



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2406154

引用格式:辛永安,付悦,刘家炜,等. PDC 钻头切削齿高效破岩热分析及工作参数优化[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(20): 8490-8497.

Xin Yong'an, Fu Yue, Liu Jiawei, et al. Efficient rock breaking thermal analysis and optimization of working parameters for PDC drill bit cutting teeth[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(20): 8490-8497.

PDC 钻头切削齿高效破岩热分析及工作参数优化

辛永安¹, 付悦¹, 刘家炜¹, 周士杰¹, 钟举¹, 李梓睿²

(1. 中石油江汉机械研究所有限公司, 荆州 434000; 2. 长江大学机械工程学院, 荆州 434000)

摘要 随着全球油气勘探开发不断向深井超深井发展,井下高温环境及现场作业时钻井工况参数选择不合理等问题使钻头磨损日益严重。为延长钻头寿命并提高破岩效率,建立聚晶金刚石复合片(polycrystalline diamond compact,PDC)单齿切削大理岩的三维仿真模型,分析不同切削深度、切削速度和齿倾角对 PDC 齿表面温度以及对破岩效率的影响规律。结果表明:在整个切削过程中切削齿温升分为上升期-过渡期-稳定期 3 个阶段,且随着切削深度增加到一定程度时岩石的破碎形式由塑性转变为脆性。切削速度的增加使温度与破碎比功均增加,切削深度与齿倾角的增加均会使破碎比功增加而温度出现先增大后减小的现象。并通过响应面法对切削速度、切削深度和齿倾角进行优化,给出最佳参数组合。研究成果可为现场 PDC 钻头高效破岩提供指导。

关键词 切削齿; 高效破岩; 数值模拟; 温度场; 参数优化

中图分类号 TE921;

文献标志码 A

Efficient Rock Breaking Thermal Analysis and Optimization of Working Parameters for PDC Drill Bit Cutting Teeth

XIN Yong-an¹, FU Yue¹, LIU Jia-wei¹, ZHOU Shi-jie¹, ZHONG Ju¹, LI Zi-rui²

(1. Jiangnan Machinery Research Institute Limited Company of CNPC, Jingzhou 434000, China;

2. College of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434000, China)

[Abstract] With the development of global oil and gas exploration and development to deep and ultra-deep wells, the problems such as underground high temperature environment and unreasonable selection of drilling parameters in field operation make the bit wear increasingly serious. In order to prolong the bit life and improve the rock breaking efficiency, a 3D simulation model of polycrystalline diamond compact(PDC) cutters marble was established, and the effects of different cutting depth, cutting speed and bit caster on the PDC cutters surface temperature and rock breaking efficiency were analyzed. The results show that the temperature rise of the cutting gear can be divided into three stages: ascending period, transitional period and stable period, and the crushing form of the rock changes from plastic to brittle when the cutting depth increases to a certain extent. With the increase of cutting speed, both temperature and crushing work ratio increase. With the increase of cutting depth and bit caster, the crushing work ratio increases and the temperature increases first and then decreases. The response surface method was used to optimize the cutting speed, cutting depth and bit caster, and the optimal parameter combination was given. The research results can provide guidance for efficient rock breaking of PDC bit in field.

[Keywords] cutting teeth; efficient rock breaking; numerical simulation; temperature field; parameter optimization

随着勘探开发理论的发展和探测技术的进步,聚晶金刚石复合片(polycrystalline diamond compact,PDC)钻头以其高抗研磨性和抗冲击性的优点在钻井作业中被广泛应用,且已占近 80% 的世界油气市场份额,世界钻井总进尺数占比更是超过了 90%,且趋势仍在增加^[1]。为探究钻头提速机理,邹德永等^[2-3]研究了切削齿布齿参数对破碎比功、力学响应的规律,明确了钻井钻头的优选布齿角度及提速机理,并提出采用短抛物线形冠部的 PDC 钻头

在中国中原油田硬地层中成功试验,其平均机械钻速达到 5.65 m/h。北京探矿工程研究所的 NR826M 系列孕镶金刚石钻头在新疆博孜、四川元坝区块实现成功应用,且该钻头在现场硬地层作业平均时效是进口牙轮钻头的 2.7 倍^[4]。高破岩效率是 PDC 钻头成为当今油气钻井领域破岩主流工具的重要原因,但随着近年来全球油气勘探开发领域由浅层向深层、超深层发展,钻井作业环境也越来越恶劣,常规 PDC 钻头因在材料和切削原理上的局限性^[5],

收稿日期:2024-08-16; 修订日期:2025-04-23

基金项目:中石油上游领域关键核心技术重大科技攻关项目(2020B-4018)

第一作者:辛永安(1978—),男,汉族,河北张家口人,高级工程师。研究方向:连续管作业工艺与工具技术。E-mail:xinya@cnpc.com.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

对于深井中高温高压环境下坚硬地层、强研磨性地层钻进时存在切削齿磨损严重导致使用寿命短以及成本高等问题,这给深层钻井作业提出了挑战。

切削齿的主要失效形式为断裂与磨损,由于深层地层岩性复杂,常规 PDC 齿在作业时黏滞滑动现象明显,吴泽兵等^[6-7]通过仿生原理和非平面结构设计了多种新型 PDC 来提升钻头破岩效率,有效解决钻头的黏滞滑动,减小钻头磨损。此外,切削温度也是切削过程中影响切削齿断裂与磨损的重要因素,为减小温度对 PDC 齿的影响,研究者们从 PDC 齿的结构参数和材料上开展研究。高明洋等^[8]研究发现,在高温硬地层钻进条件下 PDC 切削齿相对于磨料磨损和冲击磨损更容易出现热损伤的破坏形式。高德利等^[9]根据 185 口井的 363 只 PDC 钻头的出井况提出建议采用深脱钻、大粒度、金刚石层加厚等方法来提升热稳定性减少磨损。张在兴等^[10-11]建立了岩石破碎力学模型,通过分析不同切削参数下切削齿温升大小给出了既能增强切削齿的强度,又能延长切削齿的使用寿命的切削参数。Halliburton 公司推出的 Geometrix 4D Cut-ters 通过对切削齿结构进行优化设计使其在提升钻进速度的同时又能降低切削齿热降解^[1]。

除钻头本身改进外,合理选择钻头作业时的工作参数也是有效降低切削齿热损伤的重要途径。国外 PDC 钻头、牙轮钻头、孕镶金刚石钻头破岩提速技术成熟,形成系列化,由于能源开采的地质条件往往复杂多变,中国虽然常规钻头种类齐全、成熟应用,但可靠性、地层适应性等方面仍有欠缺^[12],这使得在现场作业时施工人员为加快进尺盲目选择不合理工作参数导致出现卡钻、烧钻情况,这反而使作业效率降低,增加作业成本。

鉴于此,开展对于不同切削深度、切削速度和齿倾角对 PDC 齿表面温度以及对破岩效率的影响规律的研究,并通过响应面法优化得到最佳工作参数组合来指导现场钻井作业。该研究对 PDC 齿破岩效率的影响规律进行总结,可为现场 PDC 钻头高效破岩提供理论依据。

1 PDC 单齿破岩模型建立

1.1 岩石切削热模型及失效准则

切削岩石的过程中存在 3 个汇集在切削刃附近的变形区,切削时所产生的热量也基本来源于这 3 个变形区^[13]。如图 1 所示,第 I 变形区是切削过程中岩石由于弹塑性变形产生的热量;第 II 变形区是前齿面与岩屑接触摩擦产生的摩擦热;第 III 变形区是后刀面与岩石接触摩擦产生的摩擦热。

经过现场使用情况与实验结果分析发现第一变形区的变形和第二变形区的摩擦所产生的热量是 PDC 钻头金刚石复合片磨损的主要原因之一,因此取切削齿前表面为研究对象,建立相应的温度表达式^[14]为

$$\bar{T}_q = \tau \sqrt{\frac{va_c \varepsilon}{\lambda c \rho}} B \quad (1)$$

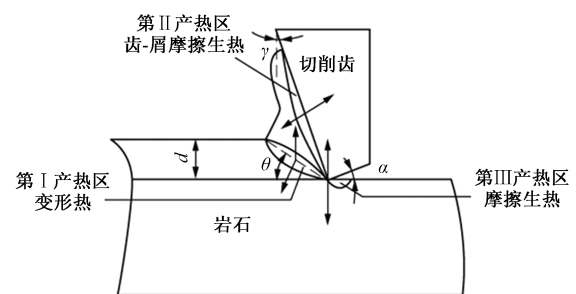
式(1)中: \bar{T}_q 为切削齿前刀面平均温度; τ 为剪切面的剪切应力, N/m^2 ; v 为切削速度, m/s ; a_c 为切削深度, m ; ε 为剪切变形量; λ 为岩石的导热率, $J/(m \cdot s \cdot ^\circ C)$; c 为比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; ρ 为岩石密度, kg/m^3 ; B 为常数。

采用 Drucker-Prager 强度准则作为岩石的塑性破坏准则,Drucker-Prager 模型是岩土力学领域中常用的本构模型。其既能反映中间主应力的影响,又能考虑静水压力对屈服与强度的影响,且 Drucker-Prager 准则是对 Mohr-Coulomb 准则的修正,其中参数包括内摩擦角、应变比和膨胀角是由 Mohr-Coulomb 准则转化得到。

岩石单元的损伤是一个过程,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 function 的函数它是平均应力与 Von-Mises 应力的比值^[15]。图 2 为材料的应力应变曲线。

$$D = 1 - \frac{E'}{E} = \begin{cases} 0, & \bar{\varepsilon}^{pl} < \bar{\varepsilon}_0^{pl} \\ 1 - \frac{\sigma}{\bar{\sigma}}, & \bar{\varepsilon}_0^{pl} \leq \bar{\varepsilon}^{pl} < \bar{\varepsilon}_f^{pl} \\ 1, & \bar{\varepsilon}^{pl} = \bar{\varepsilon}_f^{pl} \end{cases} \quad (2)$$

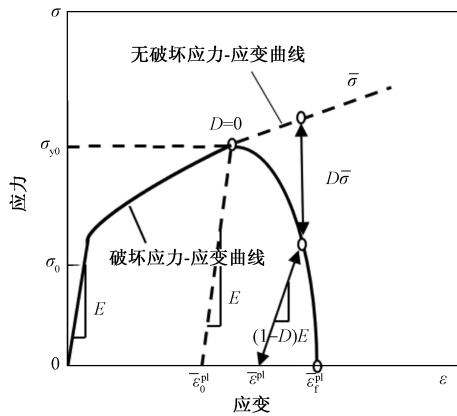
式(2)中: E 为未损伤时岩石弹性模量,MPa; E' 为岩石裂纹产生后等效弹性量,MPa; σ 为应力,MPa; $\bar{\sigma}$ 为材料中未受损应力的值,MPa; $\bar{\varepsilon}^{pl}$ 为岩石等效塑性应变; $\bar{\varepsilon}_0^{pl}$ 为损伤起始时等效塑性应变; $\bar{\varepsilon}_f^{pl}$ 为完全失效时等效塑性应变; D 为岩石损伤系数,一般认为若 D 为 1 时则此时岩石已完全损伤, D 为 0 则此时岩石还未出现损伤。



γ 为切削齿前倾角; α 为切削齿的后倾角; θ 为剪切角; d 为切削深度

图 1 岩石切削热源分布

Fig. 1 Distribution of heat sources for rock cutting



虚线代表岩石未出现损伤的应力-应变响应;实线代表岩石出现损伤时的应力-应变曲线;岩石损伤表现为应变软化 $D\sigma$ 和弹性退化 $(1-D)E$; σ_{30} 和 ϵ_0^p 分别为岩石开始破坏时的临界屈服应力和临界塑性应变

图2 材料的应力应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of material

1.2 单齿切削模型建立及数值模型验证

PDC 钻头切削齿切削破岩过程中切削速度、切削深度和齿倾角等参数是影响切削齿温升变化和破岩效率的重要因素。为探究上述参数对 PDC 钻头切削齿温度的变化和破岩效率的影响规律,开展不同切削速度 (1.13 ~ 11.3 m/s)、切削深度 (1 ~ 4 mm) 和齿倾角 ($0^\circ \sim 25^\circ$) 下 PDC 钻头切削齿破岩仿真分析,其中切削速度 v 的计算公式为

$$v = 2\pi rn \tag{3}$$

式(3)中: r 为钻头半径,mm; n 为转速,r/min。

通过 ABAQUS 软件进行热分析,建立的单齿切削模型可模拟切削齿在不同齿倾角、切削深度、切削速度下的破岩情况,为优化切削齿工作参数提供指导和依据。

PDC 齿根据实际情况设定为直径 10 mm,厚度 7 mm,岩石选择质地均匀的大理岩,岩石尺寸为140 mm

(长) $\times 100$ mm(宽) $\times 20$ mm(高),建立 PDC 单齿切削有限元模型如图 3 所示。为了获得较为准确的结果,提高计算精度,对与切削齿直接接触的岩石网格进行细化,选择计算精度高、稳定性好的网格单元 C3D8RT。边界条件设为大理岩的下底面全约束,切削齿只能沿着 x 轴方向移动,接触条件设定为切削齿的表面与大理岩每个节点相互接触,设定切向摩擦系数 0.3,接触面法向接触关系为硬接触,预定义切削齿和岩石的初始温度为 25°C ,大理岩与 PDC 齿参数如表 1 所示。

温度与围压是影响本构的关键因素^[16],为验证模型的可行性,首先根据文献[17]所给出的单轴压缩试验结果得到岩石的应力应变曲线以及抗压强度和弹性模量,再通过三轴压缩试验^[18]计算并转换成基于 Drucker-Prager 准则的岩石内摩擦角和内聚力,最后建立单轴压缩的仿真模型以进行仿真和试验应力应变曲线的对比。大理岩模型为 $\Phi 25$ mm \times 50 mm,网格尺寸为 1 mm,将水泥石下端固定,上端施加 2 mm/s 的压缩位移。图 4 为仿真结果,可以看出,岩石刚度退化率为 1 时,岩石实验与仿真的应力-应变曲线相差不大,其应变和实验结果相差 6.8%,应力-应变曲线的峰值以及曲线在达到抗压强度之后出现下降的趋势和实验结果一致,该仿真验证了大理岩本构的准确性。

1.3 评价指标

以破碎比功为评价指标来判断切削齿破岩效果的好坏^[19-20]。破碎比功表示破碎单位体积岩石所消耗的能量,是用来衡量钻头切削齿的破岩效果的重要指标,破碎比功越小,表明切削齿破岩所做的功越少,消耗的能量越少。其中,破碎岩石的功耗为切削力与行程的乘积,破碎体积为投影面积与行程的乘积,最后转化其表达式为

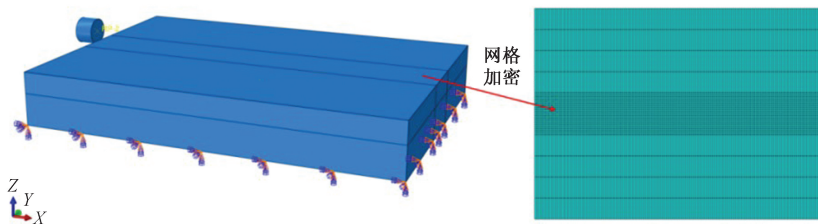


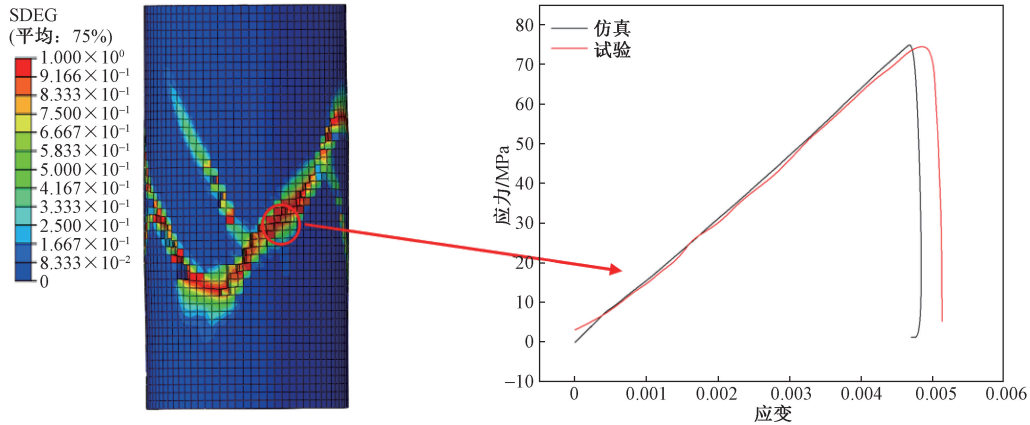
图3 PDC 单齿切削模型

Fig. 3 PDC single-tooth cutting model

表1 材料参数选择

Table 1 Material parameter selection

材料	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	导热率/ ($\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)	比热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)	热膨胀系数/ ($10^{-6}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)
PDC 齿	3 510	890.0	0.07	543	790.0	2.5
大理岩	2 650	17.7	0.25	800	3.5	52.0



SDEG 为标量损伤变量, 表示岩石的破坏程度, 无量纲

图4 单轴压缩仿真结果验证

Fig. 4 Verification of simulation results for uniaxial compression

$$MSE = \frac{W}{V} = \frac{F_h d}{A' d} = \frac{F_h}{A'} \quad (4)$$

式(4)中: MSE 为破碎比功, MPa; W 为破碎能耗, J; V 为破碎体积, mm^3 ; d 切削行程, mm; F_h 为切削力, N; A' 为接触面积, mm^2 。

2 切削齿破岩仿真分析

2.1 切削速度对温度和破碎比功的影响

当切削深度为 1 mm、齿倾角为 10° 时 PDC 钻头切削齿前齿面温升与切削速度的关系如图 5 所示, 整个切削过程中温升曲线可以分为 3 个阶段: 在 0.01 s 以内为上升期, 此时切削齿表面温度快速上升, 且切削速度越快温度上升越快; 在 0.01 ~ 0.03 s 为过渡期, 前齿面与岩屑接触热传递的同时产生摩擦热使表面温度稳定上升; 在 0.3 s 后为稳定期, 此时切削齿与岩屑持续接触, 切削齿温度不再继续上升达到相对平衡。随着切削速度的增加, 切削齿达到稳定期后温度也会明显增加。这是因为切削速度的增加, 导致岩屑与切削齿表面摩擦增大产生大量摩擦热使切削齿表面温度明显上升。

当齿倾角为 10° 时在不同切削深度下切削速度与破碎比功的关系如图 6 所示。可以看出, 破碎比功在不同切削深度下都随着切削速度的增加而增加, 这说明随着切削齿切削速度增加其在破岩时所消耗的能量也随之增加。

2.2 切削深度对温度和破碎比功的影响

当齿倾角为 10° 、切削速度 5.56 m/s 时不同切削深度下 PDC 钻头切削齿前齿面温升曲线如图 7 所示。可以看出, 在整个切削过程中温升曲线同样分为上升期-过渡期-稳定期 3 个阶段, 且在切削深度小于 2 mm 时, 随着切削深度的增加切削齿温升也会增加, 当切削深度大于 2 mm 时切削齿表面温

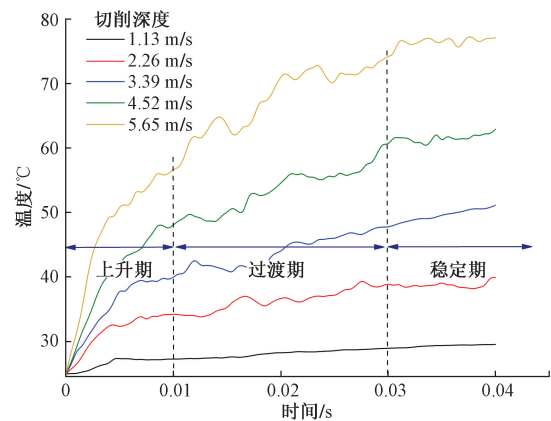


图5 不同切削速度齿面温升曲线

Fig. 5 Temperature rise curves of the tooth surface at different cutting speeds

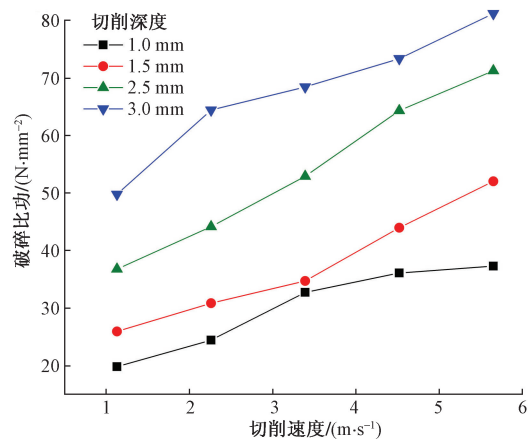


图6 切削速度对破碎比功的影响

Fig. 6 Effect of cutting speed on the MSE

度会随着切削深度增加而减小, 并最终稳定在 65°C 附近。这是因为随着切削深度的增加岩石破碎形式由塑性转变为脆性^[21], 如图 8 所示, 在切削深度为 1.5 mm 时岩石破碎均匀且为小颗粒粉末形状, 此时切削齿表面与岩石充分接触, 切削齿表面与岩

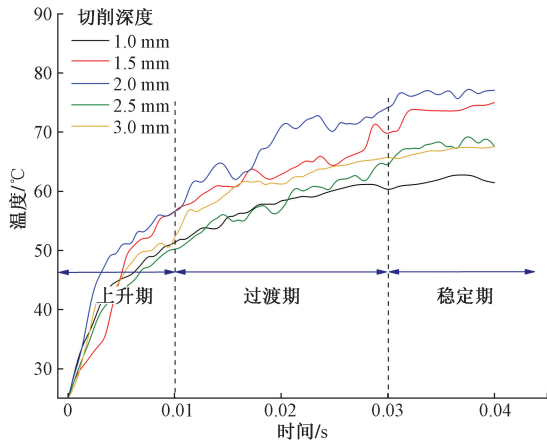


图7 不同切削深度齿面温升曲线

Fig. 7 Temperature rise curves of tooth surfaces at different cutting depths

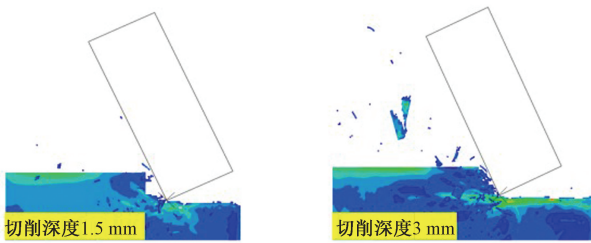


图8 二维切削过程示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the 2D cutting process

屑持续摩擦生热从而使前齿面达到较高温度;在切削深度为3 mm时切削齿破碎岩石产生的碎屑不均匀且有较大岩石颗粒脱落,此时原本在第I变形区因岩石产生弹塑性变形而产生的热量由于有大块碎屑脱落导致热量随之流失,同时使切削齿与岩屑接触面积反而减少,因此继续增加切削深度反而使得切削齿表面温度下降。

当齿倾角为10°时不同切削速度下破碎比功随着切削深度的变化趋势如图9所示。可以看出,破碎比功同样随着切削深度的增加而增大,这是由于随着切削深度的增加,与切削齿直接接触的岩石受到的钻压加大,岩石压缩程度加大,切削齿做功就越多从而破碎岩石所需能量也会越多。

2.3 齿倾角对温度和破碎比功的影响

当切削深度1 mm、切削速度2.26 m/s时不同齿倾角下切削齿表面温升曲线如图10所示。可以看出,温升曲线随着齿倾角的增加呈现出先增大后减小的趋势,当齿倾角在10°时温升程度最大。由图11可知,破碎比功随着齿倾角增大而增大,这是由于切削齿倾角越大岩石从剪切破坏转变为受压破坏,而大理岩抗压能力较强,因此破坏岩石所需能量也越多,破碎比功越大。

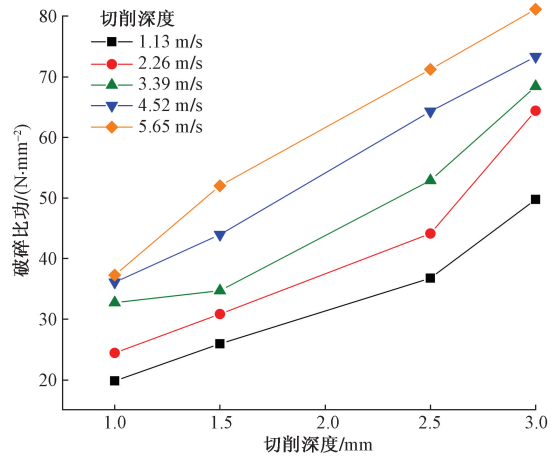


图9 切削深度对破碎比功的影响

Fig. 9 Influence of cutting depth on the MSE

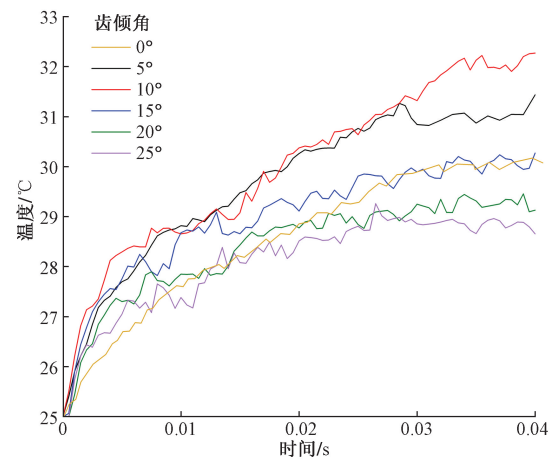


图10 不同齿倾角下齿面温升曲线

Fig. 10 Temperature rise curves of tooth surface under different tooth inclination angles

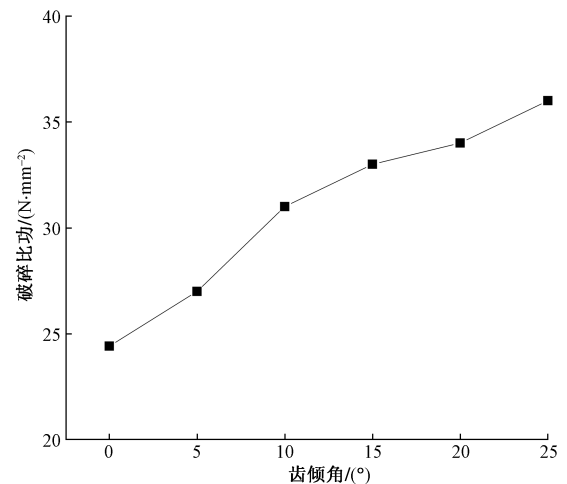


图11 齿倾角对破碎比功的影响

Fig. 11 Influence of tooth inclination on the MSE

3 PDC 齿工作参数和结构参数优选

通过对切削齿破岩仿真分析可以知道切削齿的温度随着切削速度增加而增加,随着齿倾角或切

削深度增加呈现出先增大后减小的趋势;而破碎比功则随着切削深度、切削速度、齿倾角的增加而增加。从仿真所得规律来看当切削深度较浅且切削速度较低时适当提高切削角度可实现在高效作业的同时减少切削齿的热磨损,因此找到 PDC 齿合适工作参数和结构参数是十分必要的。

3.1 响应面模型建立

响应面设计是一种常见的试验设计方法,结合本次仿真通过改变切削深度、切削速度、齿倾角来进行分析故采用三水平设计进行多目标优化,采用 Box-Behnken 试验设计方法,对于评价指标选择温度与破碎比功。其中温度选择在岩石切削处于稳定期的(0.3~0.4 s)所得到温度的均值。同时通过之前仿真分析得到的结论分别对不同因素的选取范围进行调整,具体的因素水平及选取范围如表 2 所示。

通过对表 2 中不同结构参数因素水平进行选取,根据 Box-Behnken 试验设计给出表 3 所示的 14 组方案,并按结构因素计算得到工作参数与温度 Y_T 和破碎比功 Y_W 的回归公式分别为

$$Y_T = 32.20 + 0.6275A + 5.26B - 4.06C + 0.0825AB + 1.144C - 2.21BC - 0.6488A^2 + 0.5362B^2 + 3.25C^2 \quad (5)$$

$$Y_W = -39.62074 + 32.63875A + 9.02765B + 1.16025C \quad (6)$$

式中:A 为切削深度,mm;B 为切削速度,m/s;C 为齿倾角,(°)。

表 2 结构因素及其水平

Table 2 Structural factors and their levels

因素	水平下限(-1)	中心(0)	水平上限(+1)
切削深度 A/mm	1	2	3
切削速度 B/(m·s ⁻¹)	1.13	2.26	3.39
齿倾角 C/(°)	0	10	20

表 3 Box-Behnken 试验设计及结果

Table 3 Box-Behnken trial design and results

序号	A/mm	B/(m·s ⁻¹)	C/(°)	温度/°C	破碎比功/(N·mm ⁻²)
1	3	3.39	10	37.21	89.12
2	2	1.13	0	32.30	42.37
3	2	2.26	10	32.20	54.90
4	2	1.13	20	27.76	60.46
5	2	3.39	20	35.25	79.83
6	3	1.13	10	27.93	77.92
7	2	3.39	0	48.62	46.04
8	1	2.26	0	38.81	24.42
9	3	2.26	20	33.07	87.76
10	1	3.39	10	36.08	27.52
11	1	2.26	20	29.24	34.00
12	1	1.13	10	27.13	22.03
13	3	2.26	0	38.07	64.40
14	2	2.26	10	32.20	54.90

3.2 模型分析及工作参数优选

现通过方差分析来观察所选取的工作参数与结构参数对评价指标的影响是否显著,温度方差分析结果如表 4 所示。复相关系数 R^2 接近于 1,表明预测的关联性较好。切削速度与齿倾角对温度的影响显著($P < 0.0001$)。

破碎比功方差分析结果如表 5 所示。可以看出,该模型的预测关联性较好且 3 种因素对破碎比功的影响都呈显著,其中切削深度对破碎比功的影响最为明显。根据上述分析可发现若想减小温度对钻头的影响可通过修改切削速度和选择不同齿倾角的钻头实现;而想降低破碎比功减小钻头破岩时能量消耗则选择合适切削深度是最有效的。

做出响应曲面结果如图 12 所示,结合本次仿真所给参数最佳仿真组为:切削深度 1.5 mm、切削速度 1.13 m/s、齿倾角 15°。此时评价指标均处于较低水平(温度 28.89°、破碎比功 41.504 MPa),这与之前通过仿真分析所得到的结论相同。

本次研究旨在根据综合考虑实现温度对切削齿影响较小又能进行高效破岩作业,因此建立图 13 所示的综合评价图版,可以选择综合性最好的参数。但现场施工的具体要求不同,参数的优选也不相同。通过建立参数优选表(表 6)当现场要求平衡寿命与效率的关系时可将温度与破碎比功分为几个等级,根据实际情况选取相应组合改善钻头工作条件,以满足油气井高效安全的开发需求。

表 4 温度回归方程方差分析结果

Table 4 ANOVA results of the temperature regression equation

来源	离差平方和	自由度	均方	F 值	P
模型	427.98	9	47.55	61.02	< 0.0001
A-切削深度(H)	3.15	1	3.15	4.04	0.0843
B-切削速度(v)	220.92	1	220.92	283.51	< 0.0001
C-齿倾角(θ)	131.87	1	131.87	169.23	< 0.0001
R^2	0.9874				

表 5 破碎比功回归方程方差分析结果

Table 5 MSE regression equation ANOVA results

来源	离差平方和	自由度	均方	F 值	P
模型	10431.77	3	3477.26	28.19	< 0.0001
A-切削深度(H)	8522.30	1	8522.30	69.10	< 0.0001
B-切削速度(v)	832.52	1	832.52	6.75	0.0221
C-齿倾角(θ)	1076.94	1	1076.94	8.73	0.0112
R^2	0.9512				

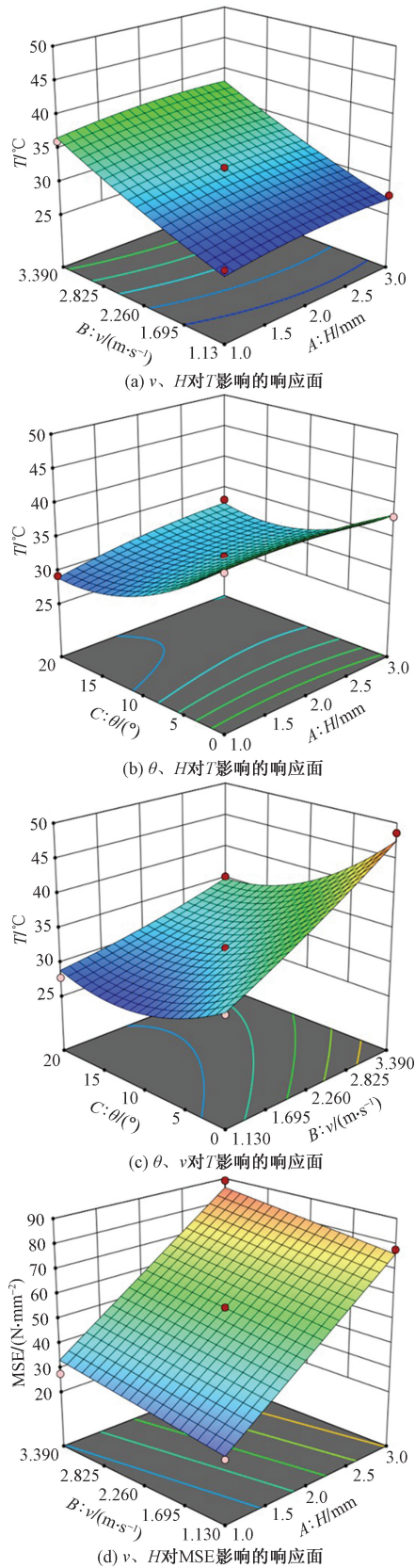


图12 切削深度、切削速度、齿倾角对温度和破碎比功影响的响应面图

Fig. 12 Response surface plot of depth of cut, cutting speed and inclination of teeth on temperature and MSE

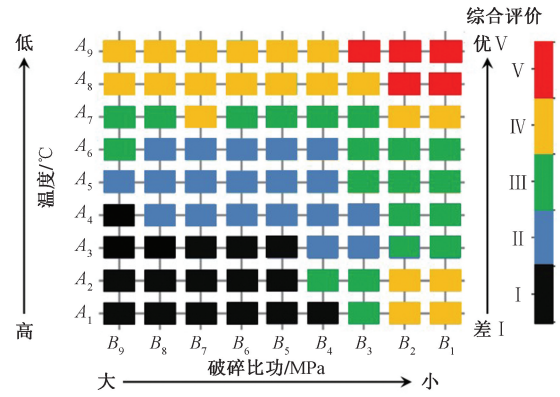


图13 综合评价图版

Fig. 13 Comprehensive evaluation chart

表6 参数优选

Table 6 Parameter preference table

现场应用	切削深度/mm	切削速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	齿倾角/ ($^{\circ}$)	效率 评价	寿命 评价
工作效率优先	1	5.56	10	V	I
工作寿命优先	3	1.13	5	II	IV
综合考虑	1.5	1.13	15	III	III

4 结论

通过建立单齿破岩模型,研究不同工况参数下PDC切削齿破碎岩石的过程,揭示了切削速度、切削深度、齿倾角对岩石破碎效率以及切削齿温度分布的影响规律,得到如下结论。

(1)通过仿真分析发现切削齿温升曲线可以分为上升、过渡、稳定3个阶段,切削深度增加到一定程度时岩石的破碎形式由塑性转变为脆性。

(2)明确了不同工况参数与结构参数对PDC齿表面温度和破岩效率的影响规律。其中切削速度的增加会使温度与破碎比功增加;切削深度与齿倾角的增加均会使破碎比功增加而温度出现先增大后减小的现象。

(3)构建响应面模型进行参数优选,发现当切削深度较浅且切削速度较低时适当提高切削角度可实现在高效作业的同时减少切削齿的热磨损,给出推荐参数为:切削深度1.5 mm、切削速度1.13 m/s、齿倾角 15° ,并建立优选参数表可结合实际工况推荐相应的参数。

参考文献

[1] 呼怀刚, 黄洪春, 汪海阁, 等. 国内外PDC钻头新进展与发展趋势展望[J]. 石油机械, 2024, 52(2): 1-10.
Hu Huaigang, Huang Hongchun, Wang Haige, et al. New progress and development trends of PDC bits in China and abroad[J]. China Petroleum Machinery, 2024, 52(2): 1-10.

- [2] 邹德永, 徐城凯, 易杨, 等. PDC 钻头布齿参数与地层适应性的试验研究[J]. 天然气工业, 2017, 37(9): 85-90.
Zou Deyong, Xu Chengkai, Yi Yang, et al. An experimental study on PDC bits' cutter parameters and formation adaptability[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(9): 85-90.
- [3] 邹德永, 梁尔国. 硬地层 PDC 钻头设计的探讨[J]. 石油机械, 2004(9): 28-31, 84-85.
Zou Deyong, Liang Erguo. Discussion on the design of PDC drill bits for hard ground[J]. China Petroleum Machinery, 2004(9): 28-31, 84-85.
- [4] 沈立娜, 贾美玲, 蔡家品, 等. 金刚石钻头高效破岩技术新进展[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2022, 42(6): 662-666.
Shen Lina, Jia Meiling, Cai Jiapin, et al. New progress in high-efficiency rock breaking technology of diamond drill bits[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2022, 42(6): 662-666.
- [5] 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.
- [6] 吴泽兵, 袁若飞, 张文溪, 等. 智能仿生 PDC 钻头的破岩数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(16): 6870-6880.
Wu Zebing, Yuan Ruofei, Zhang Wenxi, et al. Numerical simulation of rock breaking with intelligent bionic PDC bit[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(16): 6870-6880.
- [7] 吴泽兵, 袁若飞, 张文溪, 等. 圆弧锯形仿生 PDC 齿的破岩机理及钻头钻进分析[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(24): 10280-10286.
Wu Zebing, Yuan Ruofei, Zhang Wenxi, et al. Rock breaking mechanism and bit drilling analysis of circular arc saw bionic PDC cutter[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(24): 10280-10286.
- [8] 高明洋, 张凯, 周琴, 等. 高温硬地层钻进中 PDC 钻头切削齿磨损研究[J]. 钻探工程, 2018, 45(10): 185-189.
Gao Mingyang, Zhang Kai, Zhou Qin, et al. Wear of PDC cutters in high temperature hard formation drilling[J]. Drilling Engineering, 2018, 45(10): 185-189.
- [9] 高德利, 刘维, 万绪新, 等. PDC 钻头钻井提速关键影响因素研究[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 20-34.
Gao Deli, Liu Wei, Wan Xuxin, et al. Study on key factors influencing the ROP improvement of PDC bits[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(4): 20-34.
- [10] 张在兴, 周琴, 张凯, 等. 切削角度对切削齿温度分布的影响分析[J]. 石油机械, 2021, 49(12): 17-26.
Zhang Zaixing, Zhou Qin, Zhang Kai, et al. Influence of cutting angle on temperature distribution of cutter[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(12): 17-26.
- [11] 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.
Zhang Zaixing, Zhou Qin, Zhang Kai, et al. Analysis of the influence of rock cutting depth on the temperature distribution of cutter[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S2): 492-501.
- [12] 汪海阁, 黄洪春, 毕文欣, 等. 深井超深井油气钻井技术进展与展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 163-177.
Wang Haige, Huang Hongchun, Bi Wenxin, et al. Deep and ultra-deep oil/gas well drilling technologies: progress and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 163-177.
- [13] 郑国敬, 周琴, 张凯, 等. 单齿回转切削力学模型的研究进展[J]. 煤炭学报, 2018, 43(S2): 573-580.
Zheng Guojing, Zhou Qin, Zhang Kai, et al. Advances and trends in the study on rotary cutting mechanical model of single cutter[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S2): 573-580.
- [14] 李勇. PDC 钻头切削齿破岩过程热分析与仿真[D]. 成都: 西南石油大学, 2012.
Li Yong. Thermal analysis and simulation of rock breaking process of PDC bit cutter[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012.
- [15] 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. West Conshohocken: ASTM, 2018; DOI: 10.1051/mateconf/201814816006.
- [16] 纪慧, 朱亮, 楼一珊, 等. 南海深部温压地层岩石可钻性评价及应[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(33): 14707-14713.
Ji Hui, Zhu Liang, Lou Yishan, et al. Evaluation and application of rock drillability of deep thermobaric strata in the South China Sea[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(33): 14707-14713.
- [17] 张连英, 茅献彪, 李天珍. 高温环境下大理岩热损伤特性的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(4): 505-511.
Zhang Lianying, Mao Xianbiao, Li Tianzhen. Experimental research on thermal damage properties of marble at high temperature[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(4): 505-511.
- [18] 卢允德, 葛修润, 蒋宇, 等. 大理岩常规三轴压缩全过程试验和本构方程的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(15): 2489-2493.
Lu Yunde, Ge Xiurun, Jiang Yu, et al. Study on conventional tri-axial compression test of complete process for marble and its constitutive equation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004(15): 2489-2493.
- [19] 蔡灿, 伍开松, 袁晓红, 等. 基于岩石损伤本构的破碎比功评价模型研究与应用[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2576-2584.
Cai Can, Wu Kaisong, Yuan Xiaohong, et al. Evaluation model of crushing work ratio based on damage constitutive equation and its applications[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(9): 2576-2584.
- [20] 辛永安, 朱峰, 付悦, 等. PDC 高速切削水泥塞机理研究[J]. 石油机械, 2024, 52(7): 78-85.
Xin Yong'an, Zhu Feng, Fu Yue, et al. Mechanism of high-speed cutting of cement plug by PDC bit[J]. China Petroleum Machinery, 2024, 52(7): 78-85.
- [21] Richard T, Dagrain F, Poyol E, et al. Rock strength determination from scratch test[J]. Engineering Geology, 2012, 2012: DOI: 10.1016/j.enggeo.2012.07.011.