抗弯定向钻杆接头结构设计与性能分析*

刘时焰[1],舒将军[2,3]

(1.江西省地质局第二地质大队, 江西 九江市 332000;
2.中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039;
3.瓦斯灾害防控国家重点实验室, 重庆 400039)

摘要:在多分枝孔钻进作业中,定向钻杆接头因反复弯曲而频繁失效。利用有限元分析方法模拟了定向钻杆接头在弯曲载荷下的力学行为,得到了定向钻杆接头的应力分布规律,基于此,提出了一种新型抗弯钻杆接头结构,并通过有限元模型对比了其与普通钻杆接头在弯曲及抗弯曲载荷性能上的差异。结果表明,在相同弯曲角度下,抗弯钻杆接头的最大应力值降低了27%~60%;在100 kN横向力作用下,抗弯钻杆接头的最大应力值减小了99 MPa以上,可知新型抗弯钻杆接头在弯曲性能和抗弯曲载荷方面均优于普通钻杆接头。通过钻杆弯曲试验,得到了接头位置的详细应力分布数据,对比分析显示,试验数据与数值仿真结果的误差控制在12.52%以内,验证了数值模拟方法的有效性。研究结果为定向钻杆接头设计提供了优化方案,对减少定向钻孔作业中接头失效的可能性、提高作业安全性和效率具有重要意义。

关键词:定向钻杆接头;多分支孔;弯曲性能;抗弯曲载荷

中图分类号:TD421 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)11-0217-07

Structural Design and Performance Analysis of Anti-Bending Directional Drill Pipe Joint

LIU Shiyan[1], *SHU Jiangjun*[2,3]

(1.The Second Geological Group of Jiangxi Provincial Geological Bureau, Jiujiang, Jiangxi 332000, China;
2.CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400039, China;
3.State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, Chongqing 400039, China)

Abstract: In the multi-branch hole drilling operation, the directional drill pipe joint frequently fails due to repeated bending. The finite element analysis method was used to simulate the mechanical behavior of the directional drill pipe joint under bending load, and the stress distribution law of the directional drill pipe joint was obtained. Based on this, a new type of anti-bending drill pipe joint structure was proposed, and the difference between the bending and bending load resistance performance of the new type of anti-bending drill pipe joint and the ordinary drill pipe joint was compared by the finite element model. The results show that under the same bending angle, the maximum stress value of the anti-bending drill pipe joint is reduced by 27%-60%. Under the action of 100 kN transverse force, the maximum stress value of the anti-bending drill pipe joint is reduced by more than 99 MPa. It can be seen that the new anti-bending drill pipe joint is superior to the ordinary drill pipe joint in terms of bending performance and bending load. Through the drill pipe bending test, the detailed stress distribution data of the joint position are obtained. The comparative analysis shows that the error between the experimental data and the numerical simulation results is controlled within 12.52%, which verifies the effectiveness of the numerical simulation method. The research results provide an optimization scheme for the design of directional drill pipe joints, which is of great significance to reduce the possibility of joint failure in directional drilling operations and improve the safety and efficiency of operations.

Key words: Directional drill pipe joint, Multi-branch hole, Bending performance, Anti-bending load

* **收稿日期**:2024-12-13
作者简介:刘时焰(1988—),男,湖北十堰人,工程师,从事钻探施工技术管理工作。E-mail:1981198061@qq.com

0 引言

随着煤矿开采行业的持续发展,定向钻孔已成为确保矿山安全生产的关键环节之一[1-2]。定向钻孔技术,特别是梳状多分枝孔设计,因其独特的结构特性,在水平主孔两侧分布着多个分支孔,显著增大了瓦斯与抽采系统的接触面积[3],从而提升了瓦斯气体的抽采效率。这一技术的应用,推动了煤矿瓦斯抽采技术的快速发展,为矿井的安全高效开采提供了有力保障。然而,梳状多分枝孔在展现其高效抽采优势的同时,也面临着一系列技术挑战[4]。其中,最为突出的问题[5]是多分枝孔结构导致定向钻杆在钻进过程中频繁弯曲,对钻杆的抗弯性能提出了更高的要求。特别是在接头螺纹连接位置,其抗弯能力成为了整个钻杆系统的薄弱部位[6]。已有研究表明,弯曲载荷是影响定向钻杆接头螺纹使用寿命的主要因素之一,这在一定程度上制约了梳状多分枝孔瓦斯抽采技术的进一步应用与发展[7-8]。因此,深入研究定向钻杆接头螺纹的抗弯能力,开发一种具有高抗弯性能的螺纹结构,成为提升定向钻杆使用寿命、推动梳状多分枝孔瓦斯抽采技术持续发展的关键。

近年来,随着有限元分析技术的不断发展,越来越多的学者开始利用这一工具对钻杆接头的连接性能进行深入研究。焦文鸿等[9]提出了一种新型螺纹设计,并采用有限元方法对其进行分析,结果表明,该新型螺纹显著改善了接头的受力情况,使螺纹应力分布更加均匀,并有效降低了主台肩过渡圆角处的应力集中。王治国等[10]对 API 圆螺纹油管的上扣及拉伸过程进行了有限元应力分析,深入探讨了影响螺纹接头抗滑脱强度和抗黏扣性能的关键因素,并提出了相应的改进措施。在接头螺纹的失效机理分析方面,练章华等[11]利用弹塑性有限元法建立了套管偏梯形和圆形螺纹接头接触问题的力学模型,通过对比分析发现,偏梯形螺纹具有更好的抗滑脱性能。林腾蛟等[12]则采用弹塑性接触有限元混合法,对双台阶钻柱联接螺纹的应力应变进行了详细分析,揭示了多种载荷作用下螺纹连接部位的位移场和应力场变化规律。祝效华等[13]通过有限元分析和试验验证相结合的方式,深入探究了套管连接螺纹的应力分布规律,进一步验证了有限元分析模型的有效性。张彦廷等[14]通过对双台肩接头开展力学分析和有限元仿真,建立其耦合模型,研究其在不同上扣扭矩下副台肩预留间隙与其台肩接触应力之间的关系。在钻杆接头螺纹力学性能的研究领域,学者们已开展了一系列富有成效的工作,CHEN 等[15]利用三维弹塑性有限元分析了钻杆接头在弯曲情况下的应力特性。SHAHANI 等[16]利用三维有限元分析了钻杆接头的接触应力和应力集中因子。ZHU 等[17]基于非线性接触理论建立了钻杆有限元模型,对钻杆螺纹胶合进行了研究。ZHANG 等[18]利用有限元分析了钻杆接头在多轴交变载荷作用下的静应力特性和疲劳寿命。

当前研究聚焦于通过有限元方法探索钻杆螺纹接头的应力分布与疲劳寿命,然而,在复杂弯曲工况,特别是多分枝孔条件下,有关钻杆力学行为的研究却鲜见报道。对此,本文基于定向钻孔接头的数值模拟及弯曲试验结果,创新性地提出了一种新的抗弯钻杆接头螺纹结构,通过有限元模拟对比其与普通钻杆接头在弯曲及抗弯曲载荷性能上的差异,最后,对抗弯钻杆接头进行试验应用,并与仿真数据进行对比分析。抗弯钻杆接头螺纹的提出提升了定向钻杆的抗弯性能,延长了其在多分枝孔作业中的使用寿命,从而为煤矿开采等工业领域的安全与高效作业提供了坚实的技术支撑。

1 定向钻杆接头有限元分析模型

1.1 接头材料和网格参数

接头螺纹材料选用 42CrMo 钢,其弹性模量为 20.8 GPa,泊松比为 0.28,拉伸强度为 1 009 MPa,屈服强度为 851 MPa。采用 4 节点线性四面体单元(C3D10)对模型进行网格划分。特别是在接头螺纹位置,对网格进行了细化处理,以提高该区域的模拟精度,模型如图 1 所示。为了简化计算量并保证分析的准确性,仅选取了接头 200 mm 的接头段进行有限元分析。

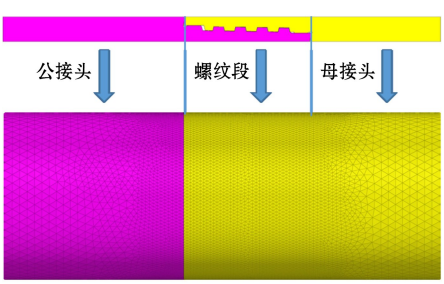


图 1 定向钻杆的有限元模型

Fig.1 Finite element model of directional drill pipe

1.2 边界条件

该模型的初始状态设定为公螺纹与母螺纹旋合并旋紧,直至公接头和母接头的台阶面相互接触。在此模型中,公接头螺纹与母接头螺纹之间形成了一对接触面,同时两处台阶面对应的接触面也设置了接触关系。所有接触面均采用面面接触的方式模拟,以确保接触界面的真实性和准确性。在接触面的法向方向上,采用指数接触关系来描述接触压力与接触间隙之间的关系。在接触面的切向方向上,设置摩擦因数为 0.15,以模拟接触面之间的摩擦效应。在初始条件方面,公接头的端面被固定,母接头的端面则向 y 方向施加弯曲载荷,以模拟实际工况中的弯曲变形。为了确保载荷能够准确地施加在模型上,在公接头和母接头的端面上设置了对应的耦合点。

1.3 接头螺纹截面结构

钻杆接头螺纹的截面结构如图 2 所示,对公接头(外螺纹)和母接头(内螺纹)的螺纹齿从端面开始进行了编号,当公接头与母接头进行连接时,存在两个相互抵接的台阶面,分别为第一台阶面和第二台阶面,两个台阶面确保了接头连接的紧密性,并承受了连接过程中的主要力和弯矩。

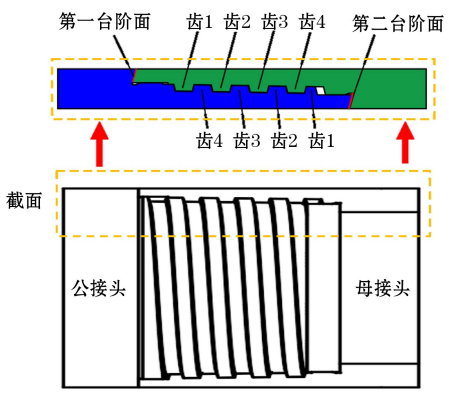


图 2 钻杆接头螺纹截面结构

Fig.2 Section structure of drill pipe joint thread

2 抗弯钻杆接头螺纹设计

2.1 抗弯钻杆接头螺纹结构

基于现有的定向钻杆接头螺纹结构(见图 3(a)),提出将母扣台阶嵌入公扣中,得到抗弯钻杆接头螺纹结构(见图 3(b))。该结构减少了弯矩载荷下第一台阶面的分离距离,增加了螺纹齿的接触面积,降低了接触应力,进而提升了钻杆接头螺纹承受弯矩载荷的能力。

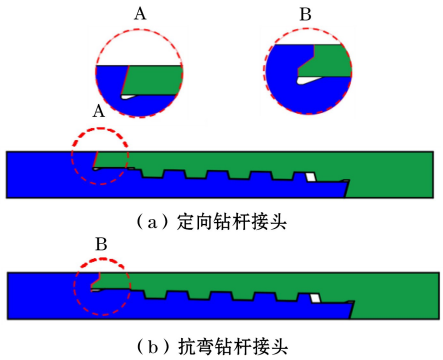


图 3 钻杆接头螺纹连接结构

Fig.3 Connection structure of drill pipe joint thread

2.2 钻杆弯曲变形分析

钻杆受到弯曲载荷时的变形情况如图 4 所示。虽然接头螺纹位置并非呈现完全的纯弯曲变形,但由于钻杆接头部分的变形在整体钻杆变形中所占比例较小,可以将钻杆的弯曲变形近似视作纯弯曲变形。在此情况下,将最大弯曲点与弯曲起始点连线与轴线所形成的夹角 α 定义为钻杆的弯曲角,该角度将作为后文评估钻杆弯曲程度的重要指标。同时,定义最大弯曲点到轴线的垂直距离为最大偏移量 H,用于量化描述钻杆在弯曲状态下的偏移程度。

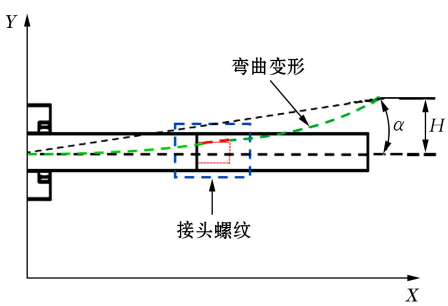


图 4 钻杆弯曲变形分析

Fig.4 Analysis of bending deformation of drill pipe

2.3 弯曲性能对比

当弯曲角为 2.1°时,普通钻杆接头螺纹的应力分布云图如图 5(a)所示,在第一台阶接触面发生了接触台阶的分离,在受拉面的螺纹齿顶位置,出现了显著的应力集中,该区域的应力值超出了材料的屈服强度,导致齿顶压溃。抗弯钻杆接头的应力分布云图如图 5(b)所示,其第一台阶的分离距离小于普通钻杆接头,抗弯钻杆接头在受拉面的应力值始终未超过材料的屈服强度,抗弯钻杆接头螺纹的最大应力值显著低于普通钻杆接头螺纹,这一特性使得抗弯钻杆接头螺纹在弯曲过程中更能有效地避免齿顶失效

的风险,从而提高了钻杆的整体性能和可靠性。

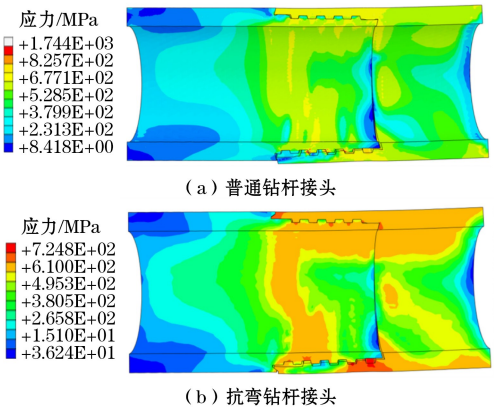


图 5 2.1°弯曲角下钻杆接头螺纹的应力分布云图

Fig.5 Stress distribution cloud diagrams of drill pipe joint thread under bending angle of 2.1°

定向普通钻杆接头与抗弯钻杆接头在弯曲过程中的最大偏移量与最大应力值之间的关系曲线如图 6 所示。由图 6 可知,应力值与偏移量呈现正相关关系,即随着偏移量的增加,应力值也相应增大。但当最大偏移量超过 4 mm 后,应力的增长率开始减缓,这主要是由于母扣变形导致接触状态发生变化所致。进一步分析发现,在最大偏移量约为 5 mm(对应弯曲角为 1.7°)时,普通螺纹的应力达到了材料的屈服强度,齿顶位置开始压溃。相较于普通钻杆接头,抗弯钻杆接头在面临相同偏移量时,展现出了更为出色的弯曲性能,其应力水平普遍低于普通钻杆接头,最大应力值减少了 27%~60%。同时,在相同的偏移量下,抗弯钻杆接头螺纹的最大应力值均小于普通钻杆接头螺纹,这表明抗弯钻杆接头螺纹能够承受更大的弯曲量。

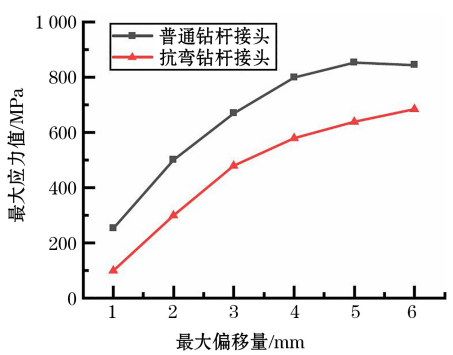


图 6 最大偏移量和最大应力值的对比曲线

Fig.6 Comparison curves between the maximum offset and the maximum stress

2.4 抗弯曲载荷性能对比

在 100 kN 横向力作用下,普通钻杆接头和抗弯钻杆接头应力分布云图如图 7 所示。由图 7 可知,普通钻杆接头在第一台阶面处出现了明显的分离现象,在受拉面的齿 3 位置发生了显著的应力集中,齿 3 位置的齿顶已压溃。相比之下,抗弯钻杆接头的应力主要分布于管壁位置,不管是受拉面还是受压面,各齿的应力明显小于普通钻杆接头。此外,抗弯钻杆在第一台阶面的接触应力较大,这一特性有利于钻杆在弯曲过程中保持良好的密封性能。

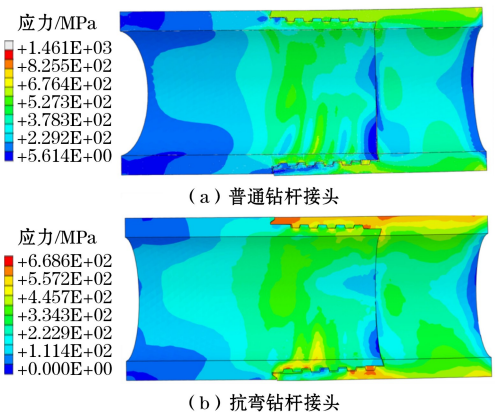


图 7 100 kN 横向力下钻杆接头螺纹的应力分布云图

Fig.7 Stress distribution cloud diagrams of drill pipe joint thread under lateral force of 100 kN

在弯曲过程中,一半接头螺纹承受拉力,另一半则承受压力。在 100 kN 的横向力作用下,接头弯曲时各个齿的应力分布如图 8 所示,受拉一侧各个齿的应力大于受压侧,在相同弯曲载荷下,抗弯钻杆接头各齿的应力均小于普通钻杆接头,第一台阶面的分离会导致受拉一侧的公接头和母接头在齿 3 位置应力发生突变。图 8(a)为受压侧公接头各个齿的应力曲线,其中齿 1 和齿 4 的应力较大,而中间的齿 2 和齿 3 的应力较小,最大应力差值出现在齿 2 位置,应力差为 221 MPa;最小应力差值则位于齿 1 位置,为 153 MPa。图 8(b)为公接头受拉侧各个齿的应力曲线,在普通钻杆接头中,齿 3 位置的应力出现了突然减小的情况,这主要是由于母接头受拉一侧在第一台阶面发生了分离,导致公接头受拉侧齿 4 的接触面积突然减少,进而引起应力的急剧降低,最大应力差值出现在齿 2 位置,为 458 MPa。图 8(c)为母接头受压一侧各齿的应力曲线,抗弯钻杆接头和普通钻杆接头从齿 1 到齿 4 的应力均呈现逐渐减小的趋势,抗弯钻杆接头和普通钻杆接头的最大应力差值均出现在齿 2 位置,为 99 MPa。图 8(d)为母接头受拉一侧各个齿的应力曲线,在普通钻杆

接头中,齿 3 位置的应力发生了突变,其应力值为 856 MPa,已超过材料的屈服强度(851 MPa),因此在齿 3 位置出现了压溃现象,第一台阶面的分离是导致母接头受拉侧齿 3 应力突然增加的主要原因。对比图 8(a)至图 8(d)可知,在相同弯曲载荷下,抗弯钻杆接头各齿的应力均小于普通钻杆接头,表明抗弯钻杆接头在抵抗弯曲载荷方面具有一定的优越性。

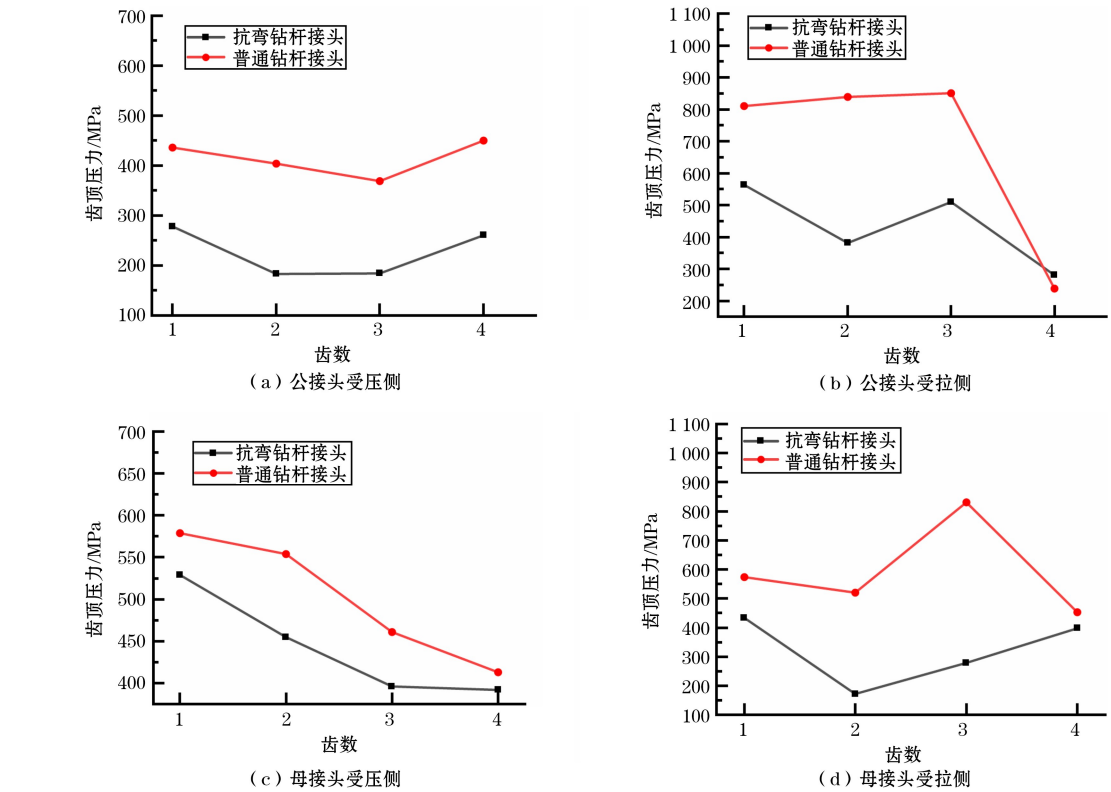


图 8 横向力 100 kN 作用下各齿应力曲线

Fig.8 Stress curves of each tooth under lateral force of 100 kN

3 钻杆弯曲试验

3.1 试验方案

钻杆下端嵌入在试验平台的圆柱型凹槽内,并在其内部设置有球形支点,这样的设计允许钻杆围绕球形支撑点自由转动。为了确保钻杆在试验中仅承受 X 方向的横向力,采用组合铰链将液压缸与钻杆的上端相连接,弹簧在垂直方向上对液压缸进行浮动支撑。在接头螺纹位置的内表面和外表面均粘贴了应变片,通过数据采集系统记录应变片的变形量。最后,利用数据分析系统,绘制横向力与钻杆弯曲之间的关系曲线。

选用 100 kN 拉力的液压缸,模拟并测试接头螺纹在极端条件下的损坏情况。在数据采集过程中,频率的设定是一个关键参数。过高的数据采集频率会产生庞大的数据量,增加处理难度;而过低的频率则可能导致关键信息的遗漏,引起误差。经过测试,将数据采集频率设定为 5 Hz,这一频率在保证数据准确性的同时,也保证了数据处理的效率。

试验开始前,设定液压缸的初始拉力值,并缓慢缩回液压缸,以 1 kN 的拉力为起点,检查每个数据采集信道是否正常工作。当所有信道均确认正常后,开始进行钻杆弯曲试验。在试验过程中,每增加 10 kN 的拉力,停止加载并保持 2 min,以便让钻杆接头充分变形,直到液压缸的拉力达到预定的 100 kN 时停止试验。

3.2 仿真与试验数据对比

对比试验应力提取位置如图 9 所示。在母接头外部管壁按照应变片粘贴位置将对应仿真数据的应力值提取出来,试验测试数据与仿真数据结果见表 1。由表 1 可知,计算机模拟结果与试验数据吻合较好,平均误差为 5.51%。其中,最大误差出现在齿 3 位置,误差率为 12.52%,进一步对比齿 3 前后两个齿的试验数据,发现在齿 3 位置的应力变化率存在显著的跳跃。根据线弹性应力方程可知,应力应呈现连续性的变化,因此,可以推断齿 3 位置试验数据

偏高,这主要是应变片粘贴位置不准导致,其真实应力值应小于测量值,因此,其真实应力值与仿真值之间的最大误差应小于12.52%。综上所述,建立的有限元仿真模型的精度可满足工程分析要求。

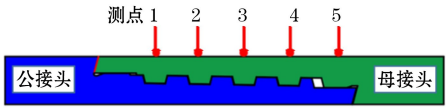


图 9 对比试验应力提取位置

Fig.9 Stress extraction locations of contrast test

表 1 试验和模拟数据比较

Table 1 Comparison of test and simulation data

测点	试验值/MPa	仿真值/MPa	误差率/%
1	278	291	4.68
2	380	397	4.47
3	551	482	12.52
4	560	585	4.46
5	627	618	1.44

4 结论

针对定向钻杆接头的数值模拟与弯曲试验结果,创新性地设计了一种新型抗弯钻杆接头结构,通过有限元模拟对比其与普通钻杆接头在弯曲及抗弯曲载荷性能上的差异,并对抗弯钻杆接头进行试验应用,得出以下主要结论。

(1) 弯曲性能对比试验结果表明,普通钻杆接头在第一台阶接触面发生了接触台阶的分离,应力集中于拉伸侧的齿顶区域,这是造成接头螺纹齿顶失效的主要原因,而抗弯钻杆接头在第一台阶的分离距离始终小于定向钻杆接头,应力水平普遍低于普通钻杆接头,最大应力值减小了27%~60%,在受拉面的应力值未超过材料的屈服应力,有效避免了齿顶失效的风险。

(2) 抗弯曲载荷性能对比试验结果表明,普通钻杆接头在第一台阶面的分离导致公接头和母接头在拉伸侧的应力分布发生显著变化,具体表现为公接头在齿3位置出现应力突然减小的情况,母接头在齿3位置的应力值为856 MPa,超过了材料的屈服强度,出现压溃现象。而抗弯钻杆接头各齿的应力均小于普通钻杆接头,公接头在受压侧及受拉侧齿2位置的应力差值均最大,分别为221 MPa和458 MPa,母接头在受压侧齿2位置的应力差值最大,为99 MPa,表明抗弯钻杆接头在抵抗弯曲载荷方面具有优越性。

(3) 对比钻杆弯曲试验数据与计算机模拟结果可知,二者吻合较好,平均误差率为5.51%,仅齿3位置出现最大误差,误差率为12.52%,这主要是因为应变片粘贴位置不准导致试验数据值偏高,有限元仿真模型的精度满足工程分析要求。研究结果对于减少定向钻孔作业中接头失效的可能性、提高作业安全性和效率具有重要意义。

参考文献(References):

[1] 李泉新,姚克,方俊,等. 煤矿井下瓦斯高效精准抽采定向钻进技术与装备[J].煤炭科学技术,2023,51(增刊1):65-72.
LI Quanxin, YAO Ke, FANG Jun, et al. Directional drilling technology and equipment for efficient and accurate gas drainage underground coal mine[J]. Coal Science and Technology,2023,51(Suppl.1):65-72.

[2] 田东庄,陈彦宇,李晴,等.煤矿用钻杆螺纹的研究现状及展望[J].煤田地质与勘探,2020,48(4):233-239.
TIAN Dongzhuang, CHEN Yanyu, LI Qing, et al. Research status and prospect of drill pipe thread used in coal mine[J]. Coal Geology & Exploration,2020,48(4):233-239.

[3] 吕晋军.煤矿井下用千米定向钻机通缆钻杆的研究[J].煤炭技术,2021,40(8):175-177.
LYU Jinjun. Research on cable drilling pipe of 1 000 m directional drilling machine used in coal mine[J]. Coal Technology,2021,40(8):175-177.

[4] 石智军,姚克,姚宁平,等.我国煤矿井下坑道钻探技术装备40年发展与展望[J].煤炭科学技术,2020,48(4):1-34.
SHI Zhijun, YAO Ke, YAO Ningping, et al. 40 years of development and prospect on underground coal mine tunnel drilling technology and equipment in China[J]. Coal Science and Technology,2020,48(4):1-34.

[5] 贾后省,高延玺,刘少伟,等.煤矿井下卸压钻孔钻杆振荡消除与钻进增效方法研究[J].煤炭学报,2024,49(增刊2):623-632.
JIA Housheng, GAO Yanxi, LIU Shaowei, et al. Study on drill pipe oscillation elimination and drilling efficiency enhancement of pressure-relief borehole in coal mines[J]. Journal of China Coal Society,2024,49(Suppl.2):623-632.

[6] 田宏亮,张金宝,王力,等.煤矿井下碎软煤层气动定向钻进技术与装备研究[J].煤田地质与勘探,2024,52(6):154-165.
TIAN Hongliang, ZHANG Jinbao, WANG Li, et al. Pneumatic directional drilling technology and equipment for broken-soft coal seams in underground coal mines[J]. Coal Geology & Exploration,2024,52(6):154-165.

[7] 蓝航,齐庆新,潘俊锋,等.我国煤矿冲击地压特点及防治技术分析[J].煤炭科学技术,2011,39(1):11-15+36.
LAN Hang, QI Qingxin, PAN Junfeng, et al. Analysis on features as well as prevention and control technology of mine strata pressure bumping in China[J]. Coal Science and Technology,2011,39(1):11-15+36.

[8] 祝效华,李柯.铝合金钻杆在长水平井段延伸钻进的可行性[J].天然气工业,2020,40(1):88-96.
ZHU Xiaohua, LI Ke. Feasibility of extended drilling of aluminum alloy drill pipes in long horizontal wells[J]. Natural Gas Industry,2020,40(1):88-96.

[9] 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.

[10] 王治国,张毅.API圆螺纹油管接头上扣与拉伸过程的有限元应力分析[J].钢管,2001(3):20-25.
WANG Zhiguo, ZHANG Yi. Finite element stress analysis of API round connections under make-up torque and axial load[J]. Steel Pipe,2001(3):20-25.

[11] 练章华,韩建增,张毅,等.套管偏梯形和圆形螺纹滑脱载荷分析[J].石油机械,2004(5):7-9+49-67.
LIAN Zhanghua, HAN Jianzeng, ZHANG Yi, et al. Analysis of sliding load on trapezoidal and circular threads of casings[J]. China Petroleum Machinery, 2004(5): 7-9+49-67.

[12] 林腾蛟,李润方,徐铭宇.双台阶钻柱螺纹联接弹塑性接触特性数值仿真[J].机械设计与研究,2004(1):48-49+7.
LIN Tengjiao, LI Runfang, XU Mingyu. Numerical simulation of elastoplastic contact characteristic for drillpipe thread compounds with two steps[J]. Machine Design & Research,2004(1):48-49+7.

[13] 祝效华,高原,贾彦杰.弯矩载荷作用下偏梯形套管连接螺纹参量敏感性分析[J].工程力学,2012,29(10):301-307.
ZHU Xiaohua, GAO Yuan, JIA Yanjie. The parameter sensitivity analysis of buttress casing connecting thread under action of bending loading[J]. Engineering Mechanics,2012,29(10):301-307.

[14] 张彦廷,曹洪祥,郑志滨,等.基于耦合模型的双台肩螺纹钻杆接头台肩力学性能[J].中国石油大学学报(自然科学版),2022,46(4):137-142.
ZHANG Yanting, CAO Hongxiang, ZHENG Zhibin, et al. Mechanical performances of double-shoulder threaded drilling pipe's joint shoulder based on coupling model[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2022,46(4):137-142.

[15] CHEN Feng, HUO Yonghao, ZHAO Haiyi, et al. The effect of axial tension and borehole curvature on torsion limit of drill string threaded connections[J]. Engineering Failure Analysis,2021,127:105555.

[16] SHAHANI A, SHARIFI S. Contact stress analysis and calculation of stress concentration factors at the tool joint of a drill pipe[J]. Materials & Design,2009,30:3615-3621.

[17] ZHU Xiaohua, DONG Liangliang, TONG Hua. Failure analysis and solution studies on drill pipe thread gluing at the exit side of horizontal directional drilling[J]. Engineering Failure Analysis,2016,33:251-264.

[18] ZHANG Zhi, ZHU Xiaohua. Failure analysis and improvement measures of step transition zone of drill pipe joint[J]. Engineering Failure Analysis,2020,109:104211.