超星·期刊

第51卷第2期 钻探工程 Vol. 51 No. 2
2024年3月 Drilling Engineering Mar. 2024:85-93

五宝场硬塑性地层斧形曲面PDC齿破岩性能研究

荣 准[1]，杨学军*[2]，张 航[1]，颜 爽[1]，张 琦[1]，张龙龙[3]
（1.中国石油西南油气田分公司川东北气矿，四川 达州 635000；2.西南石油大学机电工程学院，四川 成都 610500；
3.中国石油集团西部钻探工程有限公司吐哈钻井公司，新疆 吐鲁番 834000）

摘要：为解决川东油气钻井中五宝场沙溪庙组硬塑性地层PDC钻头磨损严重、起下钻频繁的问题，开展了斧形曲面PDC齿在硬塑性地层破岩性能的研究。首先采用X射线衍射试验与三轴力学试验分别获取该地层岩石性质和力学参数，然后采用有限元仿真与试验相结合的方法开展斧形曲面PDC齿破岩性能研究。研究结果表明：斧形曲面PDC齿主要以剪切、挤压、犁切共同作用破岩；相较于常规PDC齿，斧形曲面PDC齿有更强的吃入岩石的能力和稳定性，能有效减小钻头异常振动，提高钻头寿命，并在不同磨损高度（0～3 mm）时，破岩比功降低2.2%～8.2%；根据试验得到斧形曲面齿较常规齿破岩性能提高了11.39%，且试验与仿真平均切削力误差仅为7.46%，验证了仿真模型的正确性。本研究表明斧形曲面PDC齿在硬塑性地层对提高破岩性能具有重要意义。

关键词：斧形曲面PDC齿；硬塑性地层；破岩比功；磨损高度；破岩性能
中图分类号：TE921^{+}.1；P634.4^{+}1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：2096-9686(2024)02-0085-09

Study on the rock breaking performance of axe-shape cambered PDC cutters in the hard plastic formation in Wubaochang

RONG Zhun[1], YANG Xuejun*[2], ZHANG Hang[1], YAN Shuang[1], ZHANG Qi[1], ZHANG Longlong[3]
(1. *Northwest Sichuan Gas Mine, Petro China Southwest Oil & Gasfield Company, Dazhou Sichuan* 635000, *China*;
2. *School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan* 610500, *China*;
3. *Tuha Drilling Company, CNPC Xibu Drilling Engineering Company Limited, Turpan Xinjiang* 834000, *China*)

Abstract: In order to solve the problem of severe wearness and frequente tripping work in the hard plastic strata of Shaximiao Formation in Wubaochang, the research on the rock breaking performance of an axe-shape cambered PDC cutters is made. Firstly, the X-ray diffraction test and triaxial mechanical test are used to obtain the rock properties and mechanical parameters of the formation, then the finite element simulation and test are combined to study the rock breaking performance of the axe-shape cambered PDC cutters. The results show that the axe-shape cambered PDC cutters mainly break rock by the combined action of shearing, extrusion and plowing. Compared with the conventional PDC cutters, the axe-shape cambered PDC cutters have stronger rock-breaking ability and stability, which can effectively reduce the abnormal vibration of the bit, improve the bit life, and the rock breaking mechanical specific work can be reduced by 2.2%～8.2% at different wear height (0～3 mm). According to the test results, the rock breaking

收稿日期：2023-08-23；**修回日期**：2023-11-12　　**DOI**：10.12143/j.ztgc.2024.02.012
基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目“热力复合作用下PDC钻头动态磨损机理与引磨力平衡布齿理论研究”（编号：51904263）；企事业单位委托科技项目“川东北气矿2023年五宝场区块须家河组大斜度井全寿命异形齿高效破岩特性分析与结构设计”（编号：XNSJS2023-48）
第一作者：荣准，男，汉族，1989年生，工程师，石油与天然气工程专业，硕士，主要从事钻井及试修技术研究工作，四川省达州市通川区凤凰大道436号，rongzhun@petrochina.com.cn。
通信作者：杨学军，男，汉族，1998年生，硕士研究生，机械工程专业，从事PDC异形齿结构设计及优化研究工作，四川省成都市新都区，YangXJ2809@163.com。
引用格式：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.

超星·期刊

performance of the axe-shape cambered PDC cutters is higher than that of the conventional cutters by 11.39%, and the average cutting force error between test and simulation is only 7.46%, which verifies the correctness of the simulation model. This study shows that the axe-shape cambered PDC cutters are of great significance in improving the rock breaking performance in hard plastic formation.

Key words: axe-shape cambered PDC cutters; hard plastic formation; rock breaking mechanical specific work; wear height; rock breaking performance

0 引言

川东地区蕴含有丰富的石油天然气,成为四川盆地油气开采的主要阵地,该地层岩石具有致密强、强度高、硬度大、研磨性强等特性。聚晶金刚石复合片(PDC)钻头因具有可靠性高和长钻时的优势,成为油气钻井领域的主要破岩工具[1]。目前,在世界范围内钻头破岩总进尺中,PDC钻头的进尺占90%以上[2]。但常规PDC钻头在钻进川东一些地层时出现破岩困难、磨损严重、导致起下钻频繁的现象。

以五宝场沙溪庙组某气井为例,该井钻遇地层岩石在无围压时表现为明显的脆性特征,但随着钻进深度增大,围压逐渐增大,岩石逐渐由脆性向塑性转变,属于硬塑性岩石。据钻井现场统计,常规PDC钻头钻深>1500 m后,平均钻速仅1.97 m/h,钻进1618 m过程中,共耗费高性能钻头13只,钻头破岩效率低,大大提高了钻井成本。其原因是常规PDC钻头由于齿刃较钝,破岩性差,对硬度较大的地层破岩困难,伴随钻压和转速的供给,导致PDC齿磨损加剧,从而出现起下钻频繁的现象。

随着异形PDC齿的发展,由于不同结构的异形PDC齿适用于不同地层工况的优点,逐渐应用到油气钻井领域。因此,异形齿PDC钻头成为当前应对复杂地层的主要破岩工具。

国内外学者在异形PDC齿结构设计与破岩性能方面开展了大量研究。Xiong等[3]和杨顺辉[4]对锥形PDC齿开展研究,得到锥形PDC齿采用“犁削”破岩方式,比常规PDC复合片“切削”破岩方式更具攻击性,适用于花岗岩和砾岩等较硬的地层;2016年,史密斯(Smith)公司研发了Axe屋脊型齿(斧形齿),斧形齿因其优异的破岩性能逐渐受到学者的深入研究,该齿形主要通过剪切和挤压共同作用破岩[5-6],适用于高硬和高研磨性地层[7],且不易发生冲击损坏,该齿形的应用使钻进效率得到显著提高;2019年,贝克休斯公司通过领先的3D元素设计了PDC双曲面型齿,国内的刘和兴等[8]对曲面异形齿开展了研究,该齿形主要以犁切方式破岩并适用于软质、塑性以及过渡地层;刘建华等[9]、彭齐等[10]和Liu等[11]等对非平面PDC齿开展深入研究,得到齿以拉剪、线压裂和面挤压作用破岩,并逐渐应用于研磨性高、冲击性强地层;王光明等[12]在PDC钻头异形切削齿研究进展中表示,MacheteTM楔(V)形切削齿通过点载荷轴向预破碎岩石,适合于坚硬、脆性地层;Shao等[13]、Zhang等[14]和Gao等[15]设计了新型的多脊形PDC齿,通过多脊挤压,犁切产生大的点载荷导致岩石内部产生更多的裂纹和相当大的体积裂缝,适用于高研磨性,砾细砂岩、泥岩、灰色泥岩地层;汤凤林等[16]对凹状曲面切削具开展了研究,该切削具能减小了钻头的横向振动;同时,汤凤林等[17]采用楔形复合片和圆锥弧形复合片组合,设计出新型结构减振复合片钻头,其中楔形齿受力集中,容易“吃”入岩石,圆锥弧形切削齿,以剪切方式破岩,减弱了切削阻力,提高了钻井效率;陈新海[18]对巴彦河套新区采用的常规齿、斧形齿、多棱齿以及锥形齿破岩机理开展研究,其中常规齿主要为剪切破岩,斧形齿以犁切和剪切共同作用,多棱齿将剪切与压碎破岩作用综合在一起破岩,锥形齿载荷集中于一点对坚硬岩石具有预破碎作用。除此之外,也有部分学者对破岩新方法开展相关研究,例如赵研等[19]开展了超声波辅助PDC切削齿振动破岩仿真分析,探究了不同频率对破岩比功和切削力的影响,并得到最优频率位于25~30 kHz时,破岩比功最小,钻井效率最高;梁丽等[20]开展了高压电脉冲破岩试验装置的研制,该装置能在放电电压为120 kV、放电频率为1 Hz的条件下进行了红砂岩等岩石的钻进试验,满足破岩试验基本要求。

综上所述,国内外学者对异形PDC齿开展了大量研究,但尚无针对同时具有硬和塑性特征地层的异形PDC齿及其破岩性能开展相关研究,而这恰是

超星·期刊

提高硬塑性地层破岩效率的关键。

因此,亟需开展针对五宝场沙溪庙组硬塑性地层的异形PDC齿相关研究,以提高钻头在该地层的破岩效率,助力四川盆地油气开发降本增效。

1　硬塑性地层矿物组分及岩石力学特征研究

1.1　硬塑性地层矿物组分及含量分析

为探究五宝场沙溪庙组地层岩石性质,对564～2147 m井段的岩屑采用X射线衍射试验的方法开展矿物组分分析,获得其矿物组成成分及其含量占比如图1所示。

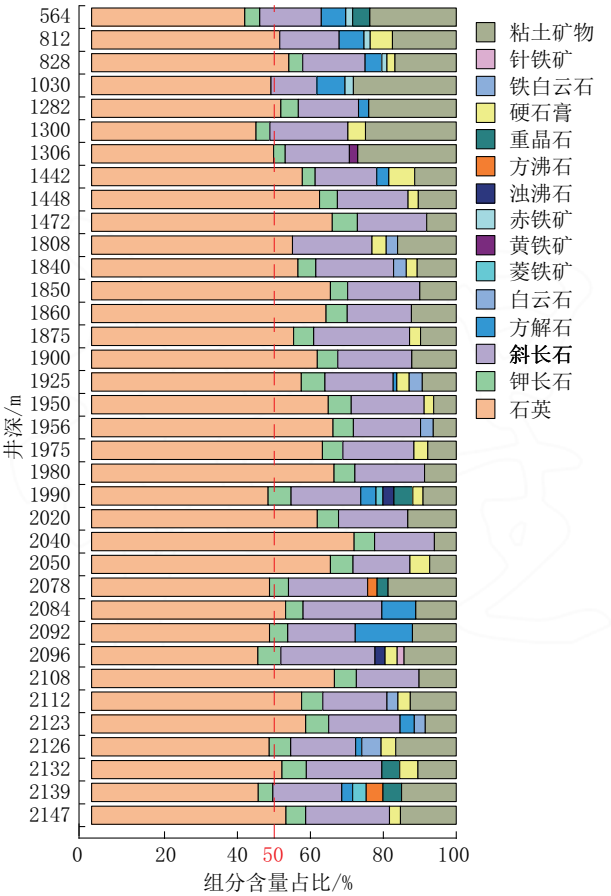


图1　岩石矿物组分及含量占比

Fig.1　Composition and content of rock minerals

根据图1可知,该井段岩屑主要由石英、斜长石以及粘土矿物等组成,其中:

(1)石英含量普遍在50%以上,最高石英含量达70%,平均含量为56.5%,地层研磨性强。

(2)斜长石平均含量为19.1%,最大含量为26.3%;其摩氏硬度为6～6.5,硬度仅次于石英(硬度7),岩石硬度较高,钻头较难吃入地层。

(3)粘土平均含量为13.4%,最大含量为28.2%;粘土矿物含量较高,地层具有一定塑性。

通过上述岩屑矿物组分及含量分析,五宝场沙溪庙地层岩石具有研磨性高,硬度大,可钻性差等特点。

1.2　硬塑性地层岩石力学特征研究

为探究五宝场沙溪庙组地层岩石力学特性,对直径为50 mm,长度为100 mm的目标岩样分别开展围压为0、15、20 MPa下的三轴力学试验,获取岩石的杨氏模量、抗压强度、泊松比、粘聚力以及内摩擦角等参数。

通过岩石三轴力学试验,获得沙溪庙地层岩石在0、15、20 MPa围压下的应力-应变曲线如图2所示,计算得其岩石力学参数如表1所示。

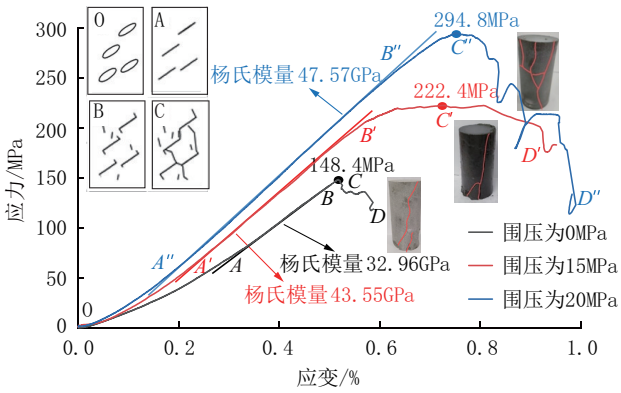


图2　三轴力学试验应力-应变曲线

Fig.2　Stress-strain curve of triaxial mechanical test

表1　沙溪庙地层岩石力学参数

Table 1　Rock mechanical parameters of Shaximiao Formation

围压/MPa	抗压强度/MPa	杨氏模量/GPa	泊松比	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)
0	148.4	32.96	0.1		
15	222.4	43.55	0.208	27.43	49
20	294.8	47.57	0.229		

根据应力-应变曲线,岩样破坏分为以下4个阶段:

(1)压密阶段$OA/OA'/OA''$:该阶段曲线斜率小幅增大,岩样被压密,岩样内微裂隙逐渐减小,且围压越大,压密阶段越短。

(2)弹性阶段$AB/A'B'/A''B''$:应力-应变曲线

超星·期刊

斜率趋于稳定，且曲线斜率比压密阶段大；

随着围压的增大（由0增至20 MPa），杨氏模量线性增大（32.96增至47.57 GPa），岩石越难破坏。

（3）屈服阶段$BC/B'C'/B''C''$：该阶段曲线斜率逐渐降低至0，岩石发生不可恢复的塑性变形，且应力值分别达到最大148.4、222.4、294.8 MPa；

随着围压的增大，岩石塑性变形阶段变长，呈塑性增强趋势。

（4）破坏阶段CD、$C'D'/C''D''$：该阶段裂纹大量扩展，岩石发生破坏，主要为缓慢破坏和瞬时破坏阶段：缓慢破坏阶段，随着应变增加，岩样内部微裂纹稳步扩展，应力缓慢减小；瞬时破坏阶段，随着应变增加，岩样内部微裂纹迅速贯穿连通，形成大裂纹，应力急剧下降，发生瞬时破坏与断裂。

0 MPa围压下，岩样出现瞬时破坏现象（CD段陡降），表明岩样具有明显的脆性特征；15 MPa围压下，岩样出现缓慢破坏现象（$C'D'$段缓降），表明该岩样在15 MPa下具有明显的塑性特征；20 MPa围压下，岩样出现缓慢破坏和加卸载现象（$C''D''$段曲线波动），表明该岩样在20 MPa塑性特征更为明显。

根据硬塑性地层岩石力学特征研究可知，该地层岩石整体变形呈塑-弹-塑特征，并随围压增大，岩石由脆性向塑性转变，且呈塑性增强趋势。

综上，根据地层矿物组分和岩石力学特征分析，得到该地层岩石硬度大，研磨性高，但其塑性会随着围压的增加而增大，因此称其为硬塑性岩石。

2 硬塑性地层破岩性能评价方法建立

钻井过程中，PDC钻头破岩是其PDC齿压入岩石并切削岩石的过程。传统的PDC齿破岩性能评价方法一般只考虑切削齿的切削能力，未考虑切削齿的压入性能。针对五宝场沙溪庙组硬塑性岩石，钻头破岩时难以吃入地层的实际情况，提出了一种综合破岩比功的评价方法，以评判切削齿破碎岩石的能力。

综合破岩比功从能量的角度反映岩石的破碎效率，其定义为破碎单位体积岩石所需的能量，包括切削破岩比功和压入破岩比功两种形式。

切削破岩比功：切削齿切削岩石一定行程，破碎单位体积岩石耗费的能量，其表达式为：

$$MSE_1=\frac{W}{V}=\frac{Fd}{Ad}=\frac{F}{A} \tag{1}$$

压入破岩比功：切削齿压入岩石一定行程，破碎单位体积岩石耗费的能量，其表达式为：

$$MSE_2=\frac{W}{V}=\frac{\int_0^S F(t)\mathrm{d}t}{V} \tag{2}$$

综合破岩比功表达式为：

$$MSE=MSE_1+MSE_2 \tag{3}$$

式中：MSE——综合破岩比功，MPa；MSE_1——切削破岩比功，MPa；MSE_2——压入破岩比功，MPa；W——破碎岩石所消耗的功，N•mm；V——被破碎的岩石体积，mm^3；F——平均切削力，N；$F(t)$——瞬时轴向力，N；A——切削面的投影面积，mm^2；d——切削行程，mm；s——压入行程，mm；

在后续切削齿破岩仿真和试验分析中均通过综合破岩比功进行评估，为针对硬塑性地层高性能PDC钻头的设计提供理论基础。

3 斧形曲面PDC齿破岩模型建立

在钻井过程中，斧形PDC齿主要通过剪切和挤压共同作用破岩，适用于高硬和高研磨性地层，且不易发生冲击损坏，使钻进效率得到显著提高；而曲面PDC齿主要以犁切方式破岩，适用于软质、塑性以及过渡地层。

针对五宝场沙溪庙硬塑性地层，综合考虑斧形PDC齿和曲面PDC齿的破岩方式及适用地层，提出一种新型齿形结构——斧形曲面PDC齿。

3.1 斧形曲面PDC齿模型建立

斧形曲面PDC齿结构如图3所示，该齿能同时实现剪切、挤压、犁切3种破岩方式，有望提高在硬塑性地层的破岩效率。

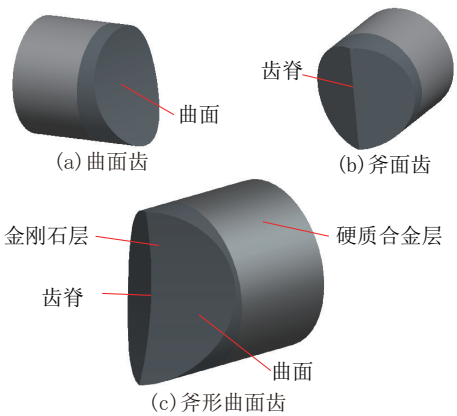


图3 斧形曲面PDC齿模型

Fig.3 The axe-shape cambered PDC cutters model

超星·期刊

斧形曲面PDC齿直径为16 mm,高度为16 mm,齿刃角为130°,曲面半径为35 mm(见图4)。

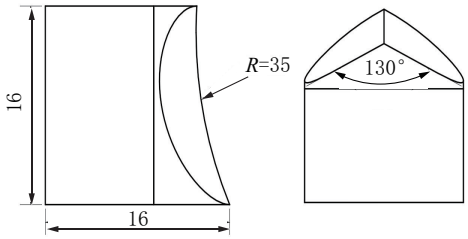


图4　斧形曲面PDC齿结构尺寸参数

Fig.4　Structure dimension parameters of axe-shape cambered PDC cutters

3.2　破岩仿真模型建立

为探究斧形曲面PDC齿破岩性能,开展切削齿切削仿真和压入仿真。切削仿真模型即为斧形曲面PDC齿切削岩石模型,其切削示意图和有限元模型如图5所示;在有限元模型中切削速度设为1 m/s,切削深度为2 mm,后倾角为20°。

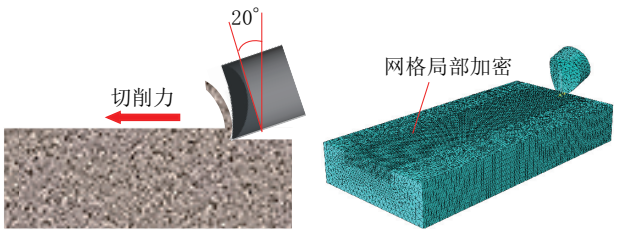


图5　切削模型

Fig.5　Cutting model

压入仿真模型即为斧形曲面PDC齿压入岩石模型,其压入示意图和有限元模型如图6所示;在有限元模型中压入速度设为10 mm/s,压入深度设为2 mm,后倾角为20°。

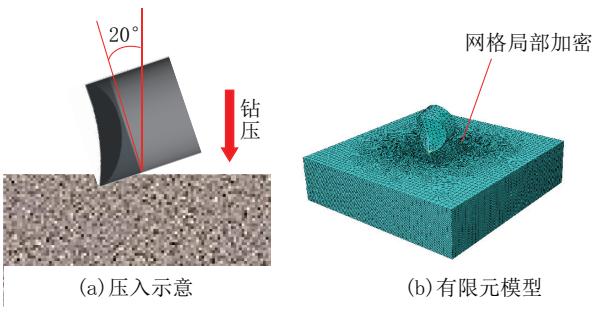


图6　压入模型

Fig.6　Squeeze model

仿真模型在齿与岩石接触部分进行网格加密处理,通过网格无关性验证最终得到切削模型和压入模型网格类型及数量如表2所示。

表2　网格类型及数量

Table 2　Mesh type and number

模型	切削模型		压入模型	
	网格类型	网格数量/个	网格类型	网格数量/个
岩石模型	四面体(C3D4T)	738943	六面体(C3D8R)	375003
斧形曲面PDC齿模型	四面体(C3D4T)	4391	四面体(C3D4T)	4391

根据五宝场现场调研,沙溪庙组硬塑性地层处于井深564～2147 m,即上述切削模型和压入模型中,采用围压为15 MPa的岩石力学试验参数作为仿真模型计算参数,因此,材料属性设置见表3。

表3　有限元仿真材料属性

Table 3　Finite element simulation of material properties

材料名称	密度/(g·cm^{-3})	杨氏模量/GPa	泊松比	抗压强度/MPa	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)
沙溪庙组砂岩	2.71	44.07	0.209	222.4	27.43	49
PDC齿	3.51	890.0	0.07	—	—	—

4　斧形曲面PDC齿破岩仿真研究

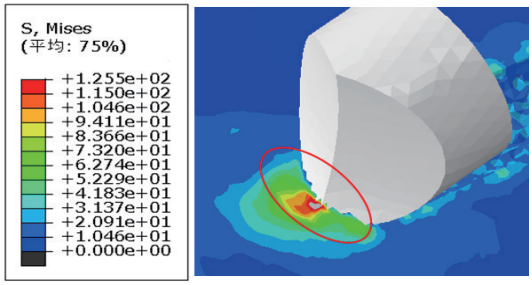
4.1　切削齿切削破岩仿真分析

为了更好对比斧形曲面PDC齿的破岩性能,对常规PDC齿开展同等条件下的切削破岩仿真研究,获得斧形曲面PDC齿和常规PDC齿破岩应力场如图7所示。

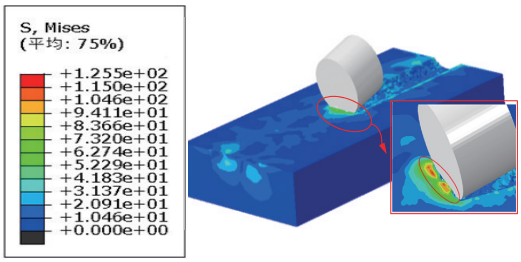
对比常规PDC齿和斧形曲面PDC齿仿真结果,得到常规PDC齿破岩方式主要以剪切为主,岩石受到较大应力区域为切削齿切削弧与岩石接触区域,该区域岩石最先受刮切而破坏;而斧形曲面PDC齿破岩方式为剪切、挤压和犁切共同作用,岩石受到较大应力区域为切削齿齿脊与岩石作用区域,斧形两侧对岩石产生挤压破坏作用,曲面底部对岩石产生犁切作用。

根据切削齿破岩仿真,获得其切削力随时间变化规律曲线如图8所示,其中常规PDC齿切削力波

超星·期刊



(a) 斧形曲面齿切削破岩应力场



(b) 常规齿切削破岩应力场

图 7 斧形曲面齿与常规齿切削破岩应力场

Fig.7 Rock breaking stress field of axe-shape cambered cutters and conventional cutters

动较大,均值为855.9 N;而斧形曲面PDC齿切削力波动较小,切削较为平稳,均值为234.2 N,相较于常规PDC齿,斧形曲面PDC齿切削力下降72.6%。表明斧形曲面PDC齿在破岩过程中切削力更小且破岩更稳定。

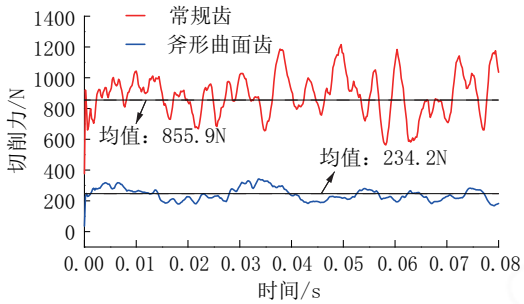
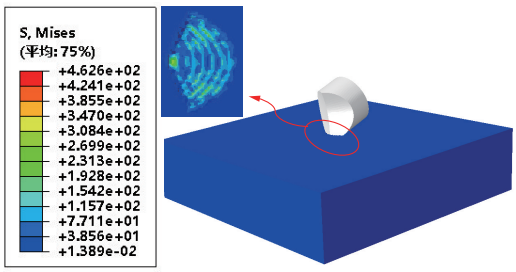


图 8 切削仿真的PDC齿切削力对比

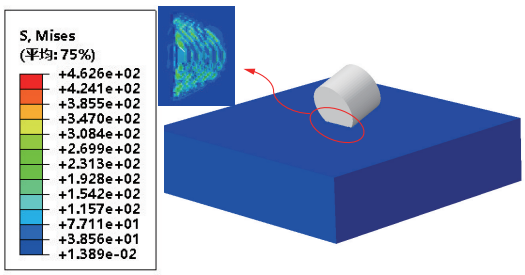
Fig.8 Cutting force comparison of PDC cutters in cutting simulation

4.2 切削齿压入破岩仿真分析

为探究斧形曲面PDC齿和常规PDC齿吃入岩石的能力,在同等条件下开展了压入破岩仿真研究,获得其压入应力场如图9所示。由图可知,斧形曲面PDC齿压入破碎坑呈“扇形”状,且“扇形”面积随吃入深度的增加而增大,而顶点处应力最大,该处为斧形曲面PDC齿齿刃与曲面交接点,表明该齿具有较强的攻击性能;而常规PDC齿压入破碎坑呈“半圆”状,应力在齿刃处均匀分布,无应力集中现象;表明斧形曲面PDC齿相较于常规PDC齿由更优异的吃入能力。



(a) 斧形曲面轴向压入应力场



(b) 常规齿轴向压入应力场

图 9 斧形曲面齿与常规齿轴向压入应力场

Fig.9 Axial compression stress field of axe-shape cambered cutters and conventional cutters

与此同时,获得斧形曲面PDC齿和常规PDC齿压入过程中轴向力变化情况如图10所示。

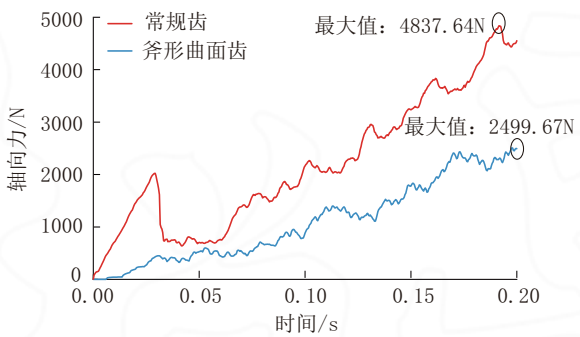


图 10 压入仿真的PDC齿轴向力对比

Fig.10 Axial force comparison of compacted PDC teeth

由图可知,斧形曲面PDC齿随着吃入深度的增加,齿的轴向力逐渐增加,在压入深度2 mm过程中,最大轴向力2499.67 N,且轴向力无大幅度波动现象,表明该齿吃入岩石过程较为稳定。

而常规PDC齿在吃入岩石时,轴向力先随吃入

超星·期刊

深度增加而增大,当达到一定值后,岩石发生大块破坏脱落,轴向力急剧降低;出现该现象原因为压入岩石为硬塑性岩石,常规PDC齿相较于斧形曲面PDC齿,齿刃较钝,无法直接吃入岩石,岩石在PDC轴向力作用下发生变形,当变形达到一定值后岩石发生破坏,导致PDC齿轴向力急剧降低;然后随着压入的继续,轴向力继续稳定增加,最大轴向力为4837.64 N。

综上所述,相较于常规PDC齿,斧形曲面PDC齿有较强吃入岩石的能力,且吃入岩石过程更稳定。

4.3　切削齿破岩比功分析

根据上述对斧形曲面PDC齿切削和压入破岩仿真分析,得到斧形曲面PDC齿平均切削力为234.2 N,切削面的投影面积为4.73 mm^2,通过式(1)、式(2)、式(3),得到斧形曲面PDC齿切削破岩比功(MSE_1)为49.48 MPa,较常规齿增加0.25 MPa,增幅0.5%;压入破岩比功(MSE_2)为77.37 MPa,较常规齿降低11.87 MPa,降幅13.3%;综合破岩比功(MSE)为126.85 MPa,较常规齿降低11.62 MPa,降幅8.4%,且破岩更稳定,表明斧形曲面齿未磨损时,在硬塑性地层有更优异的破岩性能。

4.4　不同磨损高度斧形曲面PDC齿破岩仿真研究

为探究斧形曲面PDC齿在磨损后的破岩性能,分别对该齿形磨损高度为1、2、3 mm后开展破岩仿真研究,以切削比功与压入比功来综合评价磨损后斧形曲面齿的破岩性能。其磨损后斧形曲面PDC齿和常规PDC齿分别如图11所示。

通过对不同磨损高度切削齿破岩仿真,并根据破岩性能评价方法,获得不同磨损高度切削齿破岩比功如表4所示;相较于常规PDC齿,斧形曲面PDC齿在磨损程度为0、1、2、3 mm时破岩比功分别降低8.2%、6.7%、5.7%、2.2%,表明随着磨损程度的加剧,斧形曲面齿的破岩性能逐渐趋于常规齿。

为更好对比斧形曲面齿和常规齿的破岩性能,绘制两种齿形在不同磨损高度下破岩比功如图12所示。两种齿形在不同磨损高度下切削破岩比功均较小且稳定;而压入破岩比功相对较大,且随着磨损高度的增加而增大,表明随着磨损的进行,切削齿越难吃入岩石,破岩难度更大。

综上所述,斧形曲面齿在不同磨损高度下,破岩比功比常规齿小,表明斧形曲面齿在磨损前后均具有更优异的破岩性能。

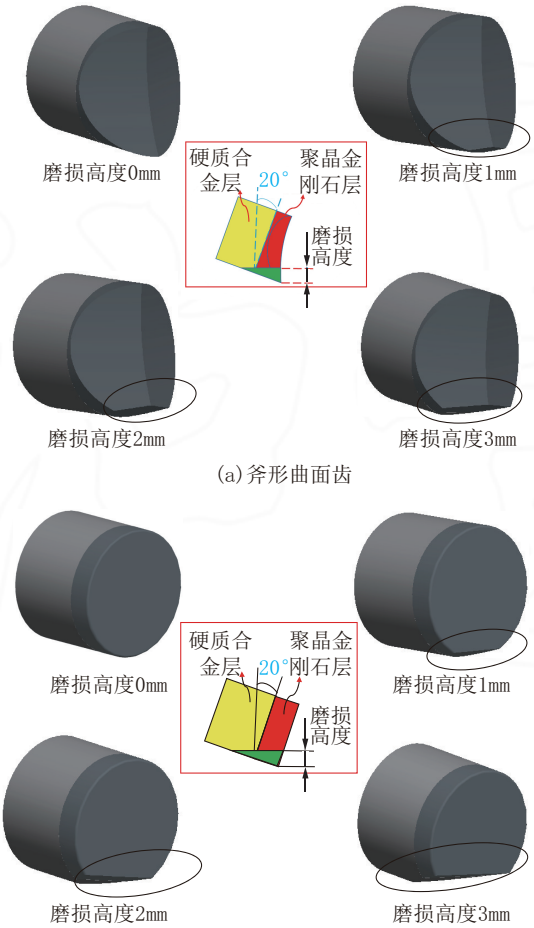


图11　磨损后PDC齿模型对比

Fig.11　Comparison of cutters model before and after wearing

表4　不同磨损高度切削齿破岩比功

Table 4　Rock breaking specific work of cutter at different wear heights

齿形	磨损高度/mm	MSE_1/MPa	MSE_2/MPa	MSE/MPa
斧形曲面PDC齿	0	49.48	77.37	126.85
	1	46.85	113.36	160.21
	2	48.84	161.57	210.41
	3	46.51	208.68	255.19
常规PDC齿	0	49.23	89.24	138.24
	1	49.20	122.52	171.72
	2	46.93	176.24	223.17
	3	49.24	211.77	261.01

超星·期刊

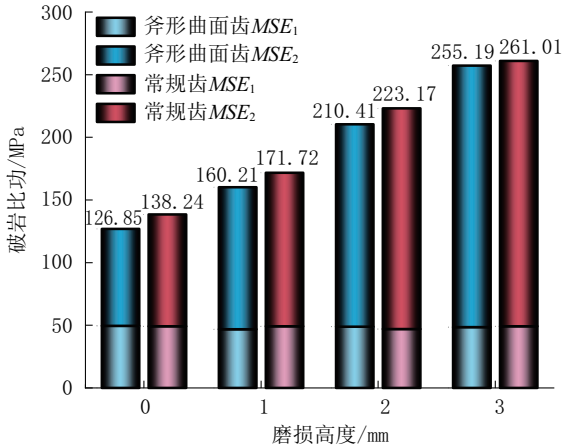


图 12 不同磨损高度切削齿破岩比功

Fig.12 Rock breaking specific work of cutter at different wear heights

5 斧形曲面齿破岩试验研究

为进一步探究斧形曲面齿与常规齿的实际破岩性能，对设计的斧形曲面齿与常规齿分别开展单齿切削破岩试验研究，对比分析其破岩性能。试验原理是通过三向力传感器实时监测切削过程中的轴向力、切削力和侧向力变化情况；试验参数：切削深度为2 mm，切削齿后倾角20°。

试验后获得斧形曲面齿和常规齿切削过程中切削力随时间的变化曲线如图13所示。常规齿在切削过程中平均切削力为834.4 N，且整体波动较大，峰值达到1600 N；斧形曲面齿平均切削力为362.68 N，且整体波动较小；表明斧形曲面齿在切削过程中振动较小，对切削齿的损伤较小。与切削齿破岩仿真对比，常规齿与斧形曲面齿平均切削力误差分别为2.5%和7.46%，误差较小，验证了仿真模型的正确性。

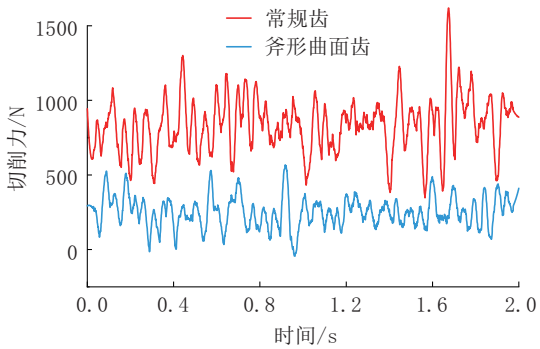


图 13 试验的切削齿切削力对比

Fig.13 Comparison of cutting force of the tested cutters

试验后，获得常规齿和斧形曲面齿切削痕迹及岩屑对比如图14所示，其中岩屑体积分别为2006.7 mm^3和687.1 mm^3，且常规齿岩屑粒径和破碎坑均比斧形曲面齿大；常规齿切削后破碎坑两侧较为规整，表明该齿主要以剪切方式破岩；而斧形曲面齿切削后破碎坑两侧受挤压作用导致岩屑脱落，且切削过程有岩屑飞溅现象发生，表明该齿以剪切、挤压、犁切共同作用破岩。

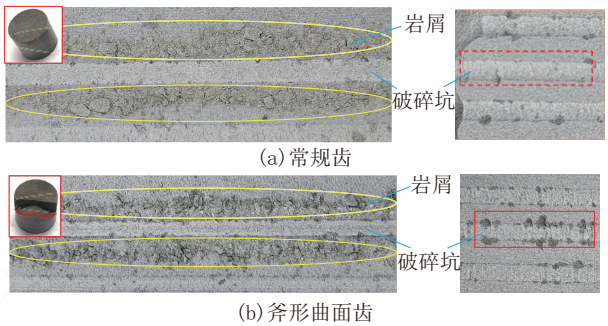


图 14 切削痕迹及岩屑对比

Fig.14 Comparison of cutting marks and cuttings

经计算分析，获得常规齿和斧形曲面齿破岩比功分别为124.7 MPa和110.5 MPa，在同等试验条件下，斧形曲面齿破岩比功较常规齿降低11.39%，通过试验表明斧形曲面齿较常规齿具有更优异的破岩性能。

6 结论

(1)开展了五宝场沙溪庙地层矿物组分分析及岩石力学特征研究，获得该地层岩石属于硬塑性砂岩地层，针对该地层岩性，综合考虑切削破岩比功与压入破岩比功，提出了一种更精准PDC齿破岩性能评价方法；

(2)结合斧形PDC齿和曲面PDC齿破岩方式和适用地层，提出一种斧形曲面PDC齿，并通过仿真方法对不同磨损高度下的斧形曲面PDC齿和常规PDC齿开展破岩研究，获得斧形曲面PDC齿在不同磨损高度(0～3 mm)时，破岩比功降低2.2%～8.2%，表明斧形曲面PDC齿具有更优异的破岩性能，且随着磨损的加剧，破岩性能逐渐趋于常规PDC齿；

(3)开展了斧形曲面齿与常规齿切削破岩试验，获得常规齿主要以剪切方式破岩，而斧形曲面齿以剪切、挤压、犁切共同作用破岩；相较于常规

超星·期刊

齿,斧形曲面齿切削力降低69.67%,破岩比功降低11.39%,且切削力振动较小,对切削齿损伤较小。综上所述,斧形曲面齿较常规齿在硬塑性地层有更优异的破岩性能。

参考文献(References):

[1] 郑家伟.国外金刚石钻头的新进展[J].石油机械,2016,44(8):31-36.
ZHENG Jiawei. New development in foreign diamond drill bit [J]. China Petroleum Machinery, 2016,44(8):31-36.

[2] 马亚超,陶垒,荣准.PDC钻头布齿技术研究综述[J].工程设计学报,2023,30(1):1-12.
MA Yachao, TAO Lei, RONG Zhun. Review of PDC bit cutter arrangement technology[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2023,30(1):1-12.

[3] Xiong Chao, Huang Zhongwei, Shi Huaizhong, et al. 3D cutting force model of a stinger pdc cutter: considering confining pressure and the thermal stress[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021,54(9):5001-5022.

[4] 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.

[5] 龚均云,吴文秀,周宗赣.斧形齿破岩机理数值模拟研究[J].石油机械,2022,50(9):44-51.
GONG Junyun, WU Wenxiu, ZHOU Zonggan. Numerical simulation on rock-breaking mechanism of axe-shaped cutter[J]. China Petroleum Machinery, 2022,50(9):44-51.

[6] Shao Fangyuan, Liu Wei, Ye Yuchen, et al. Study on rock-breaking mechanism of axe-shaped PDC cutter[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021,205:108922.

[7] 邹德永,潘龙,崔煜东,等.斧形PDC切削齿破岩机理及试验研究[J].石油机械,2022,50(1):34-40.
ZOU Deyong, PAN Long, CUI Yudong, et al. Rock breaking mechanism and experimental study of axe-shaped PDC cutter [J]. China Petroleum Machinery, 2022,50(1):34-40.

[8] 刘和兴,罗云旭,刘伟吉,等.异形PDC齿切削破碎非均质花岗岩机理研究[J].石油机械,2022,50(4):22-31.
LIU Hexing, LUO Yunxu, LIU Weiji, et al. Rock-breaking mechanism of special-shaped PDC cutter in heterogeneous granite[J]. China Petroleum Machinery, 2022,50(4):22-31.

[9] 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.

[10] 彭齐,周英操,周波,等.凸脊型非平面齿PDC钻头的研制与现场试验[J].石油钻探技术,2020,48(2):49-55.
PENG Qi, ZHOU Yingcao, ZHOU Bo, et al. Development and field test of a non-planar cutter PDC bit with convex ridges [J]. Petroleum Rilling Echniques, 2020,48(2):49-55.

[11] Liu Jianxun, Zheng Hualin, Kuang Yuchun, et al. 3D numerical simulation of rock cutting of an innovative non-planar face PDC cutter and experimental verification[J]. Applied Sciences, 2019,9(20): 4372.

[12] 王光明,李达,倪骁骅.PDC钻头异形切削齿研究进展[J].石油矿场机械,2022,51(4):76-83.
WANG Guangming, LI Da, NI Xiaohua. Overseas research progress of special-shaped cutters for PDC bit[J]. Oil Field Equipment, 2022,51(4):76-83.

[13] Shao Fangyuan, Liu Wei, Gao Deli, et al. Development and verification of triple-ridge-shaped cutter for PDC bits[J]. SPE Journal, 2022,27(6):3849-3863.

[14] Zhang Zengzeng, Zhao Dajun, Zhao Yan, et al. 3D numerical simulation study of rock breaking of the wavy PDC cutter and field verification[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021,203:108578.

[15] Gao Ke, Li Meng, Dong Bo, et al. Bionic coupling polycrystalline diamond composite bit[J]. Petroleum exploration and development, 2014,41(4): 533-537.

[16] 汤凤林,赵荣欣,Нескоромных B.B.,等.新型凹状曲面金刚石复合片切削具的参数计算和分析[J].钻探工程,2023,50(5):73-80.
TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, Neskoromnyh V.V., et al. Parameter calculation and analysis of a novel concave surface PDC cutter[J]. Drilling Engineering, 2023,50(5):73-80.

[17] 汤凤林,赵荣欣,周欣,等.深部钻进用新型复合片钻头的试验研究[J].钻探工程,2023,50(1):39-48.
TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, ZHOU Xin, et al. Experimental research on a new generation PDC bit used for deep drilling[J]. Drilling Engineering, 2023,50(1):39-48.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 梁丽,肖一标,李大鹏,等.高压电脉冲破岩试验装置的研制[J].钻探工程,2021,48(11):77-83.
LIANG Li, XIAO Yibiao, LI Dapeng, et al. Development of a high voltage electric pulse rock breaking experiment device [J]. Drilling Engineering, 2021,48(11):77-83.

(编辑　王文)