

PDC钻头后备布齿结构切削力学特性仿真分析

郑丽, 李怡然, 孟月, 刘振鹏, 任海涛*

(西南石油大学, 四川 成都 610500)

摘要: PDC钻头在复杂条件下因频繁的冲击振动易发生断齿、脱层、碎裂等异常失效, 采用后备布齿结构是降低冲击载荷、改善载荷环境的有效方法。本文基于川南龙马溪组页岩地层特性, 利用Abaqus软件建立“主切削齿-后备齿”组合切削有限元仿真模型并开展实验验证, 系统分析后备齿齿形、出露高差和切削深度对主切削齿工作载荷的影响规律。结果表明: 合理的后备布齿结构能有效分担主切削齿的冲击载荷、降低应力集中; 球头齿综合应力分散效果最优且适用范围最广, 圆台齿在0.5 mm出露高差、1.0 mm切削深度下分压效率最高; 0.5 mm出露高差综合降载效果最好, 但切削深度1.0 mm时需避开; 无后备齿时1.0 mm切削深度应力集中最严重, 搭配合适后备齿后推荐采用0.5、1.5 mm切削深度; 锥尖齿坡度无绝对优劣, 需与切削深度、出露高差耦合匹配; 川南页岩地层中钻进推荐采用球头齿作为后备齿, 出露高差设定为0.5 mm, 切削深度控制在0.5、1.5 mm。本研究可为复杂地层个性化PDC钻头优化设计提供理论支撑与技术参考。

关键词: PDC钻头; 后备布齿; 有限元仿真; 切削力学特性; 出露高差; 切削深度; 齿形; 页岩

中图分类号: TE921⁺.1; P634.4⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)05-0112-09

Simulation analysis of cutting mechanical characteristics of backup cutter layout structure for PDC bit

ZHENG Li, LI Yiran, MENG Yue, LIU Zhenpeng, REN Haitao*

(Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500, China)

Abstract: Under complex conditions, PDC bits are prone to abnormal failures such as cutter breakage, delamination, and fragmentation due to frequent impact vibration. Adopting a backup cutter layout is an effective method to reduce impact loads and improve the load environment. Based on the formation characteristics of the Longmaxi Formation shale in southern Sichuan, a finite element simulation model of the "main cutter-backup cutter" combined cutting was established using Abaqus software and verified by experiments. The effects of backup cutter shape, exposure height difference, and cutting depth on the working load of the main cutter were systematically analyzed. The results show that a reasonable backup cutter layout can effectively share the impact load on the main cutter and reduce stress concentration. The spherical cutter exhibits the best overall stress dispersion effect and the widest applicability, while the truncated cone cutter achieves the highest load-sharing efficiency at an exposure height difference of 0.5 mm and a cutting depth of 1.0 mm. An exposure height difference of 0.5 mm yields the best comprehensive load reduction, but it should be avoided when the cutting depth is 1.0 mm. Without backup cutters, stress concentration is most severe at a cutting depth of 1.0 mm; when matched with appropriate backup cutters, cutting depths of 0.5 and 1.5 mm are recommended. The slope angle of the conical cutter has no absolute superiority or inferiority, requiring coupled matching with the cutting depth and exposure height difference. For drilling in the southern Sichuan shale formation,

收稿日期: 2026-02-12; 修回日期: 2026-04-23 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.05.012

基金项目: 国家科技重大专项课题(编号: 2025ZD1008304)

第一作者: 郑丽, 女, 汉族, 2005年生, 本科生, 石油工程专业, 研究方向为钻井破岩与钻头, 四川省成都市新都区新都大道8号, 202331010101@stu.swpu.edu.cn。

通信作者: 任海涛, 男, 汉族, 1982年生, 副研究员, 机械工程专业, 博士, 从事钻井岩石破碎学与钻头相关研究工作, 四川省成都市新都区新都大道8号, 254440593@qq.com。

引用格式: 郑丽, 李怡然, 孟月, 等. PDC钻头后备布齿结构切削力学特性仿真分析[J]. 钻探工程, 2026, 53(5): 112-120.

ZHENG Li, LI Yiran, MENG Yue, et al. Simulation analysis of cutting mechanical characteristics of backup cutter layout structure for PDC bit[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(5): 112-120.

the spherical cutter is recommended as the backup cutter, with the exposure height difference set to 0.5 mm and the cutting depth controlled at 0.5 or 1.5 mm. The results of this study can provide theoretical support and technical references for the optimized design of customized PDC bits in complex formations.

Key words: PDC bit; backup cutter layout; finite element simulation; cutting mechanical characteristics; exposure height difference; cutting depth; cutter shape; shale

0 引言

PDC钻头是一种高效的钻井破岩工具,广泛应用于石油、天然气等资源勘探开发。但在深地、深海及非常规钻井条件下,钻头的主切削齿因频繁的冲击振动容易发生断齿、脱层、碎裂等异常失效事故^[1-3]。PDC钻头的后备布齿设计是钻头个性化设计的重要组成部分,典型后备齿包括球头齿、圆台齿、锥尖齿、后备二级齿等,通过合理选择后备齿齿形、设定后备齿出露高差,能够有效降低作用于主切削齿的冲击载荷,保护主切削齿并提高PDC钻头稳定性,进而提高PDC钻头的抗冲击性、耐磨性,延长PDC钻头的使用寿命^[4-5]。但是,传统的PDC钻头设计长期依赖经验类比和实验验证,存在周期长、成本高、受力机制不直观等局限^[6]。利用Abaqus有限元分析软件,进行PDC钻头典型后备布齿结构切削力学特性仿真分析,能够方便、快捷制定PDC钻头设计方案。

近年来,国外研究更注重切削结构创新与多性能协同提升,通过对切削齿几何形状创新、地层特性与破岩机理的差异化组合设计(如混合切削结构和自适应布齿),实现切削效率、抗振性和导向性的协同优化^[7-11]。国内研究则侧重于PDC钻头工程化方法集成与设计体系构建,围绕冲击失效机理、仿生水力结构与侧向力平衡等关键方向,采用响应面法、鲸鱼优化算法、计算机辅助设计、有限元分析、参数化建模、全局力平衡布齿设计等多种方法优化设计PDC钻头^[12-18]。近十余年来,尽管有限元数值仿真已逐步成为钻头设计的重要辅助手段,但现有仿真研究多集中在主切削齿破岩行为、整体结构强度及刀翼布局优化等方面,而对典型后备齿结构切削力学特性的研究相对较少。本文通过有限元分析方法,研究后备布齿齿形、切削深度、相对出露高差等因素对主切削齿的工作载荷影响规律,提出PDC钻头后备齿结构优化设计方法,为钻头个性化设计提供参考依据。

1 PDC钻头主切削齿-后备齿组合仿真模型

1.1 目标地层典型岩样仿真模型

本研究主要针对川南地区(泸州、宜宾)页岩气储层龙马溪组,地层岩石以富有机质泥页岩为主,非均质性强,孔隙度普遍低于6%,渗透率通常小于0.001 mD,属于典型的低孔、低渗储层。龙马溪组页岩的密度一般在2.4~2.7 t/m³,岩石杨氏模量较高(一般>30 GPa),泊松比较低(约0.2~0.25),具有较强的脆性,这些特性使其在钻进过程中容易产生高频率的微破裂和较大的切削阻力,对PDC钻头的抗冲击性能提出了更高的要求^[19-21]。

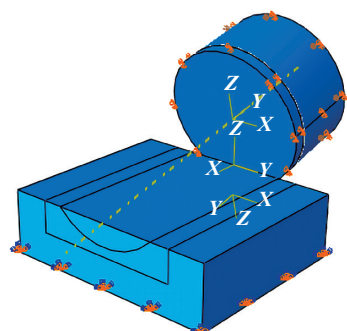
在Abaqus软件中进行有限元仿真时,设计岩石的尺寸为30 mm×20 mm×10 mm,密度为2.65 g/cm³,杨氏模量为30 GPa,泊松比为0.2。网格划分时,为提高计算效率,保证计算精度,降低计算负荷,模型中采用的单元类型为C3D8R(八节点六面体缩减积分实体单元)。在靠近界面部分细化网格,以平界面结构PDC齿模型为例,网格划分结果如图1所示。

1.2 主切削齿-后备齿仿真几何模型

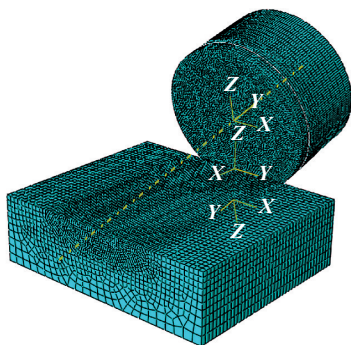
主切削齿是PDC钻头的主要切削元件,直接影响钻头的切削效率、破岩能力、力学特性、寿命等^[22-24]。仿真分析建模时,主切削齿直径 $\Phi 15.88$ mm,长度13 mm,倒角0.2 mm,前倾角15°,密度3.52 g/cm³,杨氏模量660 GPa,泊松比0.067。

典型后备齿结构具备多种功能,既能分担主切削齿的冲击载荷,降低其应力集中程度,还能优化切削力分布,平衡切削能量分配,改善主切削齿与岩石的动态接触特性,抑制横向振动并提升破岩效率,还可对主切削齿残留岩屑进行二次破碎^[19]。在仿真分析中,主切削齿选择0.5、1、1.5、2.0 mm 4种切削深度,后备齿选择球头齿、锥尖齿、圆台齿3种齿形,0.25、0.5、0.75、1 mm 4种相对高差。

基于上述参数,通过SolidWorks软件建立PDC钻头主切削齿三维模型,重点构建后备布齿结构的几何特征,对非关键结构进行合理简化,减少计算



(a) 岩块模型

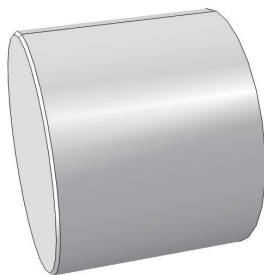


(b) 网格划分

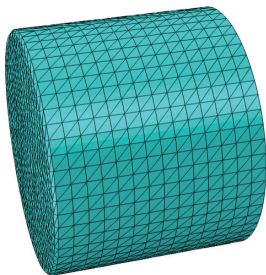
图1 岩块模型与网格划分

Fig.1 Rock block model and mesh generation

量,同时保留关键接触区域,如图2所示。



(a) 主切削齿模型



(b) 网格划分

图2 PDC钻头主切削齿模型和网格划分

Fig.2 Main cutting tooth model and meshing of PDC bit

1.3 主切削齿-后备齿组合与岩石互作用关系

在SolidWorks软件中,分别建立主切削齿与3种后备齿的组合模型,将模型数据导入Abaqus软件中,对模型进行属性指派,网格划分时需要注意指派单元类型为动力学分析,勾选单元删除为“是”,创建分析步选择显式动力学分析,为了减小仿真分析计算量,将质量缩放设置为 10^6 倍,设置切削齿和岩石模型的相互作用,如图3所示。此外,设置力学约束公式化为“罚函数接触”,摩擦系数为0.2,将岩

石模型完全固定,对切削齿施加位移载荷,最终结果如图4所示。

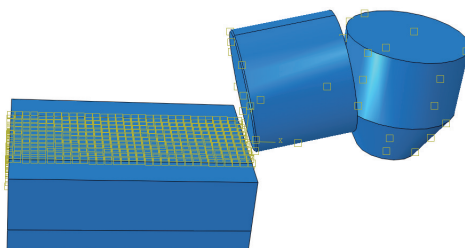


图3 圆台齿出露高差0.25 mm、切削深度0.5 mm的仿真模型

Fig.3 Simulation model of truncated cone tooth with 0.25 mm exposure height difference and 0.5 mm cutting depth

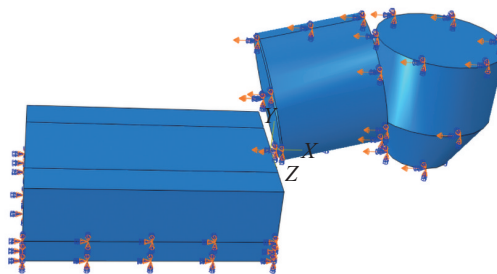


图4 圆台齿出露高差0.25 mm、切削深度0.5 mm的模型加载结果

Fig.4 Loading results of truncated cone tooth model with 0.25 mm exposure height difference and 0.5 mm cutting depth

2 仿真结果与分析

本文利用Abaqus软件的显式动力学分析模块,成功实现了PDC钻头“主切削齿-后备齿”组合切削岩石过程的动态仿真,为后续动力学特性分析提供了可靠的数值计算基础。

2.1 仿真结果的实验验证

为验证仿真结果的准确性,开展了PDC切削齿单齿破岩切削实验,如图5所示。选取标准PDC切削齿试样与目标岩石试件,将PDC切削齿固定于切削实验台加载端。岩石试件水平装夹固定;控制切削齿沿预设切削路径,以设定的切削深度和速度对岩石试件进行直线切削破岩作业。

实验全程通过高精度力测试系统,实时采集破岩全过程的轴向力、切向力、径向力三组载荷随切削路径的动态变化数据,得到切削齿在切削深度为1.5 mm时的切削力波动时域曲线,如图6所示。由图6



图5 PDC切削齿单齿破岩切削实验

Fig.5 Single PDC cutter rock cutting test

可知,在破岩过程中,切向力在 500~1000 N 范围内波动。如图7所示,在仿真条件下,切向力在 500~600 N 区间变化,仿真为理想单齿、均质地层、理想边界条件,实验存在真实岩石非均质性、钻机系统振动、装夹误差等多因素耦合干扰。仿真可设置纯切削工况,实验存在额外摩擦、振动附加载荷,因此实验载荷波动幅度更大,峰值更高,属于合理偏差。整体而言,该有限元仿真模型能够准确还原PDC切削破岩的全过程力学响应,模型具备良好的精度与可靠性,仿真方法可行,可为后续PDC切削结构优化与切削机理研究提供有效的理论支撑与仿真依据。

2.2 单主切削齿切削仿真分析

主切削齿是PDC钻头冠部最突出的结构,其力学行为决定了钻柱振动特性及钻头稳定性。探究不同典型后备布齿结构对主切削齿的切削力学特性的影响,需要对主切削齿进行单独的切削仿真分析,以获取主切削齿在无后备齿情况下的应力分布与载荷特性,作为后续对比分析的基准。仿真效果如图8所示,可以看出主切削齿的应力主要集中在切削刃与岩石接触区域,呈现明显的局部集中特征。

汇总不同切削深度下单主切削齿的最大表面接触应力与最大切削应力数据,绘制应力柱状图,如图9所示。从图中可以看出,当切削深度为0.5 mm时,主切削齿的最大表面接触应力最小,为373.9 MPa;

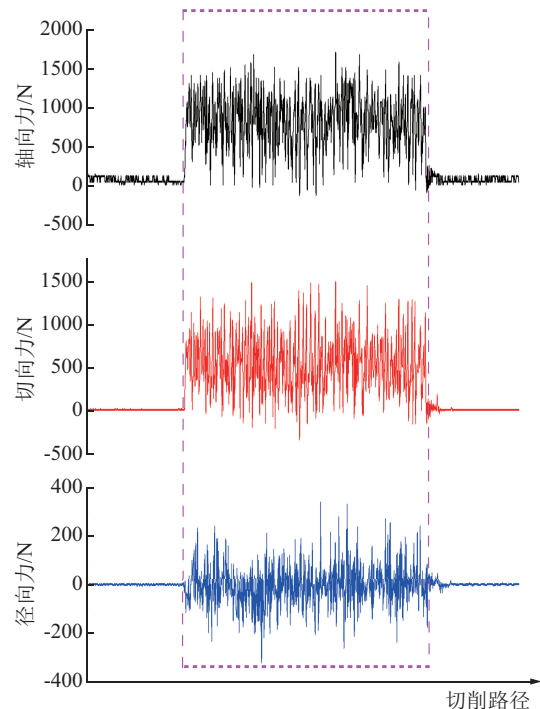


图6 PDC单齿破岩三向切削力随切削路径变化曲线

Fig.6 Variation curves of three-dimensional cutting forces with cutting path during single PDC cutter rock breaking

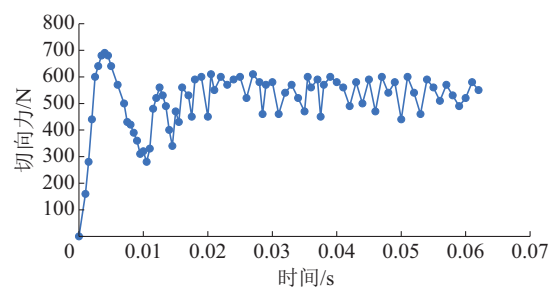


图7 PDC单齿仿真切削切向力随时间变化

Fig.7 Variation of cutting tangential force of single PDC cutter with time in simulation

在切削深度为1.0 mm时,主切削齿的最大表面接触应力最大,为933.6 MPa,达到了切削深度为0.5 mm时的2.5倍。

主切削齿的最大表面接触应力分布规律:切削深度 0.5 mm (373.9 MPa) < 切削深度 2.0 mm (461.2 MPa) < 切削深度 1.5 mm (570.0 MPa) < 切削深度 1.0 mm (933.6 MPa)。这一结果表明,切削深度对主切削齿的应力状态分布有显著影响,其核心机理在于:川南龙马溪组页岩具有高脆性、高杨氏模量的特性,切削深度的变化会直接改变主切削

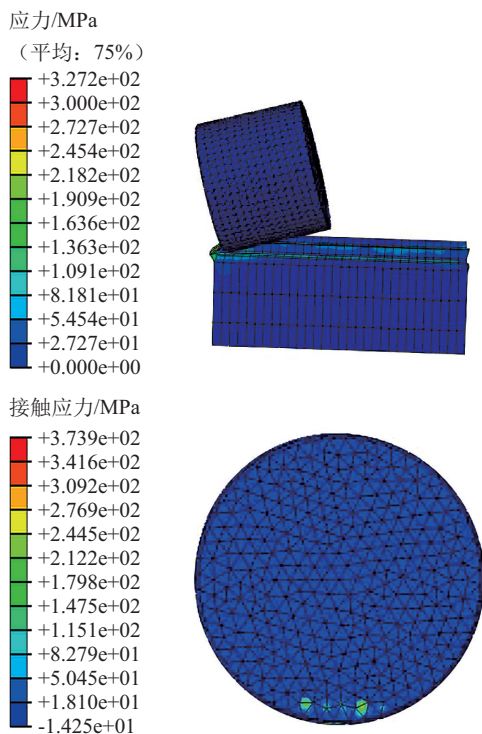


图8 主切削齿切削深度 0.5 mm 仿真效果

Fig.8 Simulation effect of main cutting tooth with 0.5 mm cutting depth

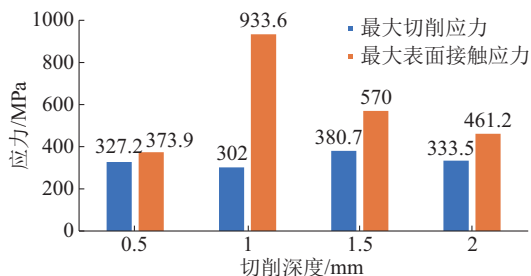


图9 主切削齿应力柱状图

Fig.9 Stress histogram of main cutting tooth

齿与岩石的接触面积、切削载荷的传递路径及能量耗散方式。当切削深度为 0.5 mm 时,主切削齿与岩石接触面积小,切削载荷集中程度低,且岩石破碎以表层微裂纹扩展为主,能量耗散平缓,因此应力集中较弱;当切削深度增至 1.0 mm 时,接触面积大幅增加,且岩石破碎方式从表层微裂纹转为深层剪切破碎,切削阻力急剧增大,载荷集中于切削刃局部,导致应力峰值骤升;当切削深度继续增至 1.5、2.0 mm 时,岩石破碎范围扩大,部分载荷通过破碎岩屑的滑移、脱落实现分散,同时主切削齿切削路径上的岩石应力提前释放,因此应力集中程度反而

有所缓解,但仍高于 0.5 mm 切削深度的应力水平。从工程实践来看,无后备齿的 PDC 钻头应尽量将切削深度控制在 0.5 mm 以下,以减少主切削齿的应力集中程度,减少异常失效风险。

2.3 齿形对切削齿组合工作载荷的特性影响

利用 Abaqus 软件系统仿真了 4 种后备齿齿形在 4 种出露高差和 4 种切削深度下共 64 种工况。图 10 以球头齿为例,展示了在 0.25 mm 出露高差下的仿真效果。

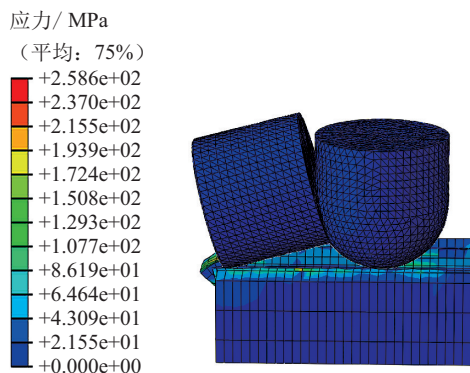
图10 球头齿出露高差 0.25 mm
切削深度 1.0 mm 的仿真模型

Fig.10 Spherical head tooth simulation model with 0.25 mm exposure height difference and 1.0 mm cutting depth

将所有工况下的仿真数据进行整理,可以汇总得到主切削齿搭配不同后备布齿结构在不同出露高差下表面接触应力变化,如图 11 所示。通过与单主切削齿基准应力值对比,可以得到以下认识。

切削深度 0.5 mm (图 11a) 时,主切削齿最大表面接触应力为 373.9 MPa (定义其为“基准值”)。仅有球头齿在出露高差为 0.5、0.75 mm 时能将主切削齿接触应力降低至基准值以下,最优值出现在球头齿、出露高差为 0.5 mm 的情况,最大表面接触应力为 318.3 MPa,出露高差为 0.75 mm 时,最大表面接触应力为 369.9 MPa,降低效果不明显。圆台齿和 2 种锥尖齿在此切削深度下,在所有出露高差时均未能有效分担载荷,甚至部分情况下最大表面接触应力略高于基准值。其原因是,浅切削条件下岩石破碎体积小,后备齿难以提前参与破碎岩石,仅圆滑过渡的球头齿可通过界面接触改善,实现小幅应力削弱。

切削深度 1.0 mm (图 11b) 时,主切削齿最大表面接触应力为 933.6 MPa,在所有切削深度中最高。

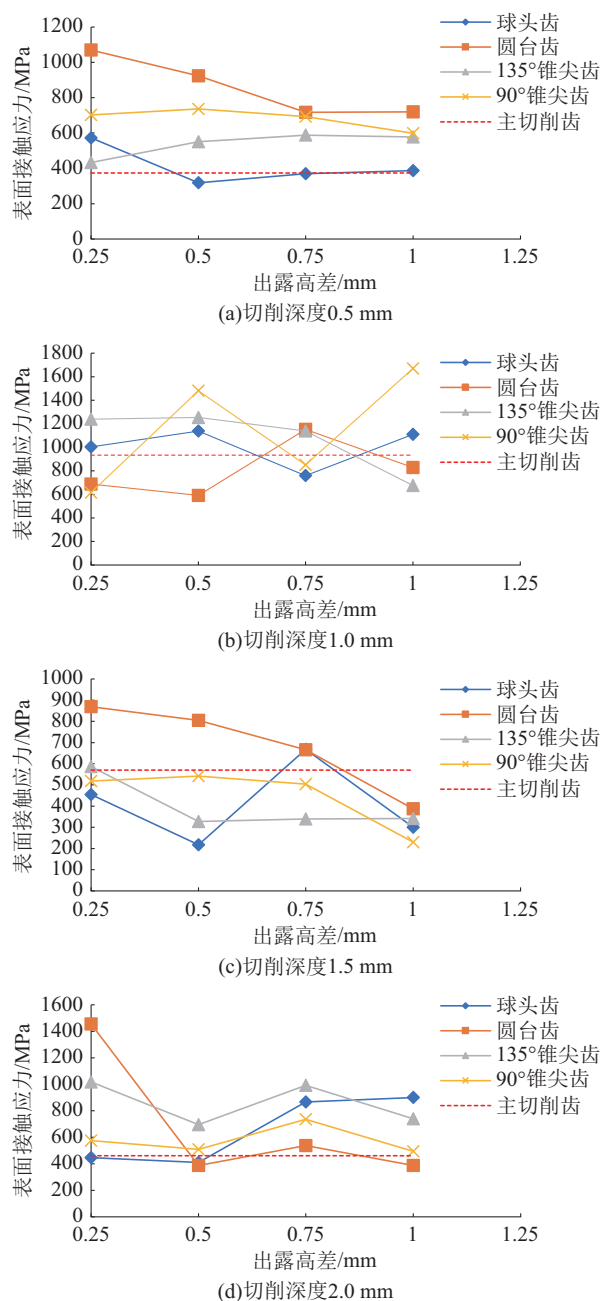


图 11 不同出露高差下表面接触应力对比

Fig.11 Comparison of surface contact stress under different exposure height differences

多种后备齿组合均能降低表面接触应力,其中圆台齿表现突出,在0.25、0.5、1.0 mm出露高差下均使主切削齿接触应力降低,且在出露高差为0.5 mm时效果最佳,应力降至591.6 MPa。球头齿(0.75 mm出露高差)和90°锥尖齿(0.25、0.75 mm出露高差)也展现出一定的应力分散效果,135°锥尖齿仅在1.0 mm出露高差时效果较好。在中等切削深度下,岩石剪切破坏区充分

扩展,后备齿可提前切入形成多齿协同破岩。其中圆台齿承载面适中,传递平顺,分压效率最高。

切削深度1.5 mm(图11c)时,主切削齿最大表面接触应力为570.0 MPa。球头齿和135°锥尖齿展现出卓越的应力分散能力。球头齿在0.25、0.5、1.0 mm出露高差下均能显著降低主切削齿应力,在0.5 mm出露高差下应力降至217.7 MPa,在所有仿真工况中效果最好。135°锥尖齿在0.5、0.75、1.0 mm出露高差下也有一定效果,较大切削深度形成厚岩屑层,球头齿以曲面接触实现均匀应力扩散,135°锥尖齿以平缓倾角实现渐进式切入,二者均可避免应力陡增。圆台齿则在1.0 mm出露高差下有效。90°锥尖齿在1.0 mm出露高差时效果最好。

切削深度2.0 mm(图11d)时,主切削齿最大表面接触应力为461.2 MPa。深切削条件下,岩石破碎范围大、载荷波动剧烈。后备齿整体分压效果减弱,仅球头齿、圆台齿在0.5 mm出露高差下有一定效果。

综合以上数据及分析,齿形与切削深度存在显著交互效应,浅切削优先球头齿,中等切削优选圆台齿,较深切削适用球头齿与大角度锥尖齿。球头齿以曲面均布应力实现分压,圆台齿以中等承载面实现协同破岩,锥尖齿则以尖端切入实现定向分压,其有效性依赖于出露高差与切削深度的匹配。

2.4 关键参数对切削齿组合的工作载荷特性影响

2.4.1 后备齿相对出露高差的影响规律

后备齿出露高差是影响主切削齿载荷分担效果的关键参数,其大小直接决定了后备齿与主切削齿的协同切削与载荷分配。根据图11主切削齿搭配不同后备布齿结构在不同出露高差下表面接触应力的变化情况,可以得到以下认识。

切削深度0.5 mm(图11a)时,仅球头齿在出露高差为0.5、0.75 mm时表面接触应力有所降低,其他出露高差情况下,不仅无法分散应力,反而会加剧应力集中。2种锥尖齿和圆台齿在4种出露高差下的效果都比较差,其中圆台齿的增幅最大。

切削深度1.0 mm(图11b)时,4种出露高差在搭配不同后备齿齿形时,表面接触应力都有一定降低。出露高差为0.25 mm时,圆台齿和90°锥尖齿效果较好;出露高差为0.5 mm时,仅圆台齿能够降低表面接触应力;出露高差为0.75 mm时,球头齿和90°锥尖齿效果较好;出露高差为1.0 mm时,135°锥尖齿和圆台齿效果较好。

切削深度 1.5 mm(图 11c)时,出露高差为 0.5 mm、后备齿齿形为球头齿时,降低表面接触应力的效果最好,当出露高差为 0.25、1.0 mm 时,也能降低表面接触应力,效果都较好。圆台齿仅在出露高差为 1.0 mm 时效果较好。在出露高差大于 0.25 mm 时 135°锥尖齿效果较好。在 4 种出露高差下,90°锥尖齿都能降低表面接触应力,出露高差为 1.0 mm 时,效果最好。

切削深度 2.0 mm(图 11d)时,当圆台齿在出露高差为 0.5、1.0 mm 时,降低表面接触应力的效果较好。球头齿在出露高差为 0.5 mm 时有一定效果。4 种出露高差下,锥尖齿降低表面接触应力的效果均较差。

综合以上数据及分析,在 4 种出露高差中,0.5 mm 出露高差对于主切削齿的应力分散能力综合较好,但是对于切削深度为 1.0 mm 时,基本不能分散应力反而加剧应力集中,因此在切削深度为 1.0 mm 时,选择 0.25、0.5 mm 出露高差的圆台齿更好。浅切削条件下出露高差过大会导致后备齿滞后参与,过小则干涉主切削;中等切削深度下,适中出露高差可实现双齿同步承载;深切削深度下出露高差过小将导致后备齿过早过载。因此出露高差的本质作用是调控多齿切削相位差,实现载荷梯次分担,避免峰值叠加。

2.4.2 主切削齿切削深度的影响规律

切削深度是 PDC 钻头在钻进过程中的关键操作参数,直接影响钻头的切削效率、载荷状态与使用寿命。基于不同出露高差与后备齿齿形组合,系统分析切削深度对主切削齿应力分布的影响规律,根据仿真数据汇总得到主切削齿搭配不同后备布齿结构在不同切削深度下表面接触应力的变化,如图 12 所示。

出露高差 0.25 mm(图 12a)时,切削深度为 0.5 mm 时,单主切削齿的最大表面接触应力本身较低,4 种后备齿齿形都不能降低表面接触应力;切削深度为 1.0 mm 时,圆台齿与 90°锥尖齿效果较好;切削深度为 1.5 mm 时,球头齿与 90°锥尖齿效果较好;切削深度为 2.0 mm 时,仅球头齿能降低表面接触应力,但效果不明显。

出露高差 0.5 mm(图 12b)时,4 种切削深度在搭配合适后备齿齿形时,能够降低表面接触应力。切削深度为 0.5 mm,搭配球头齿降低表面接触应力效果较好;切削深度为 1.0 mm,搭配圆台齿降低表

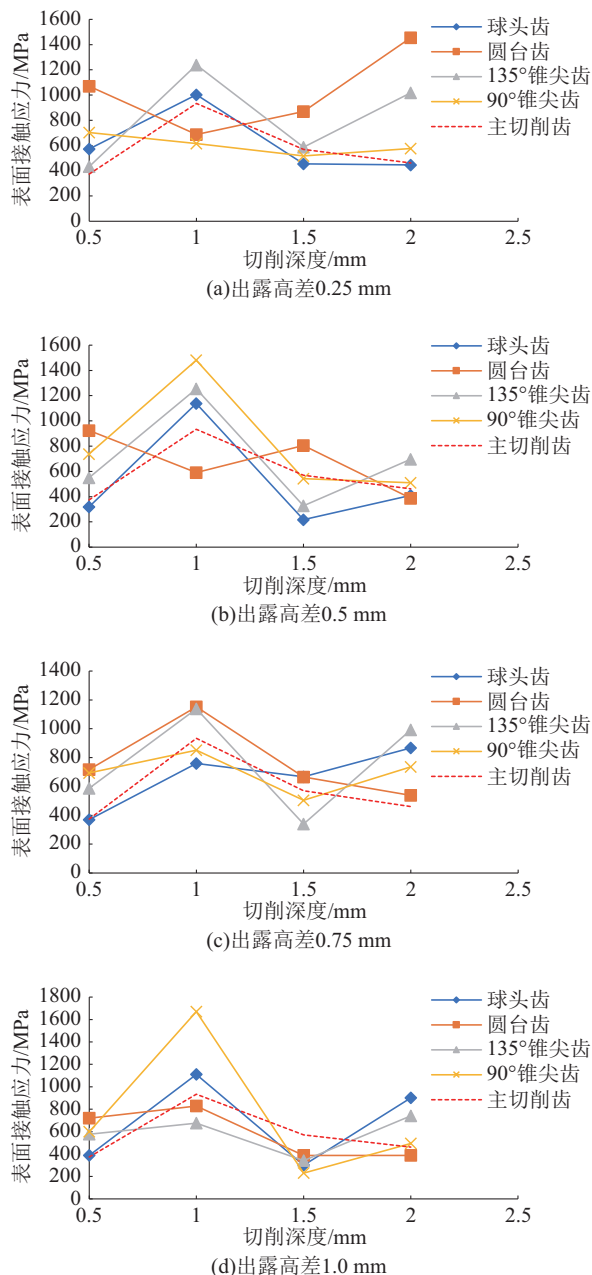


图 12 不同切削深度下表面接触应力对比

Fig.12 Comparison of surface contact stress under different cutting depths

面接触应力效果较好;切削深度为 1.5 mm 时,球头齿和 135°锥尖齿降低表面接触应力效果较好,90°锥尖齿有一定效果,但不明显;切削深度为 2.0 mm 时,球头齿和圆台齿效果较好。

出露高差 0.75 mm(图 12c)时,切削深度为 0.5 mm 时,仅球头齿能降低表面接触应力,但效果不明显;切削深度为 1.0 mm 时,球头齿和 90°锥尖齿效果较好;切削深度为 1.5 mm 时 2 种锥尖齿的效果较

好;4种后备齿齿形在切削深度为2.0 mm时效果均较差,不能降低表面接触应力。

出露高差1.0 mm(图12d)时,切削深度为1.5 mm时效果较好,4种后备齿齿形都能明显降低表面接触应力;但切削深度为0.5 mm时,4种后备齿齿形都不能降低表面接触应力;切削深度为1.0 mm时,圆台齿与135°锥尖齿效果较好;切削深度为2.0 mm时,圆台齿效果较好。

综合以上数据及分析,切削深度通过改变岩石剪切破坏区体积与应力场范围,主导切削时的应力水平。在不同的切削深度时,都有合适的后备布齿结构对主切削齿进行应力分散。但是总体上,切削深度为1.0 mm时应力集中情况严重,因此在切削过程中尽量选择0.5、1.5 mm的切削深度。

2.4.3 锥尖齿坡度的影响规律

锥尖齿的坡度直接影响其与岩石的接触方式、载荷传递路径及应力分布特征。选取135°、90°2种典型坡度的锥尖齿,系统分析其对切削齿组合的工作载荷特性的影响。

出露高差0.25 mm(图12a)时,90°锥尖齿在1.0、1.5 mm切削深度下的表现好于135°锥尖齿,在其他切削深度下,2种坡度的锥尖齿都不能降低主切削齿的表面接触应力。

出露高差0.5 mm(图12b)时,135°锥尖齿在0.5、1.0、1.5 mm切削深度下的表现好于90°锥尖齿,但是在2.0 mm切削深度下表现较差,且在0.5、1.0、2.0 mm切削深度下2种坡度的锥尖齿都不能降低主切削齿的表面接触应力。

出露高差0.75 mm(图12c)时,在1.5 mm切削深度下,2种锥尖齿都能降低表面接触应力,但135°锥尖齿的表现好于90°锥尖齿。1.0 mm切削深度下,90°锥尖齿的表现好于135°锥尖齿,且135°锥尖齿不能降低表面接触应力。

出露高差1.0 mm(图12d)时,1.0 mm切削深度下,135°锥尖齿表现好于90°锥尖齿,但是在1.5 mm切削深度下,90°锥尖齿效果更好。

综合以上数据和分析,锥尖齿坡度改变接触角度、切入顺序与应力传导路径,与切削深度、出露高差成复杂交互关系。90°锥尖齿在小高差、中浅切削深度下更易降低应力;135°锥尖齿在中大高差、较深切削深度下适应性更强。总体而言,锥尖齿坡度无绝对优劣,需与切削深度、出露高差协同匹配以实

现最优破岩轨迹与载荷分配。

3 结论

本文通过有限元仿真分析,揭示了PDC钻头后备布齿齿形、出露高差和切削深度等参数对主切削齿切削力学特性的影响规律,为钻头在复杂地层中优化设计提供了理论支撑。在川南页岩地层仿真条件下,得到以下主要结论。

(1)后备齿齿形的影响规律:球头齿综合应力分散效果最优、适用范围最广,锥尖齿需调整坡度与参数,90°锥尖齿在1.5 mm切削深度下效果突出,圆台齿仅在1.0 mm(0.5 mm出露高差)和2.0 mm(0.5 mm出露高差)切削深度下能有效分担载荷。

(2)后备齿相对出露高差的影响规律:0.5 mm出露高差时综合应力分散效果最优,但需避开切削深度1.0 mm,优先选取0.25、0.5 mm出露高差的圆台齿。

(3)主切削齿切削深度的影响规律:无后备齿时,1.0 mm切削深度最大表面接触应力达933.6 MPa(为0.5 mm时的2.5倍);搭配合适后备齿后,推荐采用0.5、1.5 mm切削深度,可显著降低主切削齿失效风险。

(4)锥尖齿坡度的影响规律:锥尖齿坡度无绝对优劣,需与切削深度、出露高差耦合匹配才能实现有效降载。

(5)针对川南页岩地层等类似环境,推荐采用球头齿作为后备齿,出露高差设定为0.5 mm,切削深度控制在0.5、1.5 mm,可显著改善PDC钻头的工作载荷环境,延长钻头的使用寿命。

参考文献(References):

- [1] 潘军,王敏生,光新军.PDC钻头新进展及发展思考[J].石油机械,2016,44(11):5-13.
PAN Jun, WANG Minsheng, GUANG Xinjun. New progress and future development of PDC bit[J]. China Petroleum Machinery, 2016,44(11):5-13.
- [2] 任海涛,周胜,周春晓,等.PDC钻头减振切削破岩载荷特性研究[J].地下空间与工程学报,2025,21(4):1269-1277.
REN Haitao, ZHOU Sheng, ZHOU Chunxiao, et al. Research on load characteristics of PDC bit rock-breaking cutting with vibration suppression[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2025,21(4):1269-1277.
- [3] 邹德永.新型PDC钻头切削齿的发展[J].石油钻探技术,2003,31(3):4-6.
ZOU Deyong. The development of new PDC cutting elements[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003,31(3):4-6.
- [4] 杨迎新.PDC钻头切削力学研究[D].成都:西南石油学院,

- 2003.
- YANG Yingxin. Research on mechanics of PDC bit rock cutting process[D]. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, 2003.
- [5] Brett J F, Warron T M, Bohr S M. Bit whirl—a new theory of PDC bit failure [J]. SPE Drilling Engineering, 1990, 5 (4) : 275–281.
- [6] 思娜,王敏生,李婧,等. PDC钻头新技术及发展趋势分析[J]. 石油矿场机械, 2018, 47(2): 1–7.
- SI Na, WANG Minsheng, LI Jing, et al. Abroad PDC bit technology's research trends and development thinking[J]. Oil Field Equipment, 2018, 47(2): 1–7.
- [7] Wise J L. Geometry and material choices govern hard-rock drilling performance of PDC drag cutters[C]//Alaska Rocks 2005, The 40th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS). Anchorage: American Rock Mechanics Association, 2005: AR-MA-05-883.
- [8] Pessier R, Damschen M. Hybrid bits offer distinct advantages in selected roller cone and PDC bit applications[C]//IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition. New Orleans: Society of Petroleum Engineers, 2010: SPE-128741-MS.
- [9] Mensa-Wilmot G, Mikhail B, Al-Saedi M, et al. Innovative design processes and technologies improve PDC bit performance in harsh drilling environments [C]//IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition. Bangkok: Society of Petroleum Engineers, 2006: SPE-103983-MS.
- [10] 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.
- [11] 许利辉,毕泗义. 国外PDC切削齿研究进展[J]. 石油机械, 2017, 45(2): 35–40.
- XU Lihui, BI Siyi. Overseas researches on PDC cutters [J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(2): 35–40.
- [12] 石建刚,刘颖彪,席传明,等. 基于冲击失效机理的PDC钻头优化设计方法研究[J]. 石油机械, 2025, 53(11): 80–87.
- SHI Jiangang, LIU Yingbiao, XI Chuanming, et al. Optimization design method of PDC bit based on impact failure mechanism [J]. China Petroleum Machinery, 2025, 53(11): 80–87.
- [13] 吴泽兵,王少飞,王志恒,等. 基于鲸鱼优化算法的PDC钻头侧向力平衡优化设计及破岩数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(31): 13352–13359.
- WU Zebing, WANG Shaofei, WANG Zhiheng, et al. Optimization design of lateral force balance of PDC bit and numerical simulation of rock breaking based on whale optimization algorithm [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(31): 13352–13359.
- [14] 吴泽兵,袁若飞,张文溪,等. 基于响应面法的仿生PDC钻头水力结构优化设计[J]. 机床与液压, 2024, 52(15): 102–109, 136.
- WU Zebing, YUAN Ruofei, ZHANG Wenxi, et al. Optimization design of bionic PDC bit hydraulic structure based on response surface method [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 52(15): 102–109, 136.
- [15] 刘建风. PDC钻头布齿研究及其计算机辅助设计[D]. 成都: 成都理工大学, 2003.
- LIU Jianfeng. Research on tooth arrangement of PDC bits and its computer aided design [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2003.
- [16] 徐玉超. 定向井PDC钻头受力模型及优化设计研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2008.
- XU Yuchao. Mechanical model and optimizing design of oriented PDC bit [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2008.
- [17] 陈玉中. 基于UG的PDC钻头钻进仿真方法研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- CHEN Yuzhong. Research on drilling simulation method of PDC bits based on UG [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [18] 马亚超,张鹏,黄志强,等. 全局力平衡PDC钻头布齿优化设计[J]. 中国机械工程, 2020, 31(20): 2412–2419, 2428.
- MA Yachao, ZHANG Peng, HUANG Zhiqiang, et al. Optimal design for cutter-layout of global force balanced PDC bits [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(20): 2412–2419, 2428.
- [19] 任建飞,雷刚,刘向君,等. 水化-温度协同作用对龙马溪组深层页岩声波传播特性及力学强度影响实验研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(1): 68–77.
- REN Jianfei, LEI Gang, LIU Xiangjun, et al. Experimental study on the effect of hydration and temperature synergism on acoustic wave propagation and mechanical strength of Longmaxi deep shales [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 68–77.
- [20] 徐中华,郑马嘉,刘忠华,等. 四川盆地南部地区龙马溪组深层页岩岩石物理特征[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1100–1110.
- XU Zhonghua, ZHENG Majia, LIU Zhonghua, et al. Petrophysical properties of deep Longmaxi Formation shales in the southern Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1100–1110.
- [21] 李帅智. 泸州地区龙马溪组深层页岩气储层特征及孔径下限研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2024.
- LI Shuaizhi. Reservoir characteristics and pore size lower limit of deep shale gas in Longmaxi Formation in Luzhou Area [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2024.
- [22] Zijsling H D. Single cutter testing—a key for pdc bit development [C]//SPE Offshore Europe Conference and Exhibition. Aberdeen: Society of Petroleum Engineers, 1987: SPE-16529-MS.
- [23] 李勇,饶攀攀,樊思成. PDC钻头单齿破岩模拟仿真参数化分析技术研究[J]. 设备管理与维修, 2023(4): 30–33.
- LI Yong, RAO Panpan, FAN Sicheng. Parametric analysis technology of single tooth rock breaking simulation for PDC bits [J]. Plant Maintenance Engineering, 2023(4): 30–33.
- [24] 杨迎新,曾恒,马捷,等. PDC钻头内镶式二级齿新技术[J]. 石油学报, 2008, 29(4): 612–614.
- YANG Yingxin, ZENG Heng, MA Jie, et al. An innovative PDC bit design with fully embedded back-up cutters [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(4): 612–614.

(编辑 王跃伟)