

# 直连绳索取心钻杆分区热处理技术研究

何蕙岚<sup>1</sup>, 王久全<sup>\*1</sup>, 李秋玥<sup>1</sup>, 丁向忠<sup>1</sup>, 谷孝宾<sup>1</sup>,  
罗巍<sup>1</sup>, 吴树军<sup>1</sup>, 高科<sup>2,3</sup>, 赵研<sup>2,3</sup>, 李旭<sup>2,3</sup>

(1. 金石钻探(唐山)股份有限公司, 河北唐山 063000; 2. 吉林大学建设工程学院, 吉林长春 130026;  
3. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林长春 130026)

**摘要:** 为了提高绳索取心钻杆的性能, 对直连绳索取心钻杆的受力情况、结构特点以及传统处理工艺进行分析, 提出了分区热处理的工艺。通过对两端进行热加工处理, 使钻杆中间管体区域和两端热处理螺纹区域性能出现差异, 提高两端综合强度的同时改善螺纹部分的受力状态, 可使钻杆柱既具有高强度又兼具柔性, 大幅提高钻杆机械性能以及耐磨性。其中调质硬度 HRC33~38 在保证管体延伸率与正火、回火基本一致的情况下, 强度提高 37.7%, 硬度提高 40%, 抗冲击性提高 46.7%。调质硬度 HRC38~42 时, 材料的耐磨性提高 9.1%。更适合全液压钻机施工及深孔钻进, 为钻探施工提供了钻机、钻杆配套性的优选方案。

**关键词:** 直连绳索取心钻杆; 分区热处理; 综合机械性能; 调质硬度; 耐磨损

**中图分类号:** P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)03-0125-06

## Research on zone heat treatment technology of straight-connected wire-line core drill pipe

HE Huilan<sup>1</sup>, WANG Jiuquan<sup>\*1</sup>, LI Qiuyue<sup>1</sup>, DING Xiangzhong<sup>1</sup>, GU Xiaobin<sup>1</sup>,  
LUO Wei<sup>1</sup>, WU Shujun<sup>1</sup>, GAO Ke<sup>2,3</sup>, ZHAO Yan<sup>2,3</sup>, LI Xu<sup>2,3</sup>

(1. Jinshi Drill Tech Co., Ltd., Tangshan Hebei 063000, China;

2. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;

3. Key Laboratory of Drilling and Exploitation Technology in Complex Conditions, Ministry of Natural Resources (Jilin University), Changchun Jilin 130026, China)

**Abstract:** In order to improve the performance of the wire-line core drill pipe, the stress, structural characteristics and traditional treatment technology of the straight-connected wire-line core drill pipe were analyzed, and a zonal heat treatment process was proposed. Through the heat treatment of both ends, the heat treatment performance of the middle pipe body area and the thread area at both ends was different, and the comprehensive strength of both ends was improved while the stress state of the thread part was improved. It can make the drill pipe string have both high strength and flexibility, and greatly improve the mechanical properties and wear resistance of the drill pipe. The quenching and tempering hardness HRC33~38 can increase the strength by 37.7%, the hardness by 40% and the impact resistance by 46.7% under the condition that the elongation of the pipe body is basically the same as that of normalizing and tempering. When the quenching and tempering hardness is HRC38~42, the wear resistance of the material is increased by 9.1%. It is more suitable for full hydraulic drilling rig construction and deep hole drilling, and provides the optimal

收稿日期: 2023-12-17; 修回日期: 2024-04-01 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.03.016

基金项目: 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室与金石钻探(唐山)股份有限公司 2023 开放课题; 国家自然科学基金项目(编号: 42172345); 吉林大学研究生创新基金资助项目(编号: 2024CX103)

第一作者: 何蕙岚, 女, 汉族, 1974 年生, 高级工程师, 主要从事地质勘探钻探工具设备及相关研究工作, 河北省唐山市路北区韩城镇皂神庄村, tsjinshicy@163.com。

通信作者: 王久全, 男, 汉族, 1969 年生, 机电工程专业, 从事钻探工艺及钻具结构设计工作, 河北省唐山市路北区韩城镇皂神庄村, 1052213351@qq.com。

引用格式: 何蕙岚, 王久全, 李秋玥, 等. 直连绳索取心钻杆分区热处理技术研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(3): 125-130.

HE Huilan, WANG Jiuquan, LI Qiuyue, et al. Research on zone heat treatment technology of straight-connected wire-line core drill pipe[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(3): 125-130.

scheme for drilling rig and drill pipe matching.

**Key words:** straight-connected wire-line coring drill pipe; zone heat treatment; comprehensive mechanical properties; quenching and tempering hardness; wear-resistant

## 0 引言

近年来,绳索取心钻探技术有了飞跃式发展,国内绳索取心钻杆技术性能已达到甚至部分超过国际先进水平。钻杆柱作为钻进机具中重要的组成部分,具有起下钻头、施加钻压、传递动力、输送冲洗液、处理事故等诸多功能<sup>[1]</sup>。钻杆柱在孔内的受力情况十分复杂,除了要承受拉、压、弯曲、扭转等交变应力作用,还会受到震动、撞击、磨损、腐蚀等其他因素影响,导致钻杆柱成为钻进设备与工具中最薄弱的环节<sup>[2]</sup>。

钻杆柱并非一个整体,它是由多根钻杆通过螺纹连接在一起形成的。据统计,钻进过程中由于螺纹处失效造成钻杆折断的事故占总事故量的90%以上,因此钻杆螺纹连接部分是钻杆整体承载的薄弱环节,也是影响钻杆性能的关键部位<sup>[3-4]</sup>。

为了提高钻杆接头的连接性能,国内外学者从理论、试验及数值模拟等方面做了大量研究。陈波等<sup>[5]</sup>通过建立钻杆接头有限元模型,分析不同载荷形式下螺纹牙的应力场情况,发现梯形台阶面结构能有效改善接头螺纹扭矩的分布。况雨春等<sup>[6]</sup>建立钻具接头螺纹连接有限元模型,研究了弯曲载荷下钻具接头的连接强度并对关键结构参数进行优化,研究表明,优化后的连接螺纹在抗拉、抗压、抗扭矩及弯曲方面性能均优于原始API螺纹。张智等<sup>[7]</sup>建立了双台肩钻杆接头的三维数值仿真模型,利用有限元法研究了钻杆接头的上扣特性及其在复合载荷作用下的力学特性。ZHU Xiaohua等<sup>[8]</sup>建立了钻杆接头三维数值仿真模型,深入研究了水平定向钻探出口侧钻杆接头粘扣失效问题及其解决方案,分析了弯曲载荷对钻杆接头粘扣失效的影响规律,并改进了原有结构,得到了一种抗弯性能更强的钻杆接头。汪小平等<sup>[9]</sup>通过现场测试和理论分析研究了钻杆螺纹失效断口的宏观失效形貌、材料组织相变特征和钻杆接头受力等,并为预防此类失效提出了预防措施。Takano J等<sup>[10]</sup>利用二维有限元计算方法和试验评估相结合的手段,研发出适用于大轴向压缩载荷、高压环境级大曲率井眼且具有良好的密封性能的特殊接头螺纹。Tafreshi A<sup>[11]</sup>通过建

立接头螺纹的二维轴对称模型,分析了轴向载荷作用下的应力分布规律,通过傅里叶插值法分析了弯曲时接头螺纹的应力分布情况。

分区热处理是指对材料的不同区域,进行不同温度和时间加热、保温、冷却处理,最终使材料特定位置具有预期性能。蔡建明等<sup>[12]</sup>使用分区热处理方法制造出满足实际需要的航空发动机叶盘。池慧<sup>[13]</sup>对铝合金车轮进行分级分区淬火热处理,大幅降低外轮缘最大变形量。而在钻杆加工工艺角度方面,目前业界对高强度绳索取心钻杆普遍采用整体热处理方式,这种方法使得钻杆整体具有良好的刚性强度,但韧性较差。相关研究仅有彭莉等<sup>[14]</sup>对XJY850和XJY950两种材料的钻杆进行分区调质热处理,通过相关测试发现试制的钻杆具有螺纹端刚性强,中部韧性好的特点,并使用该钻杆顺利完成2845.55 m的钻井。

综上所述,目前国内外针对钻杆接头力学性能的研究主要集中在探究钻杆接头的应力分布特征,提高钻杆接头的抗疲劳性能,但从加工工艺的角度对钻杆进行优化的极少。为了提高钻杆柱的安全及可靠性,本文以N口径直连绳索取心钻杆为例,通过对其结构以及工作过程中的受力情况进行分析,了解其技术特点,由此制定分区热处理的工艺,使钻杆柱既具有高强度又兼具柔性的特点,以充分发挥绳索取心钻杆的综合性能,利于钻探施工。

## 1 直连绳索取心钻杆受力及结构分析

### 1.1 直连绳索取心钻杆受力分析

钻杆柱在孔内的工况随钻进方法、钻进工序及地层情况的不同而异。钻杆柱主要是在起下钻和钻进这两种条件下工作。在直孔中起下钻时,钻杆柱基本不接触孔底,整个钻杆柱处于悬挂状态,在自重作用下,钻杆柱处于受拉伸的直线稳定状态。

在正常钻进时,钻杆柱受力较为复杂。首先由于钻杆柱自身的偏心和由自重失稳而产生的弯曲,造成钻杆柱有一定的质量偏离回转中心。这些偏心质量在回转运动中产生离心力,促使钻杆柱进一步弯曲。这种弯曲会对钻杆柱造成十分严重的疲

劳破坏。其次,钻杆柱向孔底钻头传送所需钻压主要依赖于钻杆柱自身的重力以及钻机的加压或减压。因此,钻杆柱上存在着随孔口距离变化而变化的纵向拉压力<sup>[15]</sup>。最后当孔底岩石对钻头的回转阻力不断变化时,会引起钻杆柱的扭转振动,从而产生交变的剪应力。这种复杂的受力情况使得钻杆柱轴线一般呈变节距的空间螺旋弯曲曲线形状(如图1所示)。此外,钻杆还受到震动、撞击、磨损、液体压强等综合载荷作用,导致钻杆螺纹长期处于拉、压、弯、扭等交变应力中的一种或多种作用下,因此螺纹连接部位很容易出现磨损、断裂、挤压变形等,以至于引起提前失效<sup>[16]</sup>。

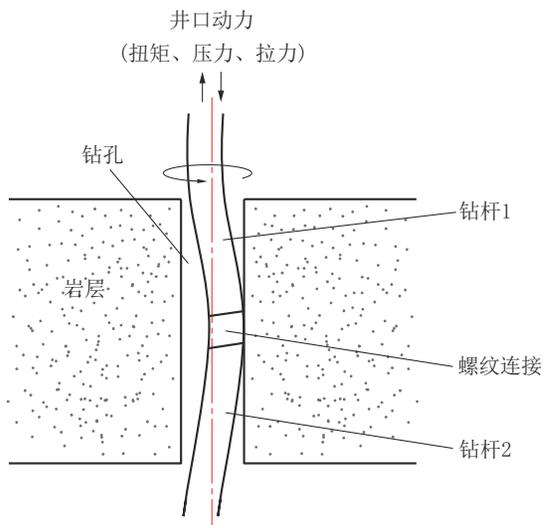


图1 钻杆柱局部运行示意

Fig.1 Local diagram of drill pipe column

## 1.2 直连绳索取心钻杆结构分析

为了确保钻杆质量,轧制的钢管必须经正火、回火或调质处理。由于钻杆柱在回转过程中经常与孔壁接触,为了强化表面的抗磨能力,钻杆表层必须经过高频淬火。但是为了不影响钻杆的抗疲劳性能,淬火加硬的表层深度必须控制在1 mm以内<sup>[17]</sup>。

钻杆连接螺纹是钻杆柱中最薄弱的部位,经常把钻杆端部加热使其向外或向内墩厚,成为端部外加厚或内加厚的钻杆。但由于绳索取心为满眼钻进工艺,钻头与钻杆柱外径相差不大,若通过端部加厚方式来提高钻杆柱螺纹机械性能,为了保证钻孔合理的内外环空间隙,就需要增加钻头唇面厚度,这样会降低钻进效率、增加钻探成本,也会受到

很多因素限制。

## 2 钻杆分区热处理对比试验

不改变钻杆两端结构,同时提高钻杆柱的强度,就需要突破现有思路,找到强化钻杆螺纹性能的新方法。

### 2.1 钻杆分区热处理工艺

如果单纯的将钻杆管体热处理,形成整体调质(HRC33~38)管体,然后加工钻杆螺纹,这样的钻杆刚性会全面提高,具有良好的刚性强度,但韧性欠佳,尤其是在深孔和破碎地层施工中刚性过强的钻杆容易发生钻杆折断等质量事故。其原因主要是刚性较强的长钻杆很难弯曲,在回转过程中,刚性最强的螺纹连接处始终受扭转载荷,而杆体部分也由于韧性不好,无法吸收部分弯曲能量,而使螺纹连接处的载荷继续加大,最后导致在深孔段钻进时螺纹连接处断裂<sup>[14]</sup>。因此管体强度、刚性较高,反而相对弱化了螺纹的机械性能。

本文通过优化热处理加工的方式,优化钻杆体结构,改善钻进施工中单根钻杆两端的受力状态,达到提高钻杆柱螺纹综合承载能力的目的。具体方法是通过对两端进行热处理加工,使钻杆中间管体区域和两端螺纹区域热处理性能出现差异,使钻杆成为“弹性”体,弹性钻杆具有缓冲特性,能在提高两端综合强度的同时有效改善螺纹部分的受力状态,从而提高钻杆柱的综合性能。这种两端热处理工艺钻杆叫做“分区热处理钻杆”。

图2是分区热处理钻杆体示意图:钻杆体两端一定长度范围(100~150 mm)内通过热机械加工以提高管体硬度、强度;钻杆体中间部分保持正火态,正火态管体与两端调质过渡部分(10~20 mm)为回火去应力形态。分区热处理钻杆有3大技术优势:(1)钻杆体两端螺纹部分硬度、强度高、耐磨性好,同时具有优良的连接强度;(2)管体中间部分和两端过渡部位持有足够的韧性和弹性;(3)回火能够为过渡部分消除应力集中。使钻杆成为两端硬度、强度高,耐磨性强,中间体及过渡带硬度、刚度适中,同时具有塑性及韧性较好的弹性体,能在钻进过程中充分发挥各部位的力学性能。

### 2.2 性能实验

分区热处理钻杆选用材质为45MnMoB优质合金无缝钢管,管体规格 $\text{O}71\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ ,为地质岩

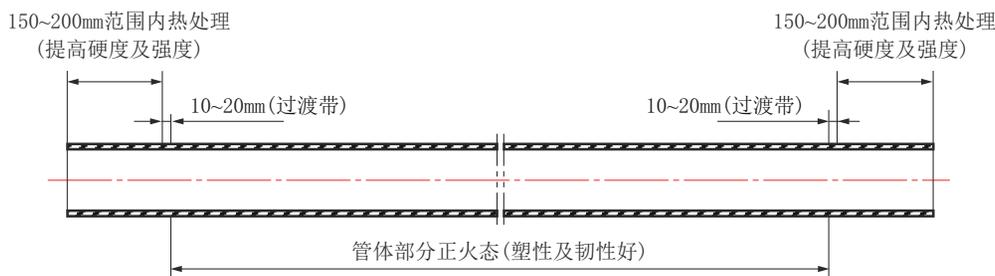


图2 分区热处理钻杆体形式

Fig.2 Sectional heat treatment drill pipe form diagram

心钻杆广泛适用,首先对正火态、回火态及3种不同调质态的管体进行力学性能及硬度测试,其结果如表1所示。

表1 45MnMoB材料管体不同热处理状态性能

Table 1 45MnMoB tube body different heat treatment state performance

序号	处理方式	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%	平均洛氏硬度(HRC)	平均冲击功/J
1	正火	826	670	16	24.45	13.7
2	回火	820	692	18	27.08	14.5
3	调质1	990	850	14	30.72	19.2
4	调质2	1137	941	15	33.34	20.1
5	调质3	1152	1147	11	34.54	12.5

随后对3种调质硬度(HRC30~35, HRC33~38, HRC38~42)下的管体进行磨损实验,将管体加工成统一尺寸的样件并编号使其与ZT850钢级材料进行往复对磨,使用电子天平称量试验前后管体的质量变化,称量结果如表2所示。

从表1中可以看出,管体经过调质后,抗拉强度、屈服强度以及硬度普遍呈现明显提升趋势,这对于钻杆来说是十分有益的;而冲击功会根据调质态变化而变化。其中第二种调质态在保证管体延伸率与正火、回火基本一致的情况下,强度提高37.7%,硬度提高40%,抗冲击性提高46.7%,具有十分优良的力学性能。在屈服强度条件下,该种管体理论上承受极限拉力载荷为975 kN,考虑2倍的安全系数,该钻杆体能够承受487 kN拉力,可以满足5972 m长度的管体重力,满足钻进需求。

从表2可以看出,随着调质硬度的提升,管体的磨耗比逐渐减小,耐磨性逐渐增加,这对提高钻杆寿命十分有利,当调质到HRC38~42时,材料的耐

表2 磨损实验结果

Table 2 Wear test result

试样	磨前质量/g	磨后质量/g	质量差/g	磨耗比/%	
试样1 (45MnMoB调质态, HRC30~35)	①	5.59	5.49	0.10	1.79
	②	5.51	5.41	0.10	1.81
	③	5.50	5.40	0.10	1.82
	④	5.77	5.67	0.10	1.73
	⑤	5.43	5.32	0.11	2.03
平均值				1.84	
试样2 (45MnMoB调质态, HRC33~38)	①	5.38	5.30	0.08	1.49
	②	5.59	5.51	0.08	1.43
	③	5.39	5.30	0.09	1.67
	④	5.41	5.33	0.08	1.48
	⑤	5.45	5.35	0.10	1.83
平均值				1.58	
试样3 (45MnMoB调质态, HRC38~42)	①	5.53	5.45	0.08	1.45
	②	5.40	5.33	0.07	1.30
	③	5.56	5.49	0.07	1.25
	④	5.52	5.44	0.08	1.45
	⑤	5.53	5.46	0.07	1.32
平均值				1.354	
试样4 (ZT850调质态, HRC33~38)	①	5.66	5.56	0.10	1.77
	②	5.69	5.61	0.08	1.41
	③	5.68	5.59	0.08	1.41
	④	5.69	5.61	0.08	1.41
	⑤	5.62	5.54	0.08	1.42
平均值				1.49	

磨性提高9.1%。

金相组织分析可以有效地判断热处理淬火加热温度、保温时间、冷却速度等是否合适,为调整工序及修改工艺参数提供依据,并指导生产。为此,我们对试验钻杆分段进行了金相检测,具体检测分

析情况如图3所示。材料经过调质后,金相组织由珠光体+铁素体变为回火索氏体组织,且分布均匀,金属晶粒度由4级变为7级。

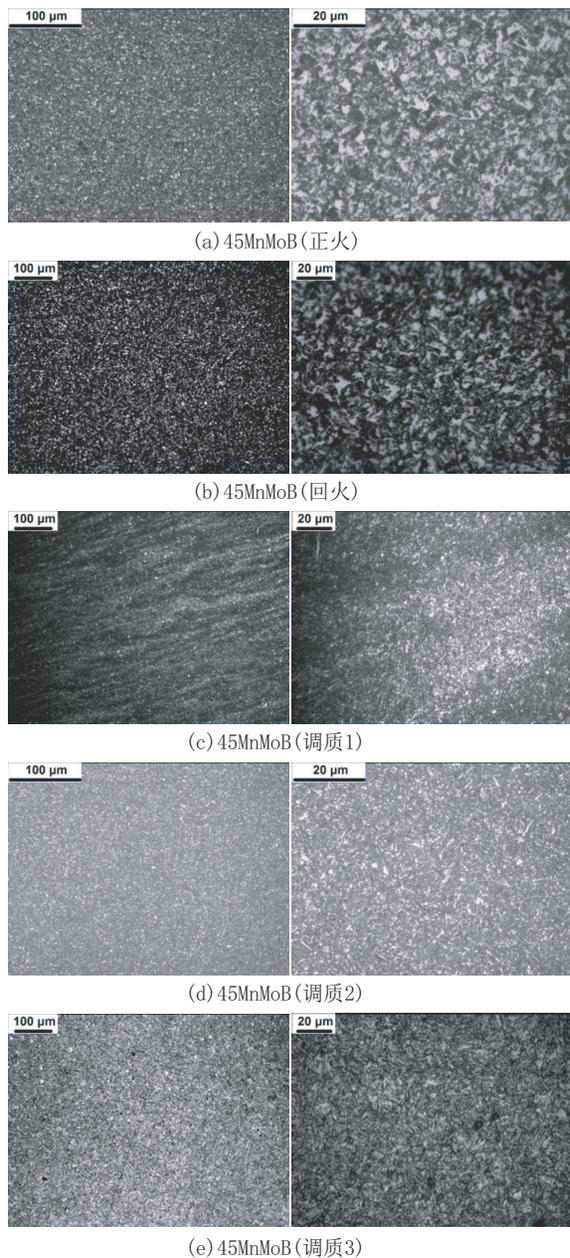


图3 45MnMoB 管体不同热处理状态金相测试

Fig.3 45MnMoB tube body different heat treatment state metallographic test

综合上述实验可以看出,热处理后材料的抗拉强度、表面硬度、抗冲击力,螺纹表面精度、耐磨性等综合指标都有大幅提高。通过分区热处理工艺,对管体两端螺纹部位进行调质处理,能大幅提高其硬度、强度、冲击韧性及耐磨性等性能;管体中间部

分保持正火态,硬度适中,性能满足钻进要求;调质和正火态之间的过渡部分为回火去应力状态,克服了从正火态到调质态管体产生的应力集中,使管体具有了弹簧性质的缓冲,成为了塑性及韧性较好的弹性体。

钻杆柱处于运行状态时,会受压力弯曲和扭矩力交替综合作用。分区热处理后的钻杆具有良好的韧性和弹塑性,钻杆体在一定限度内有预形变缓冲,抵消一部分刚性作用力,不会对钻杆螺纹形成即时冲击,螺纹部分受到的冲击力及形变会减轻或部分抵消,从而形成对螺纹的保护。同时,钻杆本体的形变一般在弹性范围内,不会因压力或扭矩产生永久变形。

综合来看,分区热处理绳索取心钻杆从结构上更有优越性和合理性,直连绳索取心钻杆配套全液压力头钻机,设备精度高,能够优势互补、性能互补;与常规型、镦粗型绳索取心钻杆产品技术相比,直连钻杆采用公母扣自接形式,钻杆柱螺纹接头数少,直线度累计误差小,精度高,在钻探施工中利于高效进尺及高精度钻孔的实现。根据施工状况,分区热处理钻杆在全液压力头钻机施工中受到交变冲击,钻杆体的“弹塑性”特征对丝扣螺纹起到一定的保护作用,施工正常情况下扭矩小于钻杆螺纹上扣预紧力,上扣预紧力发挥过载保护作用,钻杆柱相当于有自我调节修正能力,利于高转数开启及延伸钻探,钻进阻力小,钻进时效更高,钻杆柱更安全可靠,更适应钻探施工的工况。

### 3 结论

绳索取心钻进工艺中,钻杆的安全性是首要考虑因素,而整个钻杆柱中最薄弱的环节为螺纹部分,合理的结构能改善钻杆应用效果。为了提高钻杆的整体性能,通过对钻杆的结构特点以及在孔内的受力情况进行分析,确定了钻杆进行分区热处理工艺并进行性能实验,最终得到以下结论:

(1) 钻杆管体经过调质处理后,抗拉强度、屈服强度以及硬度普遍呈现明显提升趋势,其中调质硬度 HRC33~38 能在保证管体延伸率与正火、回火基本一致的情况下,强度提高 37.7%,硬度提高 40%,抗冲击性提高 46.7%。随着调质硬度的提升,管体的磨损比逐渐减小,耐磨性增加,这对提高钻杆寿命十分有利,当达到 HRC38~42 时,材料的耐磨性

提高9.1%。可根据实际钻进需要选择不同的调质硬度。

(2)分区热处理后的钻杆具有良好的韧性和弹塑性,钻杆体在一定限度内有预形变缓冲,抵消一部分刚性作用力,螺纹部分受到的冲击力及形变会减轻或部分抵消,从而形成对螺纹的保护,提高钻杆的整体寿命。

### 参考文献(References):

- [1] 李昊轩,王清岩,金贻伍,等.单机械手夹持状态下钻杆运移平稳性分析[J].钻探工程,2022,49(3):76-82.  
LI Haoxuan, WANG Qingyan, JIN Zengwu, et al. Analysis of smooth movement of drill pipes clamped with a single manipulator[J]. Drilling Engineering, 2022,49(3):76-82.
- [2] 苏继军,殷琨,郭彤彤.金刚石绳索取心钻杆接头螺纹的优化研究[J].吉林大学学报,2005,35(5):677-680.  
SU Jijun, YIN Kun, GUO Tongtong. Optimization of the joint-thread of diamond wire-line coring drill pipe[J]. Journal of Jilin University, 2005,35(5):677-680.
- [3] 李驰,曹阳,李金彪.螺旋槽定向钻杆螺纹强度分析[J].煤矿机械,2019,40(5):69-71.  
LI Chi, CAO Yang, LI Jinbiao. Strength analysis of directional drill stem thread with spiral groove[J]. Coal Mine Machinery, 2019,40(5):69-71.
- [4] 尹浩,梁健,孙建华,等.地质特深孔绳索取心钻杆机械性能研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):58-64.  
YIN Hao, LIANG Jian, SUN Jianhua, et al. Research on mechanical properties of wireline coring drill pipe for geological ultra-deep hole[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):58-64.
- [5] 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.
- [6] 况雨春,陈永龙,闵桃源.小井眼开窗侧钻用高抗弯钻具接头性能分析与结构参数优化[J].中国机械工程,2019,30(24):3010-3017.  
KUANG Yuchun, CHEN Yonglong, MIN Taoyuan. Performance analysis and structural parameter optimization of high bending drilling tool joints for slim hole window sidetracking[J]. China Mechanical Engineering, 2019,30(24):3010-3017.
- [7] 张智,祝效华.钻杆接头多轴疲劳寿命[J].石油学报,2019,40(7):839-845.  
ZHANG Zhi, ZHU Xiaohua. Multiaxial fatigue life of drill pipe joint[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019,40(7):839-845.
- [8] 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, 2013,33:251-264.
- [9] 汪小平,刘永刚,郑山琳,等.Ø101.6 mm钻杆外螺纹接头断裂失效分析[J].金属热处理,2019,44(S1):523-527.  
WANG Xiaoping, LIU Yonggang, ZHENG Shanlin, et al. Fracture failure analysis on Ø101.6mm pin tool-joint[J]. Heat Treatment of Metals, 2019,44(S1):523-527.
- [10] Takano J, Yamaguchi M, Kunishige H. Development of premium connection "KSBEAR" for with standing high compression, high external pressure, and severe bending[J]. Kawasaki Steel Technical Report English Edition, 2002(47):14-22.
- [11] Tafreshi A. SIF evaluation and stress analysis of drillstring threaded joints[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1999,76(2):91-103.
- [12] 蔡建明,李娟,田丰,等.先进航空发动机用高温钛合金双性能整体叶盘的制造[J].航空制造技术,2019,62(19):34-40.  
CAI Jianming, LI Juan, TIAN Feng, et al. Manufacturing of high temperature titanium alloy dual-property blisk used for advanced aero-engine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019,62(19):34-40.
- [13] 池慧.轻质铸造铝合金车轮热处理变形调控关键技术研究[D].秦皇岛:燕山大学,2023.  
CHI Hui. Research on the key technology of heat treatment deformation control of light weight casted aluminum alloy wheel [D]: Qinhuangdao: Yanshan University, 2023.
- [14] 彭莉,梁健,蔡纪雄,等.深孔用高强度绳索取心钻杆分区热处理工艺试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(9):14-19.  
PENG Li, LIANG Jian, CAI Jixiong, et al. The experimental study on the partition heat treatment process of high grade wireline coring rod[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(9):14-19.
- [15] 罗怀晓,张剑,齐丽娜.20CrMo钢石油钻杆受力分析与热处理工艺研究[J].热加工工艺,2017,46(20):211-213.  
LUO Huaixiao, ZHANG Jian, QI Lina. Study on heat treatment process and force analysis for oil drill pipes of 20CrMo [J]. Hot Working Technology, 2017,46(20):211-213.
- [16] 杨芳,陈师逊.深部地质钻探钻孔结构设计与施工分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(11):21-26.  
YANG Fang, CHEN Shixun. Analysis of design and construction of deep geo-drilling boreholes[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(11):21-26.
- [17] 李玉民.气体钻井用Ø139.7 mm钻杆DS55螺纹接头断裂原因分析[J].石油管材与仪器,2022,8(4):85-89.  
LI Yumin. Analysis on DS55 joint fracture of Ø139.7mm drill pipe in air drilling[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2022,8(4):85-89.

(编辑 荐华)