥形齿PDC钻头研究与应用[J]. 中外能源, 2017, 22(2): 52-56.
- ZHANG Jiankuo, LIU Tianke, LU Feng. Research and application of stinger PDC bit at same orbit for hard formations [J]. Sino-global Energy, 2017, 22(2): 52-56.
- [35] 汪为涛. 非均质地层锥形辅助切削齿PDC钻头设计与试验[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(2): 58-62.
- WANG Weitao. Design and test of a new PDC bit with tapered auxiliary cutter for heterogeneous formations [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(2): 58-62.
- [36] 刘伟吉, 阳飞龙, 祝效华, 等. 异形PDC齿切削破岩提速机理研究[J]. 中国机械工程, 2022, 33(17): 2133-2141.
- LIU Weiji, YANG Feilong, ZHU Xiaohua, et al. Research on mechanism of rock breaking and speed increase in cutting with abnormal PDC cutter [J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(17): 2133-2141.
- [37] 刘笑傲, 邹德永, 陈修平. 强研磨性硬地层聚晶金刚石复合片孕镶块混合钻头优化设计试验[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(29): 220-226.
- LIU Xiaobao, ZOU Deyong, CHEN Xiuping. Study on optimization design experiment of rock-breaking mechanism of PDC-diamond Impregnated Matrix bit for drilling hard and strong abrasive formation [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(29): 220-226.
- [38] 于金平, 邹德永, 刘笑傲. 适合强研磨性硬地层的新型混合钻头设计及现场应用[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(3): 67-71.
- YU Jinping, ZOU Deyong, LIU Xiaobao. Design and application of novel hybrid drill bit for hard formation with strong abrasivity [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2020, 40(3): 67-71.
- [39] 王滨, 李军, 邹德永, 等. 适合强研磨性硬地层PDC-金刚石孕镶块混合钻头设计与应用[J]. 特种油气藏, 2018, 25(1): 169-174.
- WANG Bin, LI Jun, ZOU Deyong, et al. Design and application of a PDC hybrid drill bit with impregnated diamond insert for the hard formation with strong abrasivity [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(1): 169-174.
- [40] 吴海霞, 沈立娜, 李春, 等. 多级金刚石单晶孕镶柱耐磨试验研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(2): 111-116.
- WU Haixia, SHEN Lina, LI Chun, et al. Experimental study on wear resistance of multi-level diamond single crystal impregnated columns [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(2): 111-116.
- [41] 陈新海. 巴彦河套新区异形齿PDC钻头研究与应用[J]. 钻探工程, 2022, 49(5): 127-135.
- CHEN Xinhai. Research and application of special-shaped tooth PDC bits in Bayanhetao new area [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(5): 127-135.
- [42] 沈立娜, 吴海霞, 蔡家品, 等. 高效耐冲击复合片取心钻头的研制与应用[J]. 钻探工程, 2021, 48(S1): 366-369.
- SHEN Lina, WU Haixia, CAI Jiapin, et al. Development and application of high-efficiency and impact-resistance PDC core bits [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(S1): 366-369.
- [43] 冯云春. 龙凤山气田火山岩地层个性化PDC钻头设计与应用[J]. 钻探工程, 2024, 51(2): 94-101.
- FENG Yunchun. Design and application of personalized PDC bit for volcanic rock formation in Longfengshan Gas Field [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(2): 94-101.
- [44] 荣准, 杨学军, 张航, 等. 五宝场硬塑性地层斧形曲面PDC齿破岩性能研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(2): 85-93.
- RONG Zhun, YANG Xuejun, ZHANG Hang, et al. Study on the rock breaking performance of axe-shape cambered PDC cutters in the hard plastic formation in Wubaochang [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(2): 85-93.
- [45] Zhao H B, Wu H X, Shen L N, et al. Research on slim-hole drilling technology for shale gas geological survey in China [J]. Petroleum Research, 2024, 9(3): 451-461.
- [46] 赵洪波, 张龙, 沈立娜, 等. 三门峡盆地油气调查优快钻井技术[J]. 钻探工程, 2024, 51(6): 111-118.
- ZHAO Hongbo, ZHANG Long, SHEN Lina, et al. Efficient drilling technology for oil and gas survey in Sanmenxia Basin [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6): 111-118.
- [47] 李基伟, 李乾, 田胜雷, 等. 东海深部高研磨地层冲击钻井PDC齿优选研究[J]. 石油机械, 2024, 52(8): 77-84.
- LI Jiwei, LI Qian, TIAN Shenglei, et al. Optimization of PDC cutter for percussive drilling in deep highly-abrasive strata in the East China sea basin [J]. China Petroleum Machinery, 2024, 52(8): 77-84.