

# 基于电测法的定向钻杆接头应力分布实验研究

张 俞<sup>1,2</sup>

(1. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039; 2. 瓦斯灾害防控国家重点实验室, 重庆 400039)

**摘要:** 煤矿定向钻杆在孔内受弯曲、扭转、振动及拉压等各种载荷作用, 施工过程中经常出现钻杆断裂事故, 应力集中是造成钻杆断裂的重要原因之一, 研究钻杆接头螺纹的应力分布对预防钻杆断裂具有重要的意义。本文以电阻应变测量为基础, 搭建定向钻杆全尺寸实物应力测试实验平台, 对钻杆接头进行了拉伸应力实验, 并将各个实验数据绘制成应力分布曲线。研究结果表明: 钻杆公接头应力大于母接头应力, 公接头和母接头的最大应力均在齿3的位置。通过应力分布趋势和各齿应力值的方式验证了仿真模型的正确性, 提供了一种验证钻杆仿真模型正确性的方法。本研究的实验数据和应力分布曲线为钻杆有限元仿真提供了可靠的数据支撑。

**关键词:** 定向钻杆; 接头螺纹; 应力测试; 电阻应变; 应力分布

**中图分类号:** P634.4; TD7 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)05-0138-07

## Experimental study on stress distribution of directional drill pipe joint based on electrical measurement method

ZHANG Yu<sup>1,2</sup>

(1. Chongqing Research Institute Co., Ltd., China Coal Technology and Engineering Group, Chongqing 400039, China;

2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, Chongqing 400039, China)

**Abstract:** The directional drill pipe in coal mine is subjected to bending, torsion, vibration, tension and other loads in the hole, and the fracture accident often occurs in the construction process. The main reason for the fracture of drill pipe is stress concentration. Based on the resistance strain measurement, this paper builds a full-size physical stress test platform for directional drill pipe, conducts tensile stress tests on drill pipe joints, and plots each experimental data into stress distribution curves. The results show that the stress of drill pipe pin is greater than that of drill pipe box, and the maximum stress of drill pipe pin and box is at the position of tooth 3. The correctness of the simulation model is verified by the stress distribution trend and the stress value of each tooth, and a method to verify the drill pipe simulation model is provided. The experimental data and stress distribution curve in this study provide reliable data support for the finite element simulation of drill pipe.

**Key words:** directional drill pipe; connection thread; stress test; resistance strain; stress distribution

## 0 引言

定向钻孔技术已经广泛的应用于煤层瓦斯抽采、探放水和地质勘探等钻孔施工, 定向钻杆是实现定向钻孔的关键钻具<sup>[1-3]</sup>, 定向钻杆两端的接头分为公接头和母接头, 钻柱由大量钻杆的公接头螺纹

和母接头螺纹连接而形成<sup>[4-8]</sup>, 因此定向钻杆的螺纹接头是整个钻柱中最为薄弱的环节<sup>[9]</sup>, 且接头螺纹应力集中是导致其失效的重要原因之一。据统计<sup>[10-11]</sup>定向钻杆螺纹接头失效占整个钻柱失效的70%, 定向钻杆螺纹接头的失效不但带来了钻孔安

收稿日期: 2023-12-08; 修回日期: 2024-03-15 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.05.017

基金项目: 中煤科工集团重庆研究院有限公司创新引导项目“高耐磨通缆定向钻杆的研究”(编号: 2023YBXM53)、“煤矿井下定向孔水力震荡器研制”(编号: 2023YBXM54)

作者简介: 张俞, 男, 汉族, 1982年生, 中煤科工集团重庆研究院钻探分院钻具所所长, 高级工程师, 硕士, 主要从事钻具及钻探工艺方面的研究工作, 重庆市九龙坡区科城路6号504, zhangyuw80@sina.com。

引用格式: 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.

全问题,而且会带来严重的财产损失。

目前,国内外学者已开展了大量的钻杆螺纹研究:田东庄等<sup>[12]</sup>总结了现有钻杆的研究方法和失效原因,主要方法有解析法、有限元法和实验法,钻杆的失效主要有疲劳破坏、脆断和粘扣。Zhu等<sup>[13]</sup>采用有限元方法建立了钻杆的三维分析模型,分析了钻杆的Mise最大应力分布,提出了钻杆弯曲吊装的改进方法。张幼振等<sup>[14]</sup>建立了三维有限元仿真模型,分析了钻杆接头螺纹的应力分布和接触应力,提出了复合锥度设计与柱面结构密封的改进方案。Shuai Luo等<sup>[15]</sup>通过钻杆接头螺纹内加厚过渡带和外加厚过渡带分别对其应力状态的影响开展了研究,并针对某一工况条件分析了外螺纹接头失效原因。赵建国等<sup>[16]</sup>建立了钻杆弯曲有限元分析模型,分析了高位大直径定向钻杆弯曲姿态应力分布特征。王俐等<sup>[17]</sup>采用实验方法研究了接头的应力分布规律及上扣扭矩和滑脱力的大小。董亮亮<sup>[18]</sup>通过有限元分析了钻杆接头螺纹的应力分布并提出了高抗弯钻杆接头螺纹结构。李宝存<sup>[19]</sup>基于多轴疲劳理论,建立了钻杆的有限元计算模型,分析了钻杆的疲劳寿命。焦文鸿<sup>[20]</sup>通过有限元分析了接头在上扣、拉伸、压缩及弯曲载荷作用下的应力分布规律,研究了API接头结构缺陷对接头疲劳强度的影响。

综上所述,现存文献主要是通过有限元分析研究钻杆接头应力分布和疲劳寿命,并利用有限元应力分布云图和钻杆实际失效图进行对比验证有限元的正确性,而通过实验方法研究钻杆接头应力的文献极少,这也就导致不同的专家通过有限元分析得到的结论存在着一定的差异。因此设计钻杆接头应力分布实验从而获得其应力分布的准确数据,对钻杆接头的研究具有重要的意义。

本文基于电阻应变测量法建立钻杆拉伸应力测试实验装置,搭建定向钻杆全尺寸实物应力测试实验平台,对钻杆接头进行了拉伸应力实验,得到了钻杆接头螺纹各齿的应力值,确定了钻杆接头螺纹最危险的位置,采用实验数据验证了有限元模型,提供了一种有限元仿真结果正确性验证的方法。

## 1 实验原理

电阻应变测量(简称电测法),将应变片粘贴在

被测试件表面指定点,在试件上施加作用力,当试件受力变形时,应变片的电阻值发生相应变化,测量电阻的变化推算试件的变形量,计算出相应测量点的应力值。

设有长度为 $l$ 、截面积为 $A$ (截面直径为 $D$ 、体积为 $V$ )、材料电阻率为 $\rho$ 的金属丝,其电阻 $R$ 用下式表示:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (1)$$

金属丝因受力变形引起的电阻相对变化率可以通过式(1)两边取对数并微分,表示为:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (2)$$

根据金属物理和材料力学理论可知 $\frac{dA}{A}$ 、 $\frac{d\rho}{\rho}$ 、 $\frac{dl}{l}$ 成近似线性关系,即:

$$\frac{dA}{A} \approx 2 \frac{dD}{D} = -2\mu \frac{dl}{l} \quad (3)$$

$$\frac{d\rho}{\rho} \approx C \frac{dV}{V} = C \left( \frac{dA}{A} + \frac{dl}{l} \right) = C(1 - 2\mu) \frac{dl}{l} \quad (4)$$

将式(3)、(4)代入式(2)可得:

$$\frac{dR}{R} = \left[ (1 + 2\mu) + C(1 - 2\mu) \right] \frac{dl}{l} \quad (5)$$

式中: $\mu$ ——金属丝材料的泊松比; $C$ ——与材料种类和加工方法有关的常数。

令:

$$K = (1 + 2\mu) + C(1 - 2\mu) \quad (6)$$

而 $\frac{dl}{l} = \epsilon$ 代入式(5)可得:

$$\frac{dR}{R} = K\epsilon \quad (7)$$

金属丝电阻的相对变化 $\frac{dR}{R}$ 与它的线应变 $\epsilon$ 成正比,其比例系数 $K$ 称为金属丝的灵敏系数。

## 2 钻杆接头应力分布实验

### 2.1 螺纹结构参数

本文以煤矿用 $\Phi 73$  mm定向钻杆接头螺纹开展实验研究,螺纹结构如图1所示,具体参数如表1所示。

### 2.2 实验仪器和设备

实验使用的仪器有拉伸实验台、应力应变采集系统、电阻式应变计、屏蔽线。拉伸实验台如图2

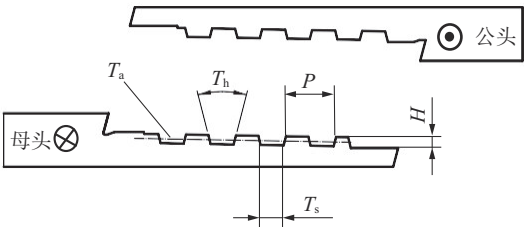


图1 钻杆螺纹结构

Fig.1 Drill pipe thread structure

表1 钻杆螺纹结构参数

Table 1 Structure parameters of drill pipe threads

序号	名称	参数
1	锥度 $T_a$	1:6
2	螺距 $P/\text{mm}$	6.35
3	牙低宽 $T_s/\text{mm}$	1.7
4	牙型角 $T_h/^\circ$	60
5	牙型高 $H/\text{mm}$	1.5

(a)所示,实验台由行架和液压缸构成,液压缸可提供最大拉力为500 kN,液压缸、行架和试件均采用铰链连接,以消除横向受力,保证测试件只承受拉力。应力应变采集系统如图2(b)所示,主要参数见表2,采集系统可将电阻应变计的信号变为数值信号上传给计算机。电阻式应变计如图2(c)所示,具体参数见表3,电阻式应变计按照公式(7)将应变转化为电阻信号。屏蔽线如图2(d)所示,屏蔽线将电阻应变计的信号传输至数据采集系统,在传输过程中屏蔽外部信号的干扰。

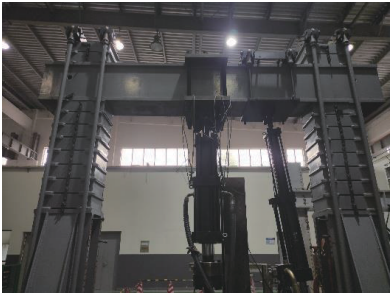
表2 应力应变采集装置主要参数

Table 2 Main parameters of stress-strain collecting device

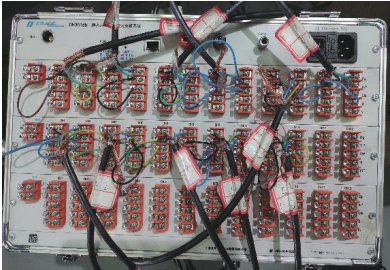
序号	主要技术指标	参数
1	交流电压/V	220
2	采集通道	36
3	数据采集频率/Hz	5
4	测试应变范围/ $\mu\epsilon$	$\pm 60000$
5	最高分辨率/ $\mu\epsilon$	0.1
6	电压量程/mV	$\pm 6$
7	应变片主要技术指标	1~3

2.3 实验方案

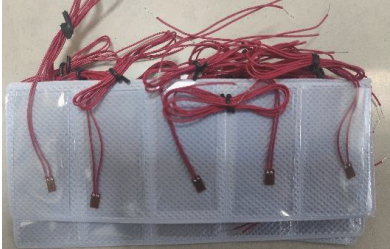
钻杆螺纹端应力测试实验方案如图3所示,测试钻杆在拉伸实验台上可浮动,保证施加拉伸载荷时钻杆只承受轴向载荷,实验样件为1 m长的钻杆,



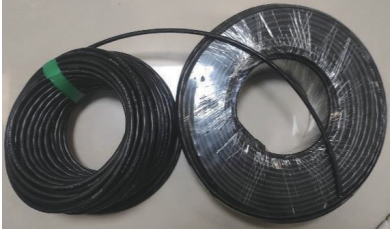
(a) 拉伸实验台



(b) 应力应变数据采集系统



(c) 电阻应变计



(d) 屏蔽线

图2 实验仪器

Fig.2 Experimental instruments

表3 电阻应变计主要参数

Table 3 Main parameters of resistance strain gauge

序号	主要技术指标	参数
1	电阻值/ $\Omega$	$120.2 \pm 0.1$
2	灵敏系数/%	$2.22 \pm 1$

实验开始前将接头螺纹正确啮合。在钻杆接头螺纹的内外表面均粘贴电阻式应变计,外表面采集母接头应力,内表面采集公接头应力,同一位置粘贴两组电阻式应变计,当一个电阻式应变计数据误差



过大时,选取同一位置的另一个电阻式应变计数据替换,在每个螺纹齿的对应位置粘贴电阻应变计如图4和图5所示。采用半桥连接电路将每个电阻应变计通过屏蔽线连接到静态应力应变采集仪(DH3816N型)的相应端子,静态应力应变采集仪将应变信号上传给计算机,计算机根据采集的应力数据计算各个测点的应力变化。

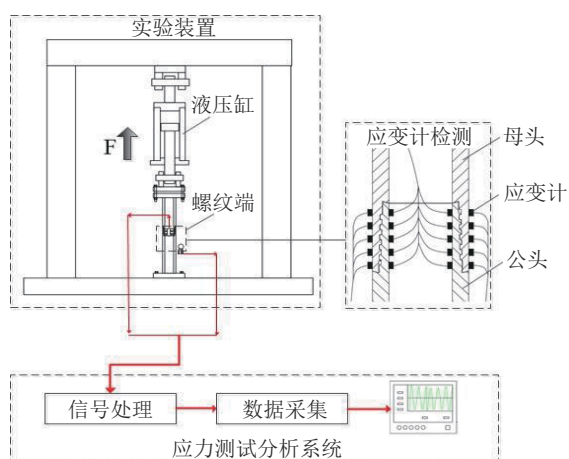


图3 实验系统组成

Fig.3 Composition diagram of the experimental system

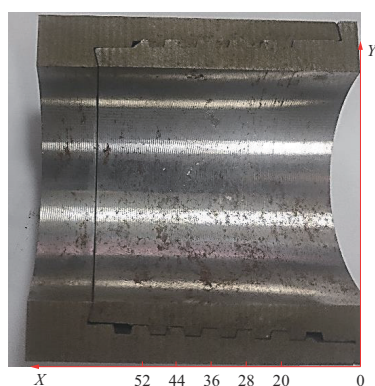


图4 接头螺纹剖面

Fig.4 Section view of the joint thread

## 2.4 实验过程

如图6所示,测试样件浮动连接在实验台架上,连接好测试仪器,施加10 kN的拉力后缓慢卸载,检查施加拉力与采集的应力分布曲线,根据胡克定律拉力与应力成正比关系,按照应力计算公式计算管壁的应力值,绘制出管壁应力曲线,分析应力曲线和拉力曲线,验证各个采集端口和传感器是否正常工作。为了使钻杆接头螺纹变形均匀,本实验采用拉

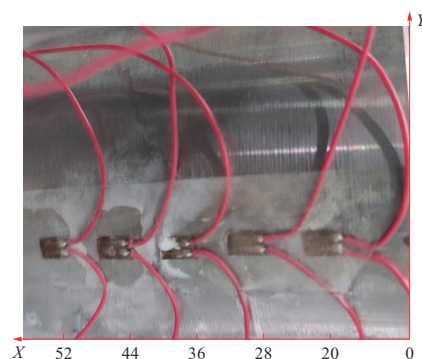


图5 应变计剖面

Fig.5 Section view of strain gauge

力阶梯施加,将液压缸设置为缓慢收缩,液压缸拉力每增50 kN,保持2 min,直到拉力值到达450 kN。



图6 试验系统组成

Fig.6 Composition diagram of the test system

## 3 实验结果与仿真验证

### 3.1 实验结果分析

为了后期分析的方便,对接头螺纹的各齿进行编号,从止口端开始编号,编号如图7所示。

公接头端螺纹各齿应力与拉力分布曲线如图8所示,各齿应力与拉力成正比关系,开始阶段应力跟随拉力急剧上升,各个齿的应力变化率基本一

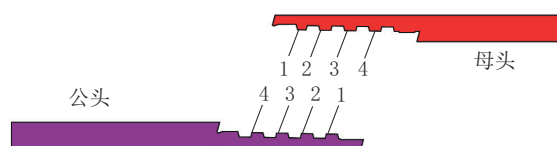


图7 钻杆接头螺纹编号

Fig.7 Drill pipe joint thread numbering diagram

致,拉力超过 50 kN 后,各齿的应力变化率出现了明显的差别,主要是由于螺纹各齿间有间隙。在 0~50 kN 范围内,各个齿开始接触各齿受力均匀,当载荷超过 50 kN 后,各齿的应力变化有明显的差异,其中齿 3 应力变化率最大,应力值为 564 MPa,齿 1 的应力变化率最小,最大应力值为 195 MPa。当拉力达到最大 450 kN 后,应力从大到小的顺序为齿 3、齿 4、齿 2、齿 1,研究表明齿 3 位置是接头螺纹的最危险位置。

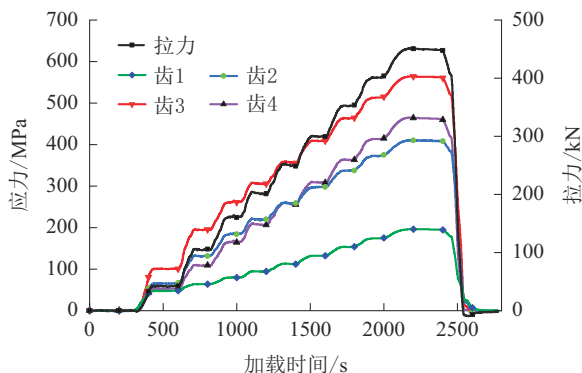


图 8 公接头加载与应力曲线

Fig.8 Loading and stress curve of pin

母接头端螺纹各齿应力与拉力分布曲线如图 9 所示,对比图 8 和图 9 可知,母接头端螺纹应力分布趋势与公接头端螺纹应力分布趋势一致,但母接头端各齿的应力变化率小于公接头端。如图 9 所示,母接头端齿 1 和齿 2 的应力分布基本一致,这是由于接头螺纹止口端较薄,受到螺纹径向的分力后出现了微小的胀扣现象,形状的改变平衡了第一齿和第二齿的受力。应力最大值出现在齿 3 位置,最大应力为 518 MPa,应力最小值出现在齿 1,应力值为 161 MPa。当拉力为 450 kN 后,母接头端的从大到小的应力分布次序为,齿 3、齿 4、齿 2、齿 1,母接头各齿应力大小排序与公接头一致。研究表明母接头螺纹端的应力小于公接头螺纹端的应力,这也为实际工程中公接头螺纹更容易折断提供了实验数据。

### 3.2 仿真结果验证

按表 1 各个结构参数建立仿真模型,仿真模型如图 10 所示,模型最初正确啮合,在两个端面施加拉力,按照实验的载荷对模型施加拉力,在接触的螺纹段进行了网格细化,螺纹接触面采用面接触。

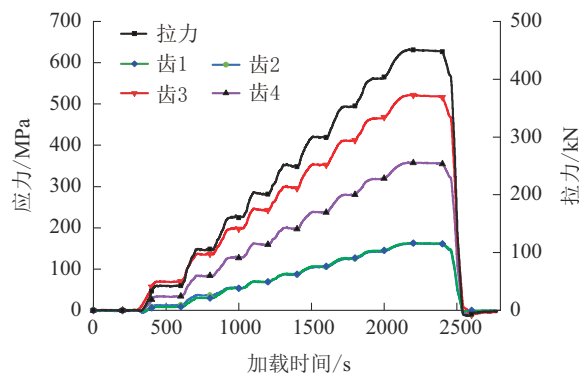


图 9 母接头加载与应力曲线

Fig.9 Loading and stress curves of box

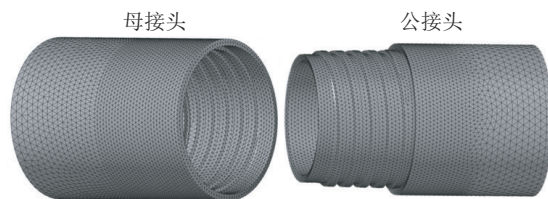


图 10 钻杆接头仿真模型

Fig.10 Simulation model of drill pipe joint

有限元分析应力云图如图 11 所示,公接头和母接头应力从大到小的顺序为齿 3、齿 4、齿 2、齿 1,应力云图与实验测得的应力分布趋势一致。

将仿真结果的每个齿应力值提取出来与实验结果进行对比,仿真结果与实验结果的对比曲线如图 12 所示,从图中可以看出公接头和母接头各个齿的应力值与测试结果非常接近,主要误差出现在第 1 齿和第 5 齿的位置,这主要是螺纹接头的第 1 齿和第 5 齿的牙形不完整,不完整的牙形在仿真过程中网格畸变较大会导致计算不准确,第 2 齿、第 3 齿和第 4 齿的误差均小于 5%,因此实验数据验证了仿真模型的准确性,实验验证表明:螺纹开始和结束位置的仿真结果误差较大。

## 4 结论

本文基于电测法搭建了一套钻杆拉伸实验装置,开展了钻杆拉伸应力实验,通过在螺纹各个齿的对应位置粘贴应变片的方式,获得了钻杆螺纹接头各个齿的应力分布曲线,通过分析各齿的应力分布曲线,并将仿真与实验进行对比验证,得到了如下结论。

(1)母接头螺纹端的应力小于公接头螺纹端的应力,这也为实际工程中公接头螺纹更容易折断提

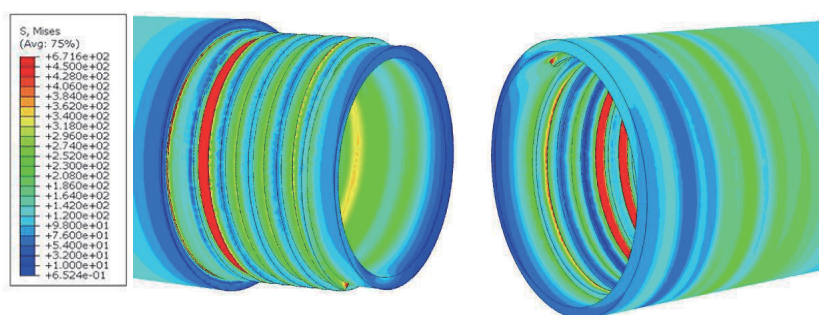


图11 钻杆接头仿真应力云图

Fig.11 Simulated stress cloud diagram of drill pipe joint

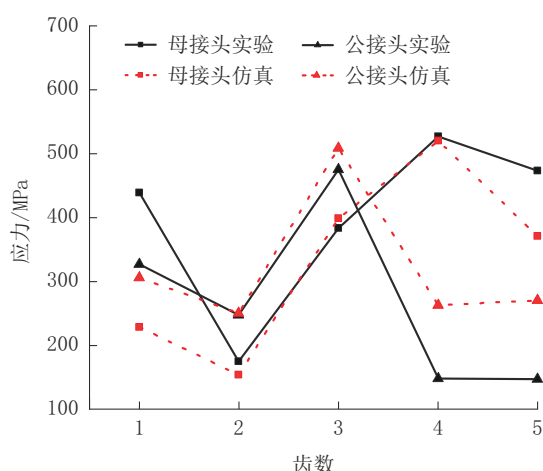


图12 仿真结果与实验对比曲线

Fig.12 Comparison curve between simulation results and experiments

供了实验数据。

(2)公接头和母接头具有相同的应力分布趋势,应力从大到小的顺序为齿3、齿4、齿2、齿1,应力最大值出现在齿3位置,在钻杆螺纹设计和工程使用过程中需要重点关注公接头螺纹齿3位置的强度。

(3)有限元仿真可获得钻杆准确的应力分布,但是接头螺纹开始和结束区域仿真结果误差较大。

本文开展的钻杆拉伸实验数据可用于有限元模型的验证,可以从应力分布趋势和各齿应力值的方式验证仿真模型,验证后的模型可用于分析各种载荷下的应力分布,从而减少开展实验的次数。

## 参考文献(References):

- [1] 舒将军.煤矿定向钻杆接头螺纹应力集中性研究[J].煤矿机械,2023,44(4):78-80.  
SHU Jiangjun. Study on stress concentration of directional drill pipe joint thread in coal mine[J]. Coal Mine Machinery, 2023,

44(4):78-80.

- [2] 刘在政.水平定向钻进钻杆接头螺纹承载能力分析 & 结构优化研究[J].隧道建设(中英文),2022,42(S2):487-493.  
LIU Zaizheng. Research on bearing capacity analysis and structural optimization of drill pipe joint thread in horizontal directional drilling [J]. Tunnel Construction (Chinese and English), 2022,42(S2):487-493.
- [3] 方鹏,姚克,王龙鹏,等.ZDY25000LDK智能化定向钻进装备关键技术研究[J].煤田地质与勘探,2022,50(1):72-79.  
FANG Peng, YAO Ke, WANG Longpeng, et al. Research on key technologies of the ZDY25000LDK intelligent directional drilling equipment [J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50 (1):72-79.
- [4] 耿帅康.坚硬顶板薄煤层保护层开采卸压透透及瓦斯灾害治理技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2022.  
GENG Shuaikang. Research on pressure relief and permeability improvement and gas disaster control technology in mining of protective layer of hard roof and thin coal seam [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [5] 于占森.鄂北气田小井眼钻完井关键技术研究 & 应用[J].钻探工程,2023,50(6):136-144.  
YU Zhanmiao. Research and application of key technologies for drilling and completion of small holes in North Hubei Gas Field [J]. Drilling Engineering, 2023,50(6):136-144.
- [6] 麻朗朗,李田周,李宏智,等.孜拉山1888m无垂深超长水平孔钻进关键技术[J].钻探工程,2023,50(6):92-98.  
MA Langlang, LI Tianzhou, LI Hongzhi, et al. Key techniques of ultra-long horizontal hole drilling in Zira Mountain with no vertical depth at 1888 m [J]. Drilling Engineering, 2023, 50 (6): 92-98.
- [7] 张雪菲,张万栋,方胜杰,等.基于响应面半铰接式柔性钻杆球面密封结构优化设计[J].液压气动 & 密封,2023,43(10):92-99.  
ZHANG Xuefei, ZHANG Wandong, FANG Shengjie. Structural optimization design of semi-articulated flexible drill pipe spherical seal based on response surface [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2023,43(10):92-99.
- [8] 吕人杰,杨达明,王斌荣,等.白羊岭煤矿长距离定向高位钻孔治理上隅角瓦斯技术研究[J].山西冶金,2022,45(6):15-18.  
LÜ Renjie, YANG Daming, WANG Binrong, et al. Research on gas control technology of upper corner of Baiyangling Coal



- Mine by long distance directional high drilling[J]. Shanxi Metallurgy, 2022, 45(6):15-18.
- [9] 张朝举,方俊,杨亚黎,等.祁东煤矿近距离煤层群瓦斯治理顶板拦截定向钻孔试验[J].工矿自动化,2021,47(11):112-118.  
ZHANG Zhaoju, FANG Jun, YANG Yali, et al. Directional drilling test of roof interception for gas control in close-range coal seam group in Qidong Coal Mine[J]. Automation of Industry and Mine, 2021, 47(11):112-118.
- [10] 梅安平.定向钻杆接头螺纹胀扣失效分析[J].矿山机械, 2023, 51(8):11-15.  
MEI Anping. Failure analysis of threaded expansion joint of directional drill pipe[J]. Mining Machinery, 2023, 51(8):11-15.
- [11] 张宏杰,张杰,杨帅,等.碎软煤层高螺旋复合排渣定向钻进技术试验研究[J].煤炭工程,2022,54(10):62-67.  
ZHANG Hongjie, ZHANG Jie, YANG Shuai, et al. Experimental study on directional drilling technology of high spiral combined slag discharge in soft crushed coal seam[J]. Coal Engineering, 2022, 54(10):62-67.
- [12] 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.
- [13] Zhu X, Dong L, Tong H. Failure analysis and solution studies on drill pipe thread gluing at the exit side of horizontal directional drilling[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 33: 251-264.
- [14] 张幼振,石智军,田东庄,等.高强度大通孔钻杆接头圆锥梯形螺纹的有限元分析及改进设计[J].煤炭学报,2010,35(7): 1219-1223.  
ZHANG Youzhen, SHI Zhijun, TIAN Dongzhuang, et al. Finite element analysis and improved design for taper trapezium joint threads of high-strength drilling rod with big hole[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7): 1219-1223.
- [15] Shuai Luo, Wujun Wu. Effect of stress distribution on the tool joint failure of internal and external upset drill pipes[J]. Materials and Design, 2013, 52.
- [16] 赵建国,刘建林,鄢忠方.煤层顶板高位定向钻孔扩孔钻杆接头有限元分析[J].煤矿机械,2019,40(12):67-71.  
ZHAO Jianguo, LIU Jianlin, YAN Zhongfang. Finite element analysis of reaming drill pipe joints for high directional drilling of coal seam roof[J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(12): 67-71.
- [17] 王珣,张汝忻,邹家祥,等.API圆螺纹套管接头应力场分布实验[J].北京科技大学学报,2000(6):555-558.  
WANG Li, ZHANG Ruxin, ZOU Jiaxiang, et al. Experimental research of stress field distribution on API round thread casing connection[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2000(6):555-558.
- [18] 董亮亮.抗弯钻杆接头螺纹及弯曲疲劳行为研究[J].成都:西南石油大学,2015.  
DONG Liangliang. Research on thread and bending fatigue behavior of bending drill pipe joint[J]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [19] 李宝存.煤矿钻探用钻杆疲劳寿命预测分析[J].矿业装备, 2023(4):146-148.  
LI Baocun. Fatigue life prediction analysis of drill pipe for coal mine drilling[J]. Mining Equipment, 2023(4):146-148.
- [20] 焦文鸿.石油钻杆接头的疲劳分析[D].上海:华东理工大学, 2013.  
JIAO Wenhong. Fatigue analysis of oil drill pipe joints[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013.

(编辑 荐华)