

特深井超高压钻井泵十字头力学性能有限元分析

刘秋玲¹, 蔡杰¹, 周龙¹, 李达¹, 康嘉杰², 黄昊翀^{1*}

(1. 中国地质大学(北京)数理学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

摘要: 针对15000 m特深井钻探对80 MPa超高压钻井泵的迫切需求,以及现有数字孪生体缺乏极端工况力学数据的瓶颈,系统开展了超高压钻井泵关键部件十字头的力学性能分析。首先,基于水力学理论计算了不同缸径(110~180 mm)下的额定泵压与排量,建立十字头运动学与受力模型以明确其载荷边界;继而基于Hertz接触理论,利用COMSOL软件对不同缸径-泵压组合工况进行有限元静力学仿真。结果表明:十字头最大应力与缸径及泵压呈正相关,且缸径变化对应力的影响显著大于泵压;应力危险点位于销孔外边缘与耳板过渡圆角处。在额定泵压和最大排量工况下最大应力分别为133.3、142.8 MPa,均远低于材料屈服强度860 MPa。研究量化了不同缸径-泵压耦合工况的应力响应曲面,填补了特深井超高压泵动力端极端工况力学数据空白,为现场缸套更换策略及十字头疲劳寿命预测提供了理论依据。

关键词: 深地钻探;科学钻探;特深井;超高压钻井泵;十字头;应力分布;有限元分析;数字孪生

中图分类号: P634.3⁺2; TE926 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)05-0074-09

Finite element analysis of crosshead mechanical performance in ultra-high pressure drilling pump for ultra-deep wells

LIU Qiuling¹, QI Jie¹, ZHOU Long¹, LI Da¹, KANG Jiajie², HUANG Haochong^{1*}

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

Abstract: To address the urgent demand for an 80 MPa ultra-high-pressure drilling pump in 15000 m ultra-deep well drilling, and to overcome the bottleneck that existing digital twins lack mechanical data under extreme operating conditions, a systematic mechanical performance analysis was conducted on the crosshead, a key component of the ultra-high-pressure drilling pump. First, based on hydraulics theory, the rated pump pressures and displacements under different liner diameters (110~180 mm) were calculated, and a kinematic and force model of the crosshead was established to define its load boundary conditions. Subsequently, based on the Hertz contact theory, finite-element static simulations were performed using COMSOL software under various combinations of liner diameter and pump pressure. The results indicate that the maximum stress on the crosshead is positively correlated with both liner diameter and pump pressure, and the effect of liner diameter variation on stress is significantly greater than that of pump pressure. The stress concentration zone is located at the transition fillet between the outer edge of the pin hole and the lug body. Under the rated-pressure and maximum-displacement conditions, the maximum stresses are 133.3 MPa and 142.8 MPa, respectively, both far below the material's yield strength of 860 MPa. This study quantifies the stress-response surface under coupled liner-diameter-pump-pressure operating conditions, fills the gap in mechanical data for the power end of ultra-high-pressure pumps for ultra-deep wells under extreme conditions, and provides a

收稿日期:2026-06-22; 修回日期:2026-08-13 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.05.008

基金项目:地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(编号:2024ZD1000800、2024ZD1000805)

第一作者:刘秋玲,女,汉族,2003年生,博士研究生,控制科学与工程专业,研究方向为深地钻机关键部件数字孪生体的有限元仿真,北京市海淀区学院路29号,liuqiuling@cugb.edu.cn。

通信作者:黄昊翀,男,汉族,1989年生,教授,博士生导师,光学工程专业,博士,主要从事深地钻机装备仿真、深度学习及太赫兹红外数字全息、成像、光谱等方面的研究工作,北京市海淀区学院路29号,hchhuang@cugb.edu.cn。

引用格式:刘秋玲,蔡杰,周龙,等.特深井超高压钻井泵十字头力学性能有限元分析[J].钻探工程,2026,53(5):74-82.

LIU Qiuling, QI Jie, ZHOU Long, et al. Finite element analysis of crosshead mechanical performance in ultra-high pressure drilling pump for ultra-deep wells[J]. Drilling Engineering, 2026,53(5):74-82.

theoretical basis for on-site cylinder liner replacement strategies and fatigue-life prediction of crossheads.

Key words: deep-earth drilling; scientific drilling; ultra-deep well; ultra-high pressure drilling pump; crosshead; stress distribution; finite element analysis; digital twin

0 引言

地球深部是维系人类生存发展的资源宝库与科学研究前沿,向地球深部进军已成为地球科学领域的重要战略方向。获取深部岩心样品对了解地球深部地壳的物质组成、结构构造及演化过程,拓展深层油气资源勘探等具有重要意义^[1]。随着钻探深度的增加,钻井装备面临更复杂的地层条件和高压、高温等极端工况的挑战^[2-3]。钻井泵作为钻井系统的“心脏”,承担着将机械能转为钻井液压力能的关键角色,而十字头是连接钻井泵动力端和液力端的关键部件,在作业过程中承受着极大的机械应力和疲劳载荷^[4]。十字头的受力状态好坏直接影响到钻井作业的连续性和安全性。为此,研究特深井钻井泵十字头的力学性能对于保障深地钻井装备的可靠性具有重要的理论与工程价值。

在信息技术高速发展的驱动下,钻井工程正加速向信息化、数字化、智能化方向演进。目前钻井泵系统中多采用布置传感器构建数字孪生体的方法来实现对关键部件的监测^[5]。然而恶劣环境下的部件传感器部署受限,数据缺失严重,虚实状态同步精度难以保证,并且现有数字孪生研究多针对常规工况,缺乏对超高温、超高压、超重载荷等极端条件的专门建模^[6-8]。通过有限元仿真方法开展多工况下钻井泵十字头的仿真分析,获取极端工况下的仿真数据,可以填补数字孪生体的数据空白^[9]。

本文进行了超高压钻井泵排量和工作压力的理论计算及十字头的运动学分析,构建了十字头的三维几何模型,基于有限元方法系统分析不同缸径-泵压组合下十字头的应力特征,填补了特深钻探配套超高压泵及其关键部件十字头力学性能数据的空白,量化了不同缸径-泵压组合下十字头进入高应力危险区间的临界条件,为超高压钻井泵十字头的疲劳分析和数字孪生体健康监测提供了参考。

1 超高压钻井泵基本参数与十字头机构运动分析

1.1 超高压钻井泵基本参数

当前,我国深井平均机械钻速达到 5.7 m/h,特

深井平均机械钻速达到 4.6 m/h^[10-12]。研究表明,采用 70 MPa 以上高压喷射系统可将钻井速度提高 1.3~6 倍,从而有效提升作业效率。然而受限于液力端密封材料耐压等级、阀体冲蚀与卡滞及动力端关键部件承载能力不足等^[13-17],目前高压喷射钻井的最高工作压力为 45 MPa,配套的高压钻井循环系统额定压力为 52 MPa^[18-19]。当钻井压力达到或接近额定压力时,钻井泵易损件的使用寿命将急剧缩短,进而严重制约机械钻速并增加钻井成本。因此,突破材料、密封及结构强度瓶颈,研制额定压力 80 MPa 的超高压钻井泵已成为亟待解决的关键技术问题^[20-22]。针对 15000 m 特深井对流量与压力的需求,考虑功率利用系数为 0.8,采用五缸直驱结构,所设计的超高压钻井泵基本参数如表 1 所示。

表 1 超高压钻井泵基本参数
Table 1 Basic parameters table for
ultra-high-pressure drilling pump

参 数 项	参数值
额定输入功率/kW	2386
冲程/mm	304.8
冲次/(次·min ⁻¹)	105
机械效率/%	93
额定压力/MPa	80
缸径范围/mm	110~180

1.2 十字头机构运动分析

钻井泵主要由动力端和液力端组成,如图 1 所示。动力端包括曲轴、连杆、十字头、导板、中心拉杆等部件,其作用是将动力源的旋转运动通过曲柄连杆机构转化为十字头的往复直线运动。液力端则包括阀箱、活塞、缸套、吸入阀、排出阀等,负责实现钻井液的吸入与排出。十字头在钻井泵中起着至关重要的作用,是连接连杆和活塞杆的关键部件,在动力端作用过程中受到周期性推力从而在导板中进行往复滑动,将连杆的驱动力传递给活塞杆,进而带动活塞在缸套内作往复运动,实现钻井液的吸入和排出^[23-25]。

建立单个十字头运动的数学模型,能够深入理

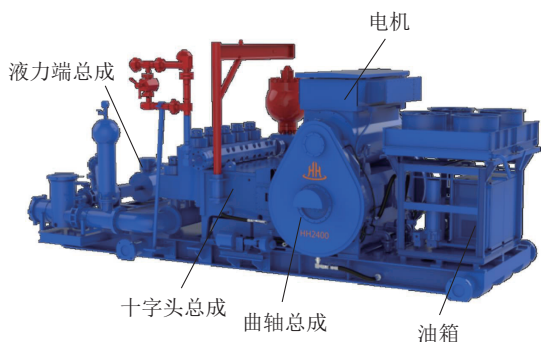


图1 2400HP 钻井泵

Fig.1 2400HP drilling pump

解其运动规律,有助于完善钻井泵动力学理论体系,为后续的理论研究提供基础数据和分析方法。对十字头的运动过程进行计算与分析,得到十字头在一个周期内运动的位移、速度、加速度,如图2所示。

通过运算可得,十字头的最大位移约为 304 mm,对应于2倍曲柄半径,符合曲柄滑块机构的运行规律;速度最大值为 1693.79 mm/s,位于曲轴转角 82° 和 278° 处;十字头的加速度曲线则是两个余弦曲线的叠加,其峰值出现在钻井泵吸液开始和排液结束时,数值为 21171.07 mm/s^2 。

2 十字头不同工况静力学计算

2.1 超高压钻井泵工作压力计算

钻井泵工作压力需克服钻井液循环系统中的压力损失,包括钻井时钻柱内的压力损失、液体在环形空间的压力损失、液体在钻头中的压力损失和地表管汇中的压力损失^[26-27]。钻柱内的压力损失是指钻井液在钻柱内部流动时,由于流体与管壁之间的黏性摩擦及流体内部的内摩擦而产生的沿程压力损失;液体在环形空间的压力损失是指钻井液在钻柱外壁与井壁之间的环形空间流动时,因流体黏性摩擦产生的沿程压力损失;钻头内的压力损失是指钻井液流经钻头喷嘴时因节流加速而产生的局部压力损失;地表管汇中的压力损失是指钻井液在地面管汇系统中流动时因摩擦阻力和局部阻力而产生的压力损失。

钻井泵理论平均排量 Q :

$$Q = m \frac{\pi D^2}{4 \times 60} S n \quad (1)$$

钻柱内钻井液的流速 v :

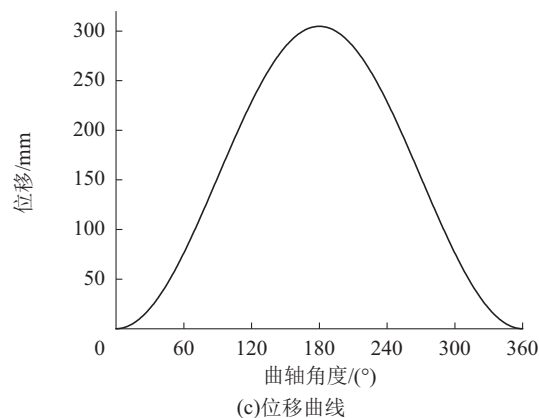
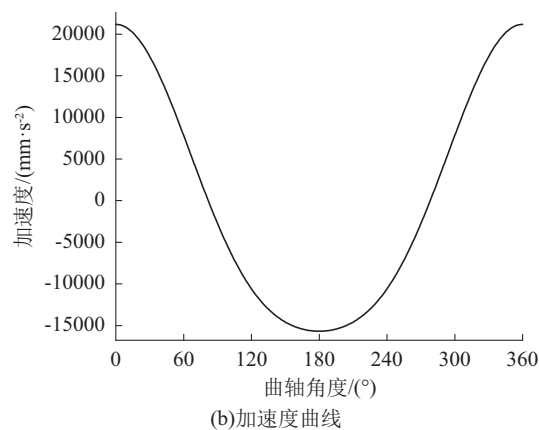
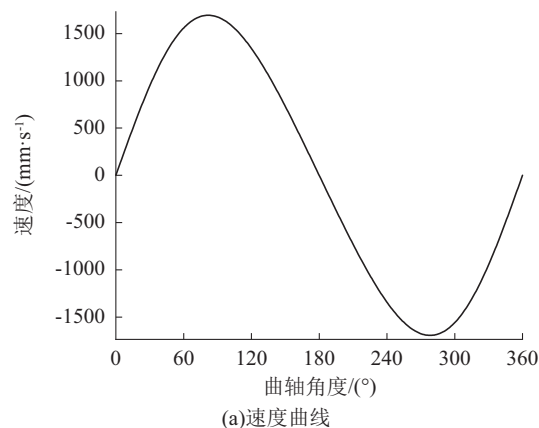


图2 十字头运动状态

Fig.2 Crosshead movement state

$$v = \frac{Q}{\pi (d/2)^2} \quad (2)$$

再计算钻柱内摩擦损失流体雷诺数 Re , 其决定流动状态和内摩擦系数 f 。

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (3)$$

$$f = \frac{0.0791}{Re^{0.25}} \quad (4)$$

钻柱内压力损失 $P_{\text{钻柱}}$:

$$P_{\text{钻柱}} = f \frac{H\rho v^2}{2d} \quad (5)$$

环空压力损失 $P_{\text{环空}}$ 可以通过水力学沿程阻力损失公式计算:

$$P_{\text{环空}} = \frac{8}{\pi^2} \lambda_{\text{环}} \frac{H\rho Q^2}{(D_{\text{井}} - D_{\text{杆}})^3 (D_{\text{井}} + D_{\text{杆}})^2} \quad (6)$$

钻头内压力损失 $P_{\text{钻头}}$:

$$P_{\text{钻头}} = \frac{\rho Q^2}{2C^2 A_0^2} \quad (7)$$

综合计算深地超高压钻井泵额定压力 P :

$$P = \frac{P_{\text{钻柱}} + P_{\text{环空}} + P_{\text{钻头}} + P_{\text{管汇}}}{\eta\gamma} \quad (8)$$

式中: m ——缸数; D ——缸径, m; S ——冲程长度, m; n ——冲次, 次/min; d ——钻柱内径, m; ρ ——钻井液密度, kg/m³; μ ——钻井液黏度, Pa·s; H ——井深, m; $\lambda_{\text{环}}$ ——环形空间阻力系数, 取 0.02; $D_{\text{井}}$ ——井眼直径, m; $D_{\text{杆}}$ ——钻柱外径, m; C ——钻头喷嘴流量系数, 取 0.98; A_0 ——喷嘴总流通面积, m²; η ——钻井效率, 取 0.8; γ ——功率利用系数, 取 0.8; $P_{\text{管汇}}$ ——地表管汇损失, 与井深无关, 本文取 4 MPa。

2.2 不同缸套组合参数计算

实际钻井作业中, 为适应不同井深、排量及泵压需求, 泥浆泵通常配备系列化缸套, 通过更换缸径实现流量与压力的匹配调节^[28-29]。然而, 缸径的变更直接导致活塞有效作用面积及活塞组件质量发生显著变化, 进而使十字头受力呈现差异^[30]。现有研究多聚焦于单一额定工况或极端高压工况下的十字头强度校核, 因此, 开展不同缸径下十字头力学性能的仿真研究, 有助于识别结构强度与疲劳寿命的薄弱环节, 明确最大应力、最大变形对应的临界缸径-泵压组合, 可为现场作业中缸径更换后的安全评估与寿命预测提供数据支撑, 对保障万米深井钻井泵动力端的长周期可靠运行具有重要的工程应用价值。

将不同缸套直径代入式(1)可获得钻井泵理论平均排量。取钻井液密度为 1200 kg/m³, 钻井液黏度为 0.045 Pa·s, 钻柱内径为 0.1086 m, 钻柱外径为 0.127 m, 喷嘴总流通面积为 2.138×10^{-4} m², 深地钻探超万米六开井眼直径为 0.216 m, 井深 15000 m, 将数据分别代入式(2)~式(8), 计算可得钻井泵不同缸径下的额定泵压。超高压钻井泵在不同缸径下的额定泵压和排量参数见表 2。

表 2 超高压钻井泵不同缸径下额定泵压和排量参数

Table 2 Rated pressure and displacement parameters of ultra-high-pressure drilling pumps for varying liner diameters

缸套直径/mm	排量/(L·s ⁻¹)	额定泵压/MPa
180	67.87	32.7
170	60.54	36.7
160	53.62	41.4
150	47.13	47.1
140	41.06	54.0
130	35.40	62.7
120	30.16	73.6
110	25.35	80.0

2.3 十字头受力分析

钻井泵动力端所受的外力主要来自液力端的钻井液压力、活塞和液缸之间的摩擦力和曲轴的输入力^[31]。钻井液压力是指在钻井过程中, 活塞受到的来自于液力端的液体压力。当活塞处于吸入状态时, 活塞受到的钻井液压强几乎为零, 而在活塞处于排出状态时, 活塞受到钻井液压强为钻井泵额定泵压。规定活塞初始时向液缸方向运动, 系统处于排液阶段, 则钻井液压强 p :

$$p = \begin{cases} P & (0 < \alpha \leq \pi) \\ 0 & (\pi < \alpha \leq 2\pi) \end{cases} \quad (9)$$

活塞力 $F_{\text{活塞}}$:

$$F_{\text{活塞}} = pA \quad (10)$$

式中: α ——曲柄旋转角度, (°); A ——活塞端面面积, m²。

摩擦力指液压缸和活塞之间的摩擦阻力。影响液压缸与活塞间产生摩擦力的主要因素有液压缸与活塞之间的过盈量、接触面的温度及接触面内渗入钻井液的量。在满负荷工况下, 通常认为活塞与液压缸之间的摩擦力为钻井液压力的 4%~8%, 本研究按照 6% 进行计算, 则摩擦力 F_f :

$$F_f = 0.06PA \quad (11)$$

活塞在工作运行中存在吸入和排出两个过程, 其中活塞与液压缸的摩擦力的方向始终与十字头运动方向相反。规定向液缸方向运动的方向为正方向, 采用一个与曲柄旋转角度相关的函数 K_α :

$$K_\alpha = \begin{cases} -1 & (0 \leq \alpha < \pi) \\ 1 & (\pi \leq \alpha < 2\pi) \end{cases} \quad (12)$$

基于以上分析,将活塞力与摩擦力进行整合,可得十字头机构受到的总液体压力 $F_{\text{液体}}$:

$$F_{\text{液体}} = F_{\text{活塞}} + K_a F_f = (1 + 0.06K_a) PA \quad (13)$$

研究不同缸径-泵压下排液过程中的死点位置,此时曲柄旋转角度为 0° ,连杆对十字头的力等于十字头受到的总液体压力。如图3所示,液体压力受到泵压和缸径的共同影响,且缸径越大,液体压力随泵压的增长速率越快。因此,当实际工况要求提高泵压时,应及时更换较小直径的缸套,以减小活塞面积,从而在保证排量的前提下有效降低液体压力,避免十字头、连杆及曲轴等关键传动部件承受过大的载荷,保障泵组运行的可靠性与耐久性。

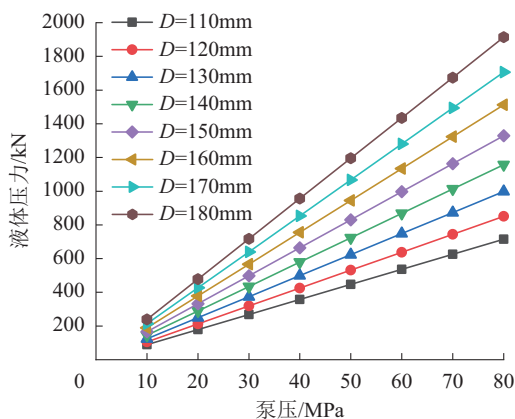


图3 不同缸径-泵压下液体压力

Fig.3 Piston hydraulic force under different liner diameters and pump pressures

选取了四组不同缸径-泵压下的工况:缸径110 mm、泵压80 MPa,即小缸径超高压工况;缸径110 mm、泵压52 MPa,即小缸径高压工况;缸径150 mm、泵压32 MPa,即较大缸径大流量工况;缸径180 mm、泵压32 MPa,即大缸径大流量工况。

表3为四种工况下十字头受到的液体压力。对比工况1和4,由于液体压力与泵压和缸径的平方成正比,因此液体压力对泵压的敏感性高。可见,当泵压趋近于额定值时,大缸径对应的液体压力显著高于小缸径工况。

3 有限元分析

3.1 有限元模型建立

有限元仿真分析可以快速预测十字头多工况力学性能,为钻井泵数字孪生体极端工况数据缺失

表3 不同缸径组合下的液体压力

Table 3 Hydraulic force at different liner diameters

工况序号	缸径/mm	泵压/MPa	液体压力/N
1	110	80	714649.50
2	110	52	464522.17
3	150	32	531557.48
4	180	32	765442.77

问题提供解决方法,并支撑生命周期数据库构建。基于SolidWorks建立超高压钻井泵十字头的三维模型,对圆角、倒角部位进行简化以提高计算效率。将模型导入COMSOL Multiphysics软件中,定义十字头的材料属性^[32],其主要参数见表4。采用四面体网格对十字头进行网格划分,设置最小网格单元尺寸为4 mm,网格数量为87121个,如图4所示。

表4 十字头基本尺寸及材料参数

Table 4 Geometric dimensions and material properties of the crosshead

参数项	参数值
长度/mm	424
高度/mm	301
宽度/mm	298
销孔直径/mm	139.7
销孔宽度/mm	50.4
材料	ZG35CrMo
弹性模量/MPa	206000
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7850
泊松比	0.3
屈服强度/MPa	860

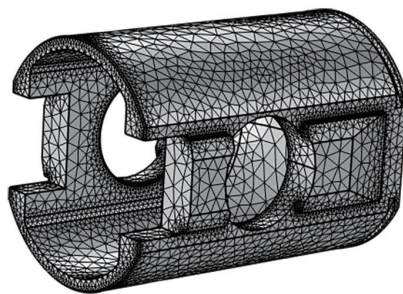


图4 十字头网格划分

Fig.4 Mesh generation of crosshead

根据十字头的工作情况设置约束,将十字头底面与导轨接触部分设置位移约束,限制其在十字头

竖直方向和径向方向的位移;在十字头与活塞杆相连的端面约束十字头轴向的位移,模拟活塞杆对十字头的作用。十字头与十字头销之间存在接触应力^[33-35],为了便于分析,对模型作如下假设:(1)十字头为线弹性材料,其最大变形量小于结构尺寸的5%,满足小变形假设;(2)接触表面的力学边界条件和几何边界条件均可用节点力和节点位移表示;(3)不考虑摩擦力的影响。

根据 Hertz 接触理论,当十字头销与销孔之间存在微小间隙且受径向载荷时,接触压力沿圆周方向呈非均匀分布。针对有限宽度孔径油膜的应力分布,忽略油孔处压力峰值突变的影响,合理的面力分布规律为:载荷沿十字头销孔圆周方向 120° 范围内按余弦曲线分布,将连杆力按此规律施加在十字头销孔面上,模拟十字头销对销孔的接触作用^[34]。

3.2 有限元分析结果

基于三维模型,按上述加载条件,对十字头分别施加不同缸径-泵压工况下的载荷,探究十字头的应力分布,揭示缸径与泵压对十字头强度的耦合影响规律。图 5 为最大应力随缸径与泵压变化的三维响应曲面。由图可知,最大应力与缸径及泵压均呈正相关,在泵压 80 MPa、缸径 180 mm 的工况组合下达到峰值 356 MPa,而在泵压 10 MPa、缸径 110 mm 工况下最大应力降至 16 MPa。曲面整体呈现单调递增趋势,表明泵压与缸径的增大均会显著抬高结构应力水平。以泵压 50 MPa、缸径 150 mm 为基准工况,分别增加缸径和泵压 20%,结构最大应力增幅分别为 44.10% 和 20.04%;当二者同时增加 20% 时,应力增幅达 72.98%。结果表明,缸径变化对应力的影响显著大于泵压,缸径增大导致的液体压力增幅是应力升高的主要驱动因素。此外,同时增加的耦合增幅大于单独变化,表明两因素之间存在正向协同效应。

选取四种工况下的有限元分析结果,得到十字头的应力分布和位移分布。当缸径 110 mm、泵压 80 MPa 时,十字头应力分布如图 6(a) 所示,最大应力点位于销孔外边缘与耳板本体的过渡圆角处,其值为 133.3 MPa;当缸径 110 mm、泵压 52 MPa 时,应力分布如图 6(b) 所示,最大应力点位于销孔外边缘与耳板本体的过渡圆角处,其值为 86.6 MPa;当缸径 150 mm、泵压 32 MPa 时,应力分布如图 6(c) 所示,应力最大值为 99.1 MPa;当缸径 180 mm、泵

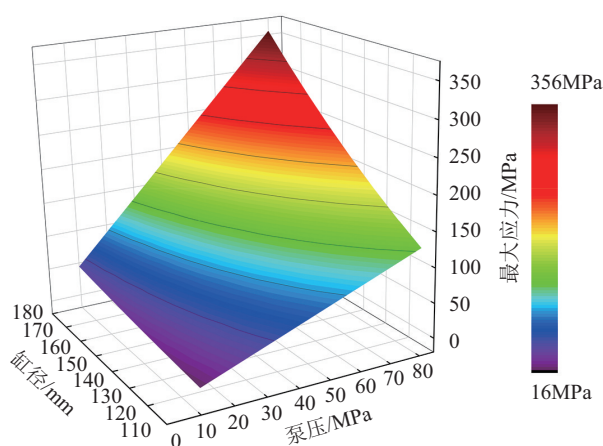


图 5 十字头最大应力三维响应曲面图

Fig.5 3D response surface of maximum stress on crosshead

压 32 MPa 时,应力分布如图 6(d) 所示,应力最大值为 142.8 MPa。四种工况下的最大应力值远小于材料的屈服强度 860 MPa,均满足安全系数不小于 2.0 的设计准则,结构静强度裕度充足。

四种工况下十字头位移分布如图 7 所示,变形区域与受力情况吻合,主要出现在销孔前侧和十字头尾端。位移值在 0.03~0.05 mm 范围内,变形量小于结构尺寸的 5%,表明结构刚度充足。

基于三维有限元数值模拟,构建了十字头最大应力随缸径与泵压耦合变化的三维响应曲面,并呈现了四种代表性工况下十字头应力场与位移场的分布特征。结果表明,超高压钻井泵十字头的应力危险区域与常规钻井泵十字头基本一致,均位于销孔及活塞连接端面处,但其应力数值较常规钻井泵有明显提升。

4 结论

本研究对深地超高压钻井泵的工作压力进行计算,并在不同缸径-泵压组合下对钻井泵关键部件十字头进行仿真分析,为深地钻井泵数字孪生体的构建提供数据支持,得到以下主要结论。

(1)超高压钻井泵突破现有钻井泵的额定压力,针对 15000 m 钻探深度,所需最大工作压力为 80 MPa,搭配直径 110 mm 的缸套,并得到不同缸套直径下钻井泵的排量和额定泵压。

(2)通过三维有限元仿真分析,得到不同缸径-泵压组合下十字头的最大应力,并展示了四种代表

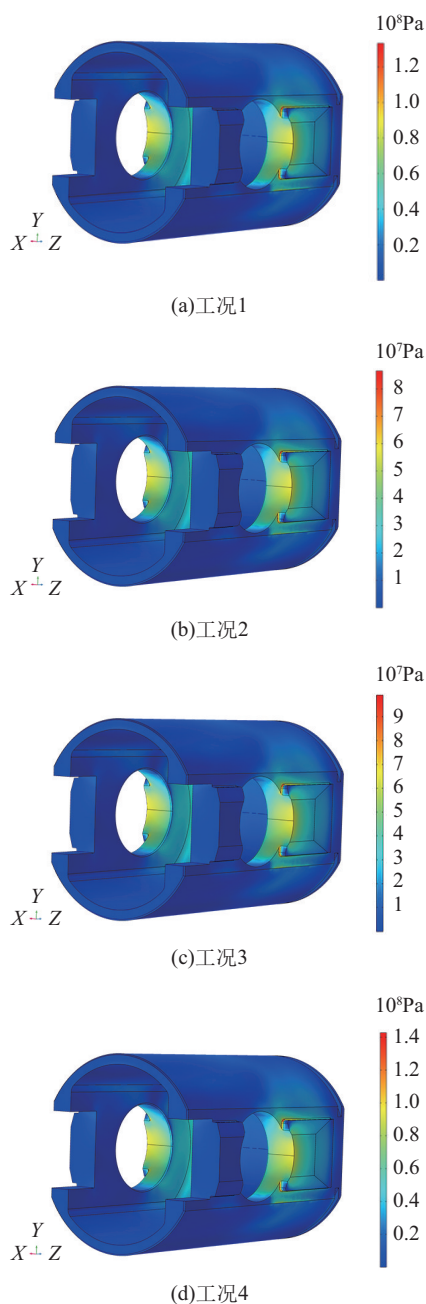


图6 十字头应力分布云图

Fig.6 Stress cloud diagram of crosshead

性工况下十字头的应力和位移分布云图。在最高泵压和最大排量下十字头的最大应力分别为133.3、142.8 MPa,均小于十字头材料的屈服强度。最大泵压工况下十字头的安全系数约为6.45,具有高可靠性,但也说明材料设置有进一步优化减重的空间。应力最大点位于销孔外边缘与耳板本体的过渡圆角处,后续可对该结构进行优化设计,避免应力集中。

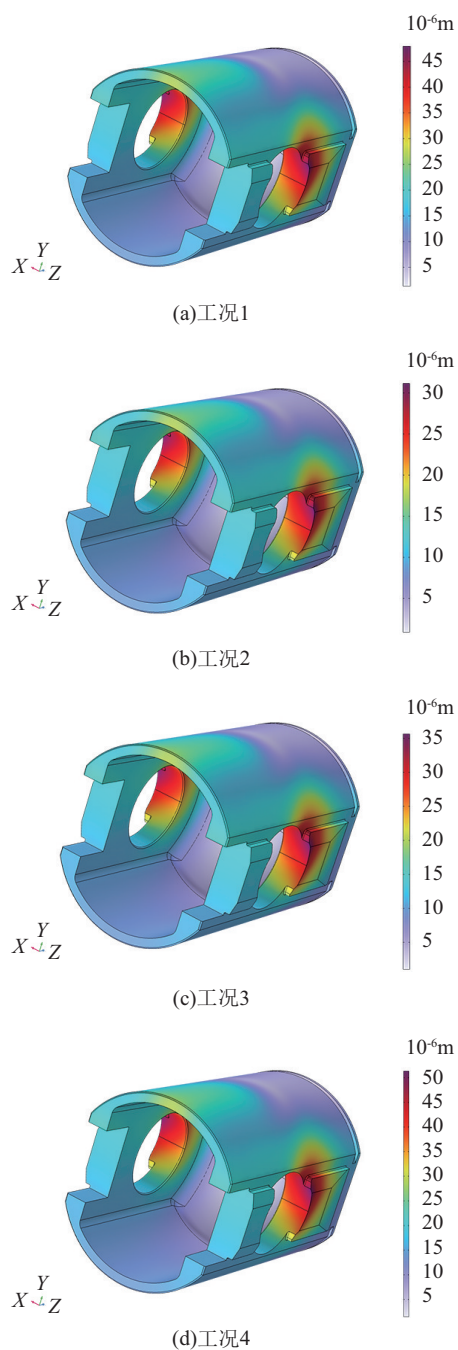


图7 十字头位移分布云图

Fig.7 Displacement cloud diagram of crosshead

(3)通过十字头的仿真分析,得到十字头的应力水平不仅取决于泵压,还与缸径呈正相关,大缸径、高泵压组合极易导致十字头进入高应力、短寿命的危险工作区间。当监测泵压接近该缸径下的额定泵压时,应及时更换缸套组合,在保障排量的同时,将压力控制在十字头结构的可靠承载范围内。

参考文献(References):

- [1] 岳文,梁健,张恒春,等.特深井大陆科学钻探绳索取心技术挑战与展望[J].钻探工程,2026,53(4):1-13.
YUE Wen, LIANG Jian, ZHANG Hengchun, et al. Challenges and prospects of wireline coring technology for ultra-deep continental scientific drilling[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(4): 1-13.
- [2] 张正,冉恒谦,张毅,等.特深科学钻探装备技术现状与发展建议[J].钻探工程,2024,51(4):14-22.
ZHANG Zheng, RAN Hengqian, ZHANG Yi, et al. Technical status and development suggestions of extra-deep scientific drilling equipment[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4): 14-22.
- [3] 尹宇森,孙友宏,徐绍涛,等.超万米特深井高温高压环境钻进关键难点[J].钻探工程,2026,53(4):14-23.
YIN Yusen, SUN Youhong, XU Shaotao, et al. Key challenges in drilling under high-temperature and high-pressure environments in ultra-deep wells exceeding 10000 m[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(4): 14-23.
- [4] 郭茂磊,何建春,刘敏,等.钻井泵十字头导板修复工艺研究[J].设备管理与维修,2018(15):56-57.
GUO Maolei, HE Jianchun, LIU Min, et al. Research on repair technology of crosshead guide plate for drilling pump[J]. Plant Maintenance Engineering, 2018(15): 56-57.
- [5] 韩春鹏,徐学武.泥浆泵在线监测系统的设计与应用研究[J].南方农机,2026,57(1):131-135.
HAN Chunpeng, XU Xuewu. Design and application of an on-line monitoring system for mud pumps[J]. South Agricultural Machinery, 2026, 57(1): 131-135.
- [6] 王钧泽,李黔,尹虎.基于数字孪生技术的钻井复杂风险智能预警系统架构[J].石油钻探技术,2024,52(5):154-162.
WANG Junze, LI Qian, YIN Hu. Architecture of intelligent early warning system for complex drilling risks based on digital twin technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(5): 154-162.
- [7] 王博,李显义,米凯夫,等.数字孪生驱动的深地钻井顶驱智能运维关键技术[J].石油机械,2025,53(6):1-11,21.
WANG Bo, LI Xianyi, MI Kaifu, et al. Key technologies for intelligent operation and maintenance of deep drilling top drive powered by digital twin[J]. China Petroleum Machinery, 2025, 53(6): 1-11, 21.
- [8] 韩啸,田宸宇,张涛,等.超高压大排量五缸泵故障诊断系统研究[J].机电技术,2023(2):13-15,19.
HAN Xiao, TIAN Chenyu, ZHANG Tao, et al. Research on fault diagnosis system of ultra-high-pressure and large displacement five-cylinder pump[J]. Mechanical & Electrical Technology, 2023(2): 13-15, 19.
- [9] 杨欣,樊振刚,冉琰,等.基于元动作理论的驱传系统数字孪生模型构建[J].计算机集成制造系统,2023,29(6):1795-1810.
YANG Xin, FAN Zhengang, RAN Yan, et al. Construction of digital twin model for transmission system based on meta-action theory[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(6): 1795-1810.
- [10] 陈力力,李文哲,郭建华,等.万米特深井大尺寸井眼钻头优选[J].石油勘探与开发,2025,52(3):715-723.
CHEN Lili, LI Wenzhe, GUO Jianhua, et al. Optimal bit selection for large-diameter wellbore drilling in an ultra-deep well[J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(3): 715-723.
- [11] 蔡明杰,罗鑫,陈力力,等.万米深井SDCK1井超大尺寸井眼钻井技术[J].石油钻探技术,2024,52(2):87-92.
CAI Mingjie, LUO Xin, CHEN Lili, et al. Ultra-large borehole drilling technologies of 10000-meter deep well SDCK1[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(2): 87-92.
- [12] 高航献,李真祥,胡彦峰.元深1井超深井钻井提速关键技术[J].石油钻探技术,2024,52(3):28-33.
GAO Hangxian, LI Zhenxiang, HU Yanfeng. Key drilling technologies for increasing ROP in ultra-deep Well Yuanshen 1[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(3): 28-33.
- [13] 侯勇俊,都磊,张芳芳,等.钻井泵活塞缸套密封系统密封性能流-固耦合分析[J].润滑与密封,2022,47(9):17-23.
HOU Yongjun, DU Lei, ZHANG Fangfang, et al. Fluid-solid coupling analysis of sealing performance of drilling pump piston-liner sealing system[J]. Lubrication Engineering, 2022, 47(9): 17-23.
- [14] 陈艳,潘志杰,张利贤.基于三维建模和有限元分析的泥浆泵曲轴疲劳寿命评估[J].机械设计与制造工程,2022,51(9):7-11.
CHEN Yan, PAN Zhijie, ZHANG Lixian. Fatigue life evaluation of mud pump crankshaft based on three-dimensional modeling and finite element analysis[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2022, 51(9): 7-11.
- [15] 徐永恒,杨维庆,杨灏东,等.钻井泥浆泵活塞失效原因及提高寿命措施[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(9):43-46.
XU Yongheng, YANG Weiqing, YANG Haodong, et al. Failure analysis and life improvement of piston in drilling mud pump[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2025, 45(9): 43-46.
- [16] 蒋宇鸿,张增年,李智,等.钻井泵凡尔阀座裂纹安全性及扩展分析[J].兵器材料科学与工程,2025,48(4):136-141,146.
JIANG Yuhong, ZHANG Zengnian, LI Zhi, et al. Safety and expansion analysis of cracks in drilling pump valve seat[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2025, 48(4): 136-141, 146.
- [17] 赵宇晗,曹金刚,龙涛,等.五缸泵组动力传动系统传动性能关键影响因素研究[J].化工机械,2026,53(2):249-257,386.
ZHAO Yuhan, CAO Jingang, LONG Tao, et al. Research on the key factor influencing transmission performance of power transmission system of five-cylinder pump unit[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2026, 53(2): 249-257, 386.
- [18] 魏旭,张增年,张洪,等.川渝地区超深井/特深井大功率钻井泵应用与选型探讨[J].中国设备工程,2026(9):102-104.
WEI Xu, ZHANG Zengnian, ZHANG Hong, et al. Research on application and type selection of high-power drilling pumps for ultra-deep and extra-deep wells in Sichuan-Chongqing area[J]. China Plant Engineering, 2026(9): 102-104.
- [19] 孙金声,刘伟,王庆,等.万米超深层油气钻完井关键技术面临挑战与发展展望[J].钻采工艺,2024,47(2):1-9.
SUN Jinsheng, LIU Wei, WANG Qing, et al. Challenges and

- development prospects of oil and gas drilling and completion in myriametric deep formation in China[J]. Drilling & Production Technology, 2024,47(2):1-9.
- [20] 李明星,卢春阳,柴喜元,等.超深孔地质岩心钻探配套泥浆泵的研制[J].地质装备,2026,27(1):10-15.
- LI Mingxing, LU Chunyang, CHAI Xiyuan, et al. Development of mud pump for ultra-deep hole geological core drilling [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2026, 27(1): 10-15.
- [21] 赵珑,张天临,牛玺辉,等.LS-2600五缸钻并泵设计与应用[J].机械研究与应用,2024,37(1):98-101.
- ZHAO Long, ZHANG Tianlin, NIU Xihui, et al. Design and application of LS-2600 five-cylinder drilling pump[J]. Mechanical Research & Application, 2024,37(1):98-101.
- [22] 余文静,孙晓微,陆学斌,等.应用工况参数分析的六缸泥浆泵曲轴结构优化设计[J].中国机械,2026(1):48-52.
- YU Wenjing, SUN Xiaowei, LU Xuebin, et al. Structural optimization design of crankshaft for six-cylinder mud pump based on operating parameter analysis[J]. Machine China, 2026(1): 48-52.
- [23] 李继霞.3NB1300C钻井泵十字头应用研究[D].兰州:兰州理工大学,2012.
- LI Jixia. Applied research on crosshead of the 3NB1300C drilling pump [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012.
- [24] 杨筱芳.泥浆泵十字头加工工艺及专用夹具研究[J].工程机械文摘,2025(6):35-38.
- YANG Xiaofang. Research on machining process and special fixture for mud pump crosshead [J]. Construction Machinery Digest, 2025(6):35-38.
- [25] 庞仁山.油气田压裂泵十字头组件热-机械耦合特性研究[J].石油和化工设备,2025,28(9):78-85.
- PANG Renshan. Thermo-mechanical coupling analysis of crosshead assemblies in oilfield fracturing pumps [J]. Petro-Chemical Equipment, 2025,28(9):78-85.
- [26] 郭晓乐,龙芝辉,齐成伟.连续管钻小井眼水平井水力学分析[J].科学技术与工程,2013,13(26):7781-7784,7797.
- GUO Xiaole, LONG Zhihui, QI Chengwei. Hydraulics analysis of horizontal slimhole using coiled tube drilling method[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(26): 7781-7784,7797.
- [27] 嵇彭年.钻井机械[M].北京:石油工业出版社,1982.
- JI Pengnian. Drilling Machinery[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1982.
- [28] 孙龙欢,白儒林,孙鹏,等.五缸单作用钻井泵冲程与冲次合理匹配[J].机电工程技术,2023,52(2):240-243,264.
- SUN Longhuan, BAI Rulin, SUN Peng, et al. Reasonable matching of stroke and stroke times of five-cylinder single-acting drilling pump [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2023,52(2):240-243,264.
- [29] 张政,许智博,王国荣,等.深水双层管双梯度钻井流量调节与井筒压力控制研究[J].中国海上油气,2026,38(1):195-208.
- ZHANG Zheng, XU Zhibo, WANG Guorong, et al. Flow rate regulation and wellbore pressure control in deepwater double-layer pipe dual-gradient drilling [J]. China Offshore Oil and Gas, 2026,38(1):195-208.
- [30] 侯勇俊,何浩,刘傲,等.基于曲柄摇杆机构的长冲程往复泵仿真与性能分析[J].机械设计,2026,43(3):47-54.
- HOU Yongjun, HE Hao, LIU Ao, et al. Simulation and performance analysis of long-stroke reciprocating pump based on crank-rocker mechanism [J]. Journal of Machine Design, 2026, 43(3):47-54.
- [31] 曹壮壮.面向再制造的泥浆泵动力端曲轴剩余寿命预测及可行性分析[D].西安:长安大学,2023.
- CAO Zhuangzhuang. Remaining life prediction and feasibility analysis of power end crankshaft of mud pump for remanufacturing [D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.
- [32] 武江瑜.新型3000HP五缸钻井泵动力端设计与分析[D].成都:西南石油大学,2017.
- WU Jiangyu. Design and analysis of new 3000HP five-cylinder drilling pump power end [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [33] 武伟.基于ANSYS的三缸单作用隔膜泵动力端十字头的强度分析[J].工业技术创新,2014,1(3):279-281.
- WU Wei. Strength analysis of three cylinders-single action diaphragm pump cross head in power end based on ANSYS [J]. Industrial Technology Innovation, 2014,1(3):279-281.
- [34] 黄天成,袁新梅,周思柱,等.柱塞泵十字头有限元疲劳强度分析[J].煤矿机械,2009,30(2):98-100.
- HUANG Tiancheng, YUAN Xinmei, ZHOU Sizhu, et al. Fatigue strength analysis of crosshead of plunger pump using FEM [J]. Coal Mine Machinery, 2009,30(2):98-100.
- [35] 郝子轩,何志伟,高敏,等.有限元分析在十字头优化设计中的应用[J].煤矿机械,2017,38(3):158-160.
- HAO Zixuan, HE Zhiwei, GAO Min, et al. Finite element analysis in application of crosshead optimization design [J]. Coal Mine Machinery, 2017,38(3):158-160.

(编辑 王跃伟)