

基于3D有限元仿真的钻杆接头 应力分析与集中系数研究

张旺, 何胜煜, 卜长根*

(中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

摘要: 钻井工程中, 钻杆接头螺纹连接处失效占比高达86%, 是钻柱失效的主要风险部位。为深入分析接头应力分布及集中特性, 本研究基于三维有限元仿真, 对API标准单台肩与双台肩钻杆接头在轴向和扭转载荷下的应力进行了对比分析, 并针对NC50型接头计算了轴向与扭转应力集中系数。研究发现: 单台肩螺纹最大应力集中于螺纹啮合部第一圈齿根处; 双台肩螺纹的最大轴向应力和剪切应力显著低于单台肩螺纹(分别约24%和27.3%), 尤其在高扭矩下性能优势更明显; NC50接头的轴向应力集中系数为4.21, 扭转应力集中系数为3.73。本研究成果为钻杆接头性能优化设计、钻井系统应力精确计算及疲劳寿命预测提供了重要依据。

关键词: 钻柱失效; 螺纹连接; 应力集中系数; 疲劳失效; 有限元分析; 结构优化

中图分类号: TE921⁺.2; P634.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)01-0052-07

Stress analysis and concentration coefficient of drill pipe joints based on 3D finite element simulation

ZHANG Wang, HE Shengyu, BU Changgen*

(School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In drilling engineering, failures at the threaded connections of drill pipe joints account for up to 86%, making them the primary risk area for drill string failure. To conduct an in-depth analysis of joint stress distribution and concentration characteristics, this study, based on 3D finite element simulation, performed a comparative analysis of the stress in API standard single-shoulder and double-shoulder drill string joints under axial and torsional loads. Furthermore, the axial and torsional stress concentration coefficients for the NC50-type joint were calculated. The findings indicate that: the maximum stress in single-shoulder threads is concentrated at the root of the first thread in the thread engagement area; the maximum axial and shear stresses in double-shoulder threads are significantly lower than those in single-shoulder threads, with reductions of approximately 24% and 27.3%, respectively, exhibiting a more pronounced performance advantage, especially under high torque; the axial stress concentration coefficient for the NC50 joint is 4.21, and the torsional stress concentration coefficient is 3.73. The outcomes of this research provide a significant basis for the performance optimization design of drill pipe joints, precise stress calculation of the drilling system, and fatigue life prediction.

Key words: drill string failure; threaded connection; stress concentration coefficient; fatigue failure; finite element analysis; structural optimization

收稿日期: 2025-06-18; 修回日期: 2025-08-15 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.01.008

基金项目: 国家自然科学基金项目“潜孔锤/声波钻柱动力学关键问题研究”(编号: 51775523)

第一作者: 张旺, 男, 汉族, 1996年生, 硕士研究生, 机械工程专业, 研究方向为井下钻柱多轴疲劳损伤, 北京市海淀区学院路29号, 2102220002@email.cugb.edu.cn。

通信作者: 卜长根, 男, 汉族, 1963年生, 教授, 博士生导师, 地质工程专业, 博士, 主要从事地质工程、振动和疲劳损伤理论研究工作, 北京市海淀区学院路29号, bucg@cugb.edu.cn。

引用格式: 张旺, 何胜煜, 卜长根. 基于3D有限元仿真的钻杆接头应力分析与集中系数研究[J]. 钻探工程, 2026, 53(1): 52-58.

ZHANG Wang, HE Shengyu, BU Changgen. Stress analysis and concentration coefficient of drill pipe joints based on 3D finite element simulation[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(1): 52-58.

0 引言

在地质钻探和石油钻井中,钻柱受到拉压、弯曲和扭转作用,接头螺纹连接处存在应力集中,易发生断裂事故,增加钻井成本^[1-3]。据统计,国内高达86%的钻柱失效事故发生在螺纹连接处,其中大部分由螺纹断裂失效造成^[4]。蔡明杰等^[5]对某特深井钻井现场254根钻柱进行了检测,不合格钻柱169根,其中内螺纹检测不合格92根,外螺纹检测不合格83根,分别占不合格钻柱的54.4%和49.1%(包含重复统计)。图1为江西某钻井现场钻杆接头螺纹断裂图。



图1 钻杆接头断裂

Fig.1 Drill pipe joint fracture

为了深入分析接头部位的受力情况,学者们采用有限元仿真技术对钻杆接头进行了应力分析^[6]。张俞^[7]基于电测法搭建钻柱应力测试实验平台,对钻杆接头进行轴向加载实验,将螺纹处应力分布实验数据与仿真结果对比,发现二者应力分布趋势一致且各齿应力值(除螺纹起止位置外)误差较小,具有较好的一致性,表明通过仿真可有效减少实验次数,降低实验成本。陈松林等^[8]和闫鹏^[9]采用轴对称单元对钻杆接头进行二维有限元分析,发现接头螺纹第一牙处应力值最高,通过切削公接头螺纹大端第一牙并设计应力槽,有效降低了螺纹处的应力集中,公接头螺纹第一牙根部应力下降28.3%。崔丽芬等^[10]忽略螺纹小螺旋升角影响,同样采用二维轴对称模型,分析了MK-150钻杆接头螺纹应力分布,提出了双台肩螺纹、加工应力减轻槽和降低最后啮合齿高度3种优化方案,将螺纹最大应力分别降低了15.3%、8.52%和11%。焦文鸿等^[11]调整公螺纹锥度使其小于母螺纹锥度,显著减少了前几牙螺纹的应力集中,从而延长使用寿命。但这些研究大多基于二维简化模型,只适用于轴向拉压载荷,

难以分析扭转载荷下的应力分布。

祝效华等^[12]设计了高抗扭双台肩钻杆接头,通过三维仿真优化结构参数,显著提高了接头的抗扭性能。陈峰等^[13-15]针对API标准接头扭矩承载能力不足的问题,建立了三维双台肩螺纹模型,在单载作用下,分析了副台肩间隙对螺纹承载能力的影响。陈波等^[4]将台肩形状改为梯形,建立三维有限元模型,分析其不同载荷下的性能表现,结果表明改进后的接头可显著降低失效风险。尹浩等^[16]对国内外高性能石油钻杆接头进行调研,研究表明,除了双台肩钻杆接头能够显著提高钻柱抗扭能力外,还有三台肩螺纹及三段不等螺距接头均能显著提高接头性能。

目前学者们针对钻杆接头的研究,多是通过结构设计来提高接头性能,而针对钻杆接头应力集中系数的研究较少^[17]。在钻柱的疲劳寿命计算中,需考虑应力集中系数的影响。Bu等^[18]基于Palmgren-Miner线性累积损伤法则,建立了变长驻波共振累积疲劳损伤理论,研究了钻杆接头螺纹连接处的轴向应力集中系数对疲劳损伤的影响。He等^[19]分析了材料常数和疲劳极限对驻波共振钻柱疲劳损伤的影响,并指出高频激励下选择疲劳极限高的材料、低频激励选择材料常数大的材料可降低钻柱疲劳损伤。Tafreshi等^[20]在不考虑螺纹螺旋升角的情况下对钻杆接头进行了有限元仿真,研究表明在多轴载荷下,螺纹根部的应力集中系数在轴向和扭转方向上具有显著差异,需分别计算。Zou等^[21]指出在计算钻柱多轴疲劳寿命时,需要考虑不同方向应力集中系数大小,对接头焊缝部位进行了轴向与扭转应力分析,计算钻柱焊缝处寿命,但文中未给出螺纹处集中系数大小。因此,针对钻柱多轴应力状态下,各应力集中系数的研究尚不充分。

综上所述,不同的受力模型及螺纹参数调整均可影响接头螺纹的应力分布。尽管二维简化模型在某些情况下降低了计算复杂度,但其在复杂多轴载荷分析中的适用性有限。据此,本文建立了钻杆接头的三维模型,结合ANSYS Workbench有限元分析软件,分析比较API标准单台肩螺纹与优化的双台肩螺纹应力分布特性,并计算了特定钻杆接头轴向和扭转方向的应力集中系数,为接头部位的应力计算与钻柱疲劳分析提供了重要参考。

1 钻杆接头建模与边界设置

钻柱主要由钻铤、钻杆、钻具扶正器、螺杆钻具等组成,其间连接依赖于螺纹。目前,钻杆接头的设计、生产、检验主要遵循 API SPEC 7 标准^[22]。数字型钻杆接头螺纹(Numbered Connection, NC)是 API 推荐优先使用的螺纹类型,其适配性强,应用范围十分广泛。本节建模采用 NC50 型数字型螺纹,其主要参数见表 1^[23]。

表 1 钻杆接头基本尺寸及材料参数
Table 1 Basic dimensions and material parameters of drill pipe joints

参 数	参数值
接头外径/mm	168.3
公接头内径/mm	68.8
母接头内径/mm	88.9
螺纹连接类型	NC50
螺纹牙型	V-0.038R
外螺纹大端大径/mm	133.35
外螺纹小端大径/mm	114.3
基面中径/mm	128.059
钻杆外径/mm	114.3
钻杆内径/mm	92.46
外螺纹锥部长度/mm	114.3
内螺纹锥部有效长度/mm	117.48
内螺纹锥部长度/mm	130.18
扩锥孔大端直径/mm	134.94
内螺纹大端小径/mm	128.07
接头材料	37CrMnMoA
弹性模量/GPa	206
泊松比	0.3

在轴向的拉伸载荷作用下二维模型能够较为合理地预测接头的应力分布,但由于二维有限元分析忽略螺纹升角,无法真实反映扭矩对接头应力的影响^[24]。本研究基于表 1 参数,采用 SolidWorks 软件进行三维建模,建模过程详细考虑了螺纹的锥度特性、牙型等关键参数,确保模型的结构与实际一致,并对单台肩螺纹进行改进,在此模型的基础上增加了副台肩,建立了双台肩螺纹模型。

将建立的三维模型导入 Workbench,在内螺纹的端面设置固定支撑,在外螺纹的端面添加轴向均布载荷 F 和扭转均布载荷 T ,单、双台肩螺纹模型和边界设置如图 2 所示。

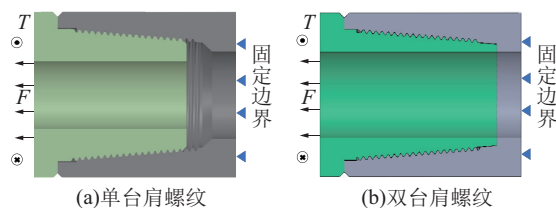


图 2 钻杆接头边界设置示意

Fig.2 Schematic diagram of boundary settings for drill pipe joints

螺纹配合面(包括螺纹之间和台肩面之间)的摩擦系数取 0.08^[13,25-26]。为了分析钻杆接头在受到载荷作用下的实际应力分布情况,模拟之前需要使螺纹面紧密配合,承载面间无间隙。本研究在建模时内外螺纹台肩重合,螺纹面采用螺纹配合,使钻柱螺纹承载面紧密配合,实现力的传递。由于螺纹区域几何结构复杂,在进行网格划分时需对局部网格进行细化处理。Shu 等^[27]在接头的应力仿真中对局部精细网格的独立性进行验证,选取了 2、1.5、1 mm 三种细化网格,发现用 1.5、1 mm 网格,螺纹啮合时齿的应力差别很小,表明 1.5 mm 的细化网格已满足精度要求。考虑到螺纹接触面结构的复杂性,为提高计算精度并精确捕捉螺纹处的应力集中现象,使仿真结果更加精准,本文将螺纹牙部接触面局部网格细化设置为 1 mm。最终,单台肩螺纹模型共生成了 4086115 个节点,2795451 个单元;双台肩螺纹模型共生成了 4263382 个节点,2901647 个单元。

2 结果分析

2.1 单、双台肩螺纹应力分析

基于三维模型,按图 2 所示加载条件,对 API 标准单台肩螺纹与双台肩螺纹分别单独加载轴向载荷、扭转载荷以及拉扭耦合载荷,探究钻杆接头的应力分布情况。施加 50 kN 的轴向拉伸载荷时,单、双台肩螺纹沿着轴向的应力分布如图 3(a)、(b)所示;施加 2 kN·m 的扭转载荷时,单、双台肩螺纹受到的最大剪切应力分布如图 3(c)、(d)所示;同时施加轴向 50 kN 与扭转 2 kN·m 的耦合载荷时,单、双台肩螺纹部位所受到的等效应力云图如图 3(e)、(f)所示。

通过对比单台肩螺纹在不同类型载荷下应力云图可以发现,无论是施加轴向载荷、扭转载荷还是拉扭耦合载荷,均在外螺纹台肩附近第一圈处产

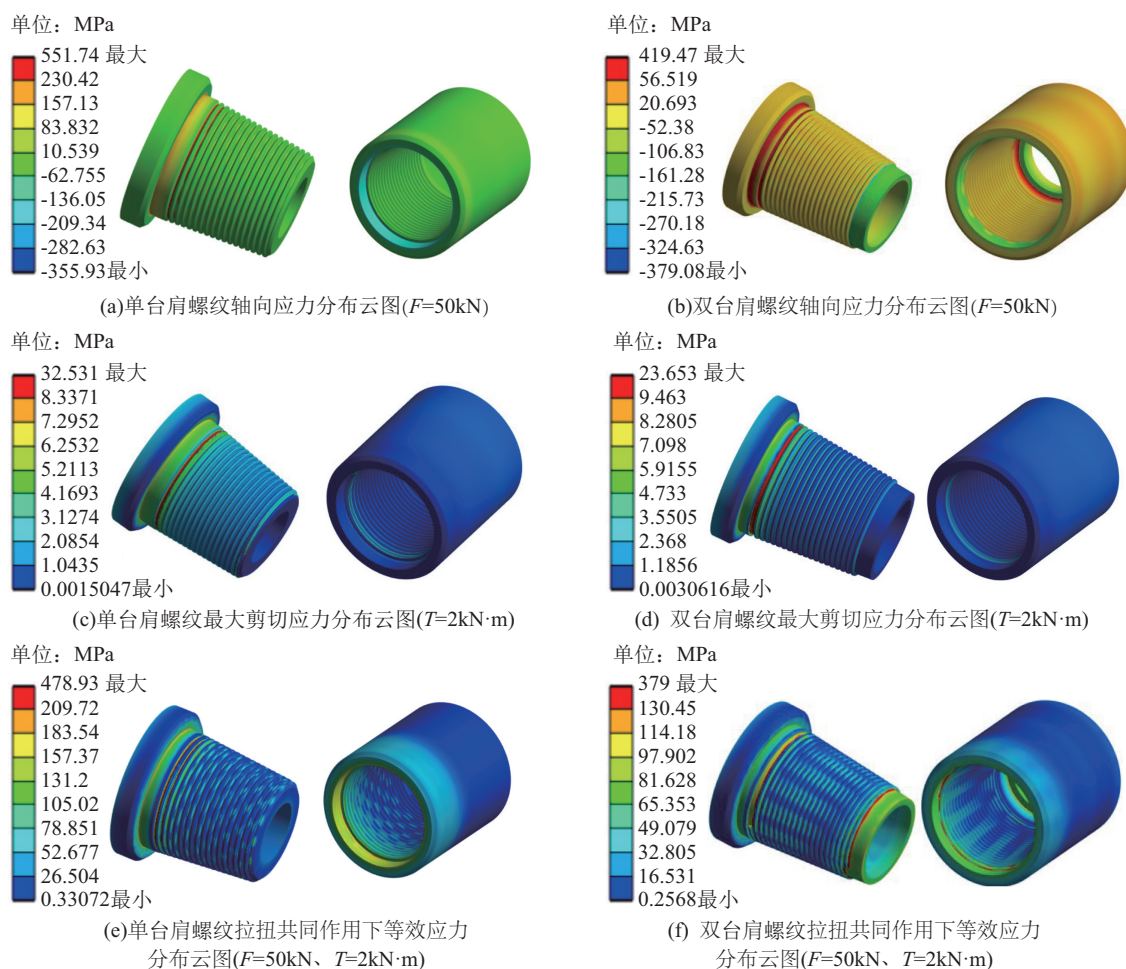


图3 不同载荷下螺纹应力分布云图

Fig.3 Stress distribution cloud diagrams of threaded under different loads

生明显应力集中现象,这与螺纹的几何特性和载荷分布密切相关,且与实际钻探过程中钻杆接头容易在此部位发生断裂的情况高度吻合。此外,螺纹齿根处较大的应力集中也表明该区域的结构优化和材料选择对提高接头寿命具有重要意义。

从图3(b)、(d)、(f)可以看出,在拉伸载荷、扭转载荷及拉扭耦合载荷的情况下,双台肩螺纹的各项应力均有所降低,不同载荷作用时双台肩螺纹相比于单台肩螺纹应力分别下降了24.0%、27.3%和20.9%,表明增加副台肩能够有效提高接头的整体性能。另外,双台肩螺纹的应力分布相比单台肩螺纹更加均匀。双台肩螺纹不仅在主台肩附近的第一圈螺纹处承受载荷,其余螺纹以及主、副台肩处也分担了一定的载荷。这种载荷分布模式有助于减少主台肩附近螺纹齿根部的应力集中现象,降低接头的失效风险,从而提高其使用寿命。上述分析结果清晰

地体现了双台肩螺纹在应力优化方面的显著优势,为钻杆接头结构设计提供了重要参考。

2.2 单、双台肩螺纹在不同载荷下的应力对比

钻柱螺纹断裂往往发生在弯曲井段,这是由于钻柱在弯曲井段长期承受较大轴向拉伸载荷^[5],且在转动过程中还会受到扭矩剪切作用。为了进一步量化单双台肩螺纹的性能差异,本研究分别选取不同的轴向拉力、扭矩,对比分析两种接头的应力状态,分析结果如图4所示。

通过图4可以看出,两种接头在不同轴向拉力作用下的应力曲线近似平行,双台肩螺纹应力比单台肩螺纹低约24%。在不同扭矩作用下,双台肩螺纹的应力值始终低于单台肩螺纹,且随着扭矩的增大,两种接头之间的应力差值逐渐增大。即在高扭矩作用下,双台肩螺纹抗扭性能优势更明显。

由此可见,双台肩螺纹在复杂载荷条件下的综

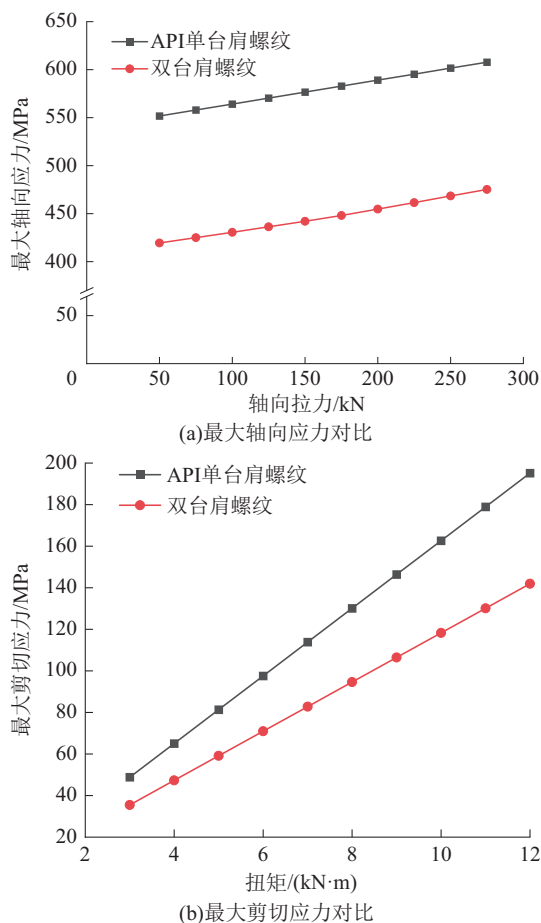


图4 单、双台肩螺纹应力对比

Fig.4 Stress comparison diagram of single and double shoulder threaded

合性能显著优于单台肩螺纹,为提升钻杆接头的可靠性提供了重要依据。

3 特定接头应力集中系数

在钻柱系统的应力分析中,由于各截面的应力并不相同,接头部位往往会出现应力集中现象。学者在进行钻柱疲劳理论分析时,需要准确获取应力集中系数以进行计算。然而,由于实验方法成本较高,不适合大规模研究。有限元方法分析接头应力成本较低,且具有足够的计算精度,用于接头部位集中系数计算更为实用。

目前钻杆接头仿真研究多聚焦于应力分布分析,对接头部位不同方向的应力集中系数(尤其是扭矩作用下的切向应力集中系数)关注相对不足。现有研究常采用二维简化模型进行分析^[8-10,18],虽简化了计算,但无法准确表征扭矩作用下的应力状

态。建立三维模型可有效反映扭矩作用下的应力分布,为系统获取各方向(轴向及切向)应力集中系数提供了基础。

Bu等^[18]通过二维模型给出了该接头轴向应力集中系数 K_a 为4.08,本研究严格依据其论文中的相关参数,采用相同的材料属性与边界条件,建立三维有限元模型进行分析。轴向加载下的应力分析结果如图5(a)所示,红色区域为螺纹应力集中最大区域。为了更好地显示接头整体受力情况,将接头剖开,螺纹处截面应力放大如图5(b)所示,最大应力区域与Bu等^[18]在二维情况下的应力分析(图5c)较为一致,应力集中在第一圈齿。

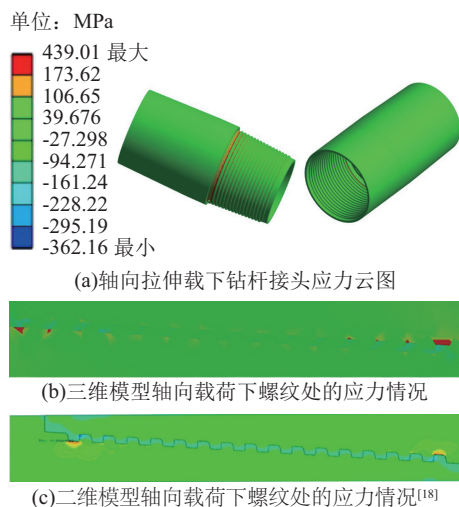


图5 二维三维模型轴向载荷下螺纹的应力分布对比

Fig.5 Comparison of stress conditions at the threaded section under axial load in 2D and 3D models

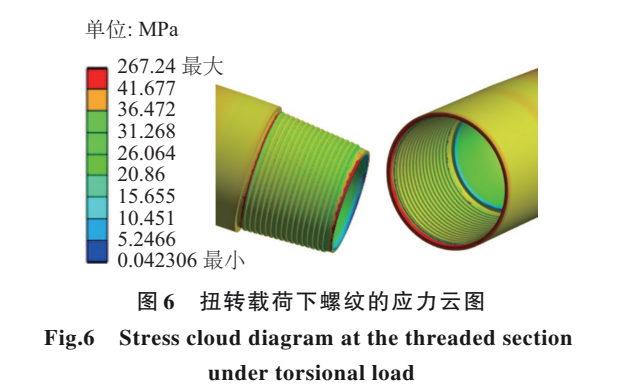
在不同轴向载荷作用下,仿真分析接头载荷面的应力与螺纹连接处最大轴向应力,并将接头最大法向应力与载荷面平均法向应力相除,即为接头的轴向应力集中系数,如表2所示。

从表2可看出,不同轴向载荷作用下,接头轴向应力集中系数 K_a 稳定在4.21左右,与二维模型相差在3%~4%,进一步验证了二维模型在轴向载荷作用下能够较为准确地预测接头应力集中系数,满足工程分析需求。

二维模型无法分析扭转载荷作用下的剪切应力,须建立三维模型进行分析^[28]。保持约束条件不变,将轴向拉伸载荷改为扭转载荷,钻杆接头在12 kN·m扭转载荷作用下螺纹应力分布如图6所示。

表 2 轴向载荷作用下轴向应力集中系数			
Table 2 Axial stress concentration coefficient			
under axial load			
轴向载荷/ kN	载荷面平均法向 应力/MPa	接头最大法向 应力/MPa	轴向应力集 中系数
330	92.996	392.39	4.219
340	95.814	403.88	4.215
350	98.632	415.31	4.211
360	101.45	427.13	4.210
370	104.27	439.01	4.210
380	107.09	450.95	4.211
390	109.09	462.84	4.243
400	112.72	474.76	4.212

表 3 扭转载荷作用下切向应力集中系数			
Table 3 Tangential stress concentration coefficient			
under torsional load			
扭转载荷/ (kN·m)	载荷面最大剪切 应力/MPa	接头最大剪切 应力/MPa	切向应力 集中系数
20	119.54	445.4	3.726
25	149.43	556.76	3.726
30	179.31	668.07	3.726
35	209.2	779.41	3.726
40	239.08	890.75	3.726
45	268.97	1002.1	3.726
50	298.85	1113.4	3.726
55	328.74	1224.8	3.726



观察图 6 可明显看到,应力集中主要出现在螺纹连接的第一圈齿根和主副台肩接触面上,表明在扭转载荷作用下,台肩承受了一定的载荷,而且这些区域的应力分布较为复杂,应力集中现象显著,这一结果与图 3 中双台肩螺纹的应力分布情况一致。

在接头载荷面施加不同扭矩,分析螺纹处最大剪切应力与载荷面最大剪切应力,如表 3 所示,二者之比即为接头处切向应力集中系数。仿真模拟得到接头部位切向应力集中系数 K_t 约为 3.73。

通过三维有限元仿真,得到钻柱所受不同方向的应力集中系数,在反映钻柱不同方向应力分布差异性的同时,也为学者们进行井下钻柱应力分析与疲劳计算提供了参考,具有重要的现实意义。

4 结论

本文对钻柱单、双台肩螺纹进行了三维建模与应力仿真分析,对比了二者的性能差异。针对特定螺纹,在二维模型分析基础上构建三维模型,计算了接头的轴向和切向应力集中系数,与二维计算结

果进行了对比。结论如下:

(1)API 标准螺纹单台肩螺纹的最大应力集中区域位于螺纹台肩附近的第一螺纹齿根啮合部,是断裂的主要风险区域;双台肩螺纹应力集中区域在螺纹啮合的第一圈和最后一圈。

(2)在 API 单台肩螺纹基础上增加副台肩,主副台肩共同分担载荷,可有效改善接头性能,在相同载荷作用下双台肩螺纹的轴向应力相比单台肩降低约 24%。

(3)通过对特定钻杆接头螺纹的三维仿真分析,得到该螺纹的轴向应力集中系数为 4.21,与二维简化模型计算的轴向应力集中系数相差约 3%,切向应力集中系数为 3.73。

参考文献 (References):

[1] 陈师逊,杨芳.深部钻探复合钻杆的研究与应用[J].地质与勘探,2014,50(4):772-776.
CHEN Shixun, YANG Fang. Research and application of composite drill pipes in deep drilling[J]. Geology and Exploration, 2014, 50(4): 772-776.

[2] Baryshnikov A, Calderoni A, Ligrone A, et al. A new approach to the analysis of drillstring fatigue behavior[J]. SPE Drilling & Completion, 1997, 12(2): 77-84.

[3] Zamani S M, Hassanzadeh-Tabrizi S A, sharifi H. Failure analysis of drill pipe: a review [J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 59: 605-623.

[4] 陈波,林春花.新型抗弯扭钻杆接头螺纹力学性能及仿真分析[J].应用力学学报,2022,39(1):155-162.
CHEN Bo, LIN Chunhua. Thread ability and simulation of a new type of anti-bending and torsion drill pipe joint[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2022, 39(1): 155-162.

[5] 蔡明杰,付强,贺明敏,等.特深井大尺寸井眼 Ø168.3 mm S135 钻杆失效分析与对策[J].钻探工程,2025,52(4):69-74.

- CAI Mingjie, FU Qiang, HE Mingmin, et al. Failure analysis and countermeasures of $\varnothing 168.3\text{mm}$ S135 drill pipe in large size hole of extra-deep well[J]. *Drilling Engineering*, 2025, 52(4): 69-74.
- [6] Zhuang Y, Gao L X, Yuan P B. Force analysis and tightening optimization of gas sealing drill pipe joints[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2015, 58(Part 1): 173-183.
- [7] 张俞. 基于电测法的定向钻杆接头应力分布实验研究[J]. *钻探工程*, 2024, 51(5): 138-144.
- ZHANG Yu. Experimental study on stress distribution of directional drill pipe joint based on electrical measurement method[J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(5): 138-144.
- [8] 陈松林, 万军, 辛德忠. 钻杆螺纹失效分析及改进措施[J]. *煤矿机械*, 2008, 29(12): 148-150.
- CHEN Songlin, WAN Jun, XIN Dezhong. Drill pipe thread failure analysis and measures to improve[J]. *Coal Mine Machinery*, 2008, 29(12): 148-150.
- [9] 闫鹏. 钻杆螺纹失效分析及改进措施研究[J]. *煤炭与化工*, 2016, 39(8): 85-87.
- YAN Peng. Study on drill pipe thread failure analysis and improvement measure[J]. *Coal and Chemical Industry*, 2016, 39(8): 85-87.
- [10] 崔丽芬, 张仁龙, 郑俊华, 等. 基于ANSYS的螺杆钻具螺纹优化设计[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2019, 34(6): 88-92, 125.
- CUI Lifan, ZHANG Renlong, ZHENG Junhua, et al. Optimization design of thread in screwdrill based on ANSYS[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science)*, 2019, 34(6): 88-92, 125.
- [11] 焦文鸿, 高连新, 鲁喜宁. 一种新型钻杆螺纹设计及应力分析[J]. *石油机械*, 2012, 40(6): 17-21.
- JIAO Wenhong, GAO Lianxin, LU Xining. Design of a new tool joint thread and its stress analysis[J]. *China Petroleum Machinery*, 2012, 40(6): 17-21.
- [12] 祝效华, 张智. 大位移并超高抗扭双台肩钻杆接头的设计[J]. *天然气工业*, 2017, 37(4): 89-97.
- ZHU Xiaohua, ZHANG Zhi. Design of an ultra-high torque double-shoulder tool joint for extended reach wells[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(4): 89-97.
- [13] 陈锋, 朱巍, 狄勤丰, 等. 适合特深井的双台肩钻杆接头副台肩间隙的确定[J]. *天然气工业*, 2020, 40(7): 90-96.
- CHEN Feng, ZHU Wei, DI Qinfeng, et al. Determination of secondary shoulder clearance of double-shoulder tool joints suitable for extra-deep wells[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(7): 90-96.
- [14] 陈锋, 狄勤丰, 欧阳彦辉, 等. 双台肩钻杆接头副台肩间隙的优选[J]. *工程力学*, 2013, 30(S1): 353-357.
- CHEN Feng, DI Qinfeng, YANG Yanhui, et al. The influence of clearance of secondary shoulder on performance of double shoulder drill pipe joint[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(S1): 353-357.
- [15] 陈锋, 狄勤丰, 王文昌, 等. 副台肩间隙对双台肩钻杆接头性能的影响[C]//第21届全国结构工程学术会议论文集第I册. 沈阳: 中国力学学会结构工程专业委员会, 2012: 133-139.
- CHEN Feng, DI Qinfeng, WANG Wenchang, et al. The influence of the clearance of secondary shoulder to the performance of double shoulder drill pipe joint[C]//Proceedings of the 21st National Conference on Structural Engineering, Volume I. Shenyang: Structural Engineering Professional Committee of the Chinese Society of Mechanics, 2012: 133-139.
- [16] 尹浩, 梁健, 孙建华, 等. 深部科学钻探钻杆接头优化措施[J]. *钻探工程*, 2021, 48(3): 134-139.
- YIN Hao, LIANG Jian, SUN Jianhua, et al. Optimization measures of drill pipe joints for deep scientific drilling[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(3): 134-139.
- [17] Tafreshi A. SIF evaluation and stress analysis of drillstring threaded joints[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1999, 76(2): 91-103.
- [18] Bu C G, Xiao J, He S Y, et al. Theoretical study on fatigue damage of sonic standing wave resonant drill-string[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2023, 220(Part A): 111160.
- [19] He S Y, Bu C G, Zheng X H, et al. Effect of material parameters on the cumulative fatigue damage of sonic oscillators[J]. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2025, 63(1): 165-175.
- [20] Tafreshi A, Dover W D. Stress analysis of drillstring threaded connections using the finite element method[J]. *International Journal of Fatigue*, 1993, 15(5): 429-438.
- [21] Zou H, Tan Z Z. Fatigue life analysis of rotary drill pipe[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2023, 201: 104874.
- [22] American Petroleum Institute. Specification for rotary drill stem elements[EB/OL]. (1998-06-01) [2025-05-20]. <https://www.saigaogroup.com/uploads/file/api-07-standard.pdf>.
- [23] 陈锋. 复杂载荷条件下钻具接头三维应力特征分析[D]. 上海: 上海大学, 2014.
- CHEN Feng. Three-dimensional stress analysis of tool joints under complex loads[D]. Shanghai: Shanghai University, 2014.
- [24] Di Q F, Song H T, Chen F, et al. The effect of bending moment direction on tool joints: working load limits under complex loads[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 35(Part A): 532-540.
- [25] Yang W Z, Wang R, Li D F, et al. Three-dimensional mechanical characteristics analysis of double-shoulder tool joint under complex loads[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2024, 209: 105200.
- [26] Chen F, Di Q F, Li N, et al. Determination of operating load limits for rotary shouldered connections with three-dimensional finite element analysis[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 133: 622-632.
- [27] Shu J J, Zhang Y, Zhao Z Q, et al. Numerical analysis of the stress distribution and concentration factors of the tool joint of the directional drill pipe[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2023, 2023(1): 8106535.
- [28] Chandler R B, Muradov A, Jellison M J, et al. Drill faster, deeper, and further with ultrahigh-torque, third-generation double-shoulder connections[C]//SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam: SPE/IADC Drilling Conference, 2007: SPE-105866-MS.

(编辑 王跃伟)