

地质特深孔绳索取心钻杆机械性能研究

尹浩¹, 梁健¹, 孙建华¹, 彭莉², 郭宝科³, 李鑫淼¹, 蔡纪雄², 刘秀美¹

(1.中国地质科学院勘探技术研究所,河北廊坊 065000; 2.中地装(无锡)钻探工具有限公司,江苏无锡 214174;
3.西安建筑科技大学,陕西西安 710055)

摘要:地质特深孔绳索取心钻杆结构区别于 API 石油钻杆,其机械性能计算不可直接引用 API 石油钻杆的相关理论公式。针对这一理论依据与计算方法缺失,本文对地质特深孔双台肩钻杆接头进行了受力分析,开展了钻杆接头拉伸载荷与扭转载荷计算理论研究,构建了绳索取心钻杆机械性能计算的理论方法。同时,通过有限元分析和台架试验,确定了 H-5000 规格双台肩绳索取心钻杆的机械性能,验证了计算方法的准确性,并提出了钻杆结构改进建议与下一步研究方向,为高性能薄壁绳索取心钻杆“服役”于 5000 m 地质岩心钻探工程提供了技术支撑。

关键词:特深孔;岩心钻探;绳索取心钻杆;双台肩;机械性能;上扣扭矩

中图分类号:P634.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)04-0058-07

Research on mechanical properties of wireline coring drill pipe for geological ultra-deep hole

YIN Hao¹, LIANG Jian¹, SUN Jianhua¹, PENG Li²,

GUO Baoke³, LI Xinmiao¹, CAI Jixiong², LIU Xiumei¹

(1.Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;

2.CGE Group Wuxi Drilling Tools Co., Wuxi Jiangsu 214174, China;

3.Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055, China)

Abstract: wireline coring drill pipe for geological ultra-deep hole is structurally different from the API oil drill pipe; thus their mechanical properties cannot be determined by the relevant formulas of API oil drill pipe directly. In view of the lack of theoretical basis and calculation method, this paper analyzes the stress of the double shoulder drill pipe joint for geological ultra-deep hole, carries out the theoretical research on the calculation of tensile load and torsional load for the tool joint, and develops the theoretical calculation model of the wireline coring drill pipe's mechanical properties. Through the finite element analysis and property test, the mechanical properties of the H-5000 drill pipe are determined, and the accuracy of the calculation method is verified. The proposals for improving the drill pipe structure and the next research direction are put forward, which provide technical support for deployment of the high-performance thin-wall wireline coring drill pipe in the 5000m geological core drilling works.

Key words: ultra-deep hole; core drilling; wireline coring drilling pipe; double shoulder; mechanical properties; make-up torque

0 引言

在钻探施工过程中,钻杆柱作为联通地表到孔底的介质,起到泥浆输送、扭矩传递、钻压施加、钻头

替换的作用,期间钻杆工况和受力复杂,尤其随着孔深增加,钻杆自重、孔壁摩阻随之增大,钻杆接头主要由于过度受拉或受扭而提前发生结构失效^[1-3]。

收稿日期:2020-02-10 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.04.009

基金项目:国家重点研发计划项目“5000 米智能地质钻探技术装备研发及应用示范”课题三“高性能薄壁绳索取心钻杆研制”(编号:2018YFC0603403);国家自然科学基金面上项目“科学超深井铝合金钻杆的腐蚀防护机制研究”(编号:41772390);中国地质调查局地质调查项目“深海钻探技术与工程支撑”(编号:DD20190585)

作者简介:尹浩,男,回族,1987 年生,工程师,硕士,地质工程专业,从事钻探工艺和钻具研发工作,河北省廊坊市金光道 77 号,837275137@qq.com。

引用格式: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 drill pipes for geological ultra-deep holes [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):58-64.

针对这种情况,在常规绳索取心钻杆基础上参考 API 石油钻杆设计理念,并兼顾“满眼”钻进工艺环空小、压损大的特点,通过钻杆接头内外壁适当加厚、采用双台肩^[4-6]等措施,提高钻杆抗拉、抗扭等能力,并通过工况受力与结构尺寸分析,完成了 5000 m 特深孔地质岩心钻探用绳索取心钻杆等强度设计,确定了 H、P、S 规格钻杆结构尺寸参数^[7]。由于地质特深孔用绳索取心钻杆结构区别于 API 石油钻杆,其机械性能理论计算不可直接引用 API 石油钻杆的相关公式^[8]。对于钻杆接头结构性能研究,前人止步于受力理论分析和有限元模型计算^[9-15],未建立钻杆接头结构参数与机械性能之间的关系式,在实际进行钻杆机械性能计算时不便于应用。针对绳索取心钻杆设计理论依据与计算方法缺失,为保证钻杆在安全载荷范围内工作和确保 5000 m 地质特深孔钻探工程示范顺利进行,需要对设计钻杆的抗拉和抗扭等关键机械性能参数进行理

论分析研究,建立钻杆接头结构参数与机械性能之间的模型,并结合有限元仿真分析和台架试验,验证模型的合理性和可靠性,更好地指导该钻杆“服役”于 5000 m 地质特深孔钻探工程应用,并为大陆科学特深钻井及大洋深水深井钻探工程的钻杆选型提供理论支撑^[16]。

1 5000 m 地质岩心钻探用钻杆结构

依据等强度设计原则,综合考虑碎岩效率、环空压耗、管柱强度、内管打捞投放以及孔口操作等事宜,设计完成了 5000 m 地质岩心钻探用 H、P、S 规格绳索取心钻杆,本文依次命名 H-5000、P-5000、S-5000。为便于加工,在保证原有强度的前提下对接头内、外径进行了圆整,圆整后的钻杆尺寸参数与常规薄壁型绳索取心钻杆尺寸参数^[17]对比如表 1 所示。

表 1 钻杆结构尺寸参数
Table 1 Structural parameters of drill pipes

钻 杆 规 格		钻杆管体 $d_o \times d_i \times S$ / mm	钻杆接头 $D_o \times D_i$ / mm	螺纹大端小径 d / mm	锥度 <i>Cone</i>	螺纹长 L / mm	螺距 P / mm	牙高 h / mm
常规 钻杆	H	89.00/81.00/4.00	89.00/78.00	82.76	1 : 28.65	45	8	0.8
	P	114.00/106.00/4.00	114.00/102.00	107.05	1 : 28.65	64	12	0.9
	S							
改进 钻杆	H-5000	88.90/77.90/5.50	96.00/69.90	87.18	1 : 12	70	8	1.3
	P-5000	114.30/100.54/6.88	120.50/94.00	109.14	1 : 12	75	8	1.3
	S-5000	139.70/125.36/7.17	146.00/123.00	139.06	1 : 12	80	10	1.5

注: d_o 为管体外径, d_i 为管体内径, S 为管体壁厚, D_o 为接头外径, D_i 为接头内径。

2 钻杆受力分析与性能理论计算

为保证上述钻杆顺利“服役”于 5000 m 地质特深孔钻探工程应用,需要对设计钻杆的极限拉伸和极限扭转载荷等关键机械性能参数进行理论分析,明确钻杆抗拉与抗扭能力,同时为了避免钻杆受到的交变应力对螺纹部分的影响,需要确定钻杆连接的推荐上扣扭矩。

2.1 受力分析

根据 5000 m 特深孔钻杆设计分析,公接头为钻杆的薄弱部分,因此,以公接头为研究对象,开展受力分析,参见图 1。在接头通过螺纹相互旋入拧紧的过程中,由于螺旋升角和双台肩面的结构约束,随着公、母接头相对旋转,公螺纹沿轴向持续产生位移且台肩面挤压程度逐渐加剧,直到公接头根部发

生屈服变形。此时,公接头主台肩与副台肩分别受到向左的轴向力 F_1 、 F_2 ,公螺纹受到相反方向的轴向力 F_t ,公接头杆体连接端受到的扭矩为 T ^[18-20]。

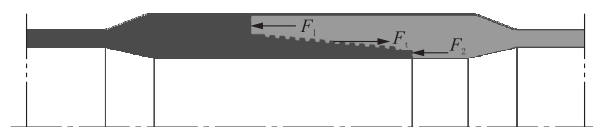


图 1 公接头受力示意

Fig.1 Axial force diagram of the pin end

根据力的平衡方程可知:

$$F_1 \mu r_1 + F_2 \mu r_2 + F_t r_1 U = T \quad (1)$$

$$F_t = F_1 + F_2 \quad (2)$$

式中: F_1 ——公接头主台肩受到的轴向力, N;
 μ ——接触面摩擦系数,取 0.1; r_1 ——作用于主台肩的摩擦力产生扭矩的等效力臂,取 $0.25[D_o + (d + 2h)]$, mm; F_2 ——公接头副台肩受到的轴向力,

$N; r_2$ ——作用于副台肩的摩擦力产生扭矩的等效力臂,取 $0.25[d - (L - 2P)Cone + D_i]$, mm;
 F_t ——公螺纹受到的轴向力, N; r_t ——作用于螺纹牙侧面的摩擦力产生扭矩的等效力臂,取 $0.25[d - (L - 2P)/2 \cdot Cone + h]$, mm; U ——梯形螺纹切向力转换系数,取 $\tan(\rho' + \psi)$; ρ' ——当量摩擦角^[21], $\rho' = \arctan\{\mu / \cos[\arctan(\tan\beta \tan\psi)]\}$, ($^\circ$); β ——牙型半角,一般取 15° ; ψ ——螺纹螺旋升角, $\arctan[P/(2\pi r_t)]$, ($^\circ$); T ——公接头杆体连接端受到的扭矩, N·mm。

由于设计的公、母接头螺纹长度相等,且主、副台肩轴向长度均为单个螺距长度,则在接头相互拧紧的过程中,主、副台肩受到的轴向应变相等。根据胡克定律可知主、副台肩受到的轴向应力相等,所以 F_1 与 F_2 的比值等于主、副台肩接触面积之比,即:

$$\frac{D_o^2 - (d + 2h)^2}{[d - (L - 2P)Cone]^2 - D_i^2} = \frac{F_1}{F_2} \quad (3)$$

取主、副台肩接触面积比值 $C = [D_o^2 - (d + 2h)^2] / [d - (L - 2P)Cone]^2 - D_i^2$, 则:

$$F_1 = CF_2 \quad (4)$$

设公螺纹大端根部横截面受到的扭矩与轴向力分别为 T_w 、 F_w , 根据力的平衡方程可知:

$$T_w = T - F_1 \mu r_1 \quad (5)$$

$$F_w = F_1 \quad (6)$$

公螺纹大端根部横截面作为危险截面,根据第四强度理论得:

$$\sqrt{(F_w/A)^2 + 3(T_w/W)^2} = \sigma_s \quad (7)$$

式中: F_w ——公螺纹大端根部横截面受到的轴向力, N; A ——危险截面面积,取 $0.25\pi(d^2 - D_i^2)$, mm²; T_w ——公螺纹大端根部横截面受到的扭矩, N·mm; W ——危险截面扭转截面系数,取 $0.0625\pi(d^4 - D_i^4)/d$, mm³; σ_s ——钻杆材料屈服强度, MPa。

将公式(5)、(6)代入公式(7),并结合公式(1)、(2)、(4),解关于 F_1 、 F_2 、 F_t 、 T 的四元二次方程组得:

$$\begin{cases} F_1 = \frac{\sigma_s ACW}{\sqrt{C^2 W^2 + 3A^2 (r_2 \mu + r_t U + r_t UC)^2}} \\ F_2 = \frac{\sigma_s AW}{\sqrt{C^2 W^2 + 3A^2 (r_2 \mu + r_t U + r_t UC)^2}} \\ F_t = \frac{\sigma_s AW(1+C)}{\sqrt{C^2 W^2 + 3A^2 (r_2 \mu + r_t U + r_t UC)^2}} \\ T = \frac{\sigma_s AW(r_1 \mu C + r_2 \mu + r_t U + r_t UC)}{\sqrt{C^2 W^2 + 3A^2 (r_2 \mu + r_t U + r_t UC)^2}} \end{cases} \quad (8)$$

根据推荐上扣扭矩的旋转应力值为 $0.6\sigma_s$ ^[8], 可知上扣扭矩为:

$$T_{0.6} = \frac{0.6\sigma_s AW(r_1 \mu C + r_2 \mu + r_t U + r_t UC)}{\sqrt{C^2 W^2 + 3A^2 (r_2 \mu + r_t U + r_t UC)^2}} \quad (9)$$

在进行钻杆接头抗拉强度计算时,对于用推荐上扣扭矩旋紧的钻杆接头,其两端受到逐渐增加的轴向拉伸载荷作用过程中,当 $0 \leq F \leq 0.6F_t$ 时,公接头危险截面受到的轴向力小于 $0.6F_t$; 当 $F > 0.6F_t$ 后,台肩面相互分离而失去密封能力,公接头危险截面受到的轴向力等于 F ,直到屈服或断裂。因此,危险截面断裂时横截面受到的轴向力等于拉伸载荷 F ,假设此时忽略扭矩作用,则钻杆接头抗拉强度为:

$$F = \sigma_b A \quad (10)$$

式中: F ——接头抗拉强度, N; σ_b ——钻杆材料抗拉强度, MPa。

2.2 机械性能计算

取钻杆材料的抗拉强度 σ_b 与屈服强度 σ_s 分别为 1050 MPa 和 931 MPa,则根据上述分析结论,结合表 1 改进钻杆尺寸参数,计算得到 H-5000、P-5000、S-5000 钻杆的机械性能与推荐上扣扭矩如表 2 所示。根据计算结果可以看出,根据等强度设计原则的钻杆的管体与接头的机械性能数值存在差异,这是由于钻杆接头尺寸是考虑“服役”工况下的公、母接头强度相等且考虑环空压耗、绳索取心工艺确定的,而此处钻杆机械性能是分别对极限拉伸和极限扭转载荷计算的值。

表 2 双台肩绳索取心钻杆机械性能与上扣扭矩

Table 2 Mechanical properties and make-up torques of double shoulder wireline coring drill pipe

钻杆规格	抗拉强度/kN		拉伸屈服强度/kN		抗扭强度/(kN·m)		扭转屈服强度/(kN·m)		推荐上扣扭矩/ (kN·m)
	管体	接头	管体	接头	管体	接头	管体	接头	
H-5000	1513.1	1858.6	1341.6	1648.0	34.3	28.9	30.4	25.6	15.4
P-5000	2437.9	2536.4	2161.6	2248.9	71.3	51.3	63.3	45.5	27.3
S-5000	3134.5	2790.1	2779.3	2473.9	114.1	72.2	101.2	64.0	38.4

3 有限元分析

钻杆之间通过接头螺纹相互连接,公螺纹与母螺纹之间的受力分析涉及材料非线性、几何非线性和接触非线性,因而要建立完整而精确的数学模型,并求得解析解非常困难^[22]。目前,主要是应用计算力学的方法借助模拟分析软件进行求解,如 Abaqus 有限元分析软件。

3.1 三维建模与网格划分

基于 H-5000 双台肩钻杆接头三维建模,通过分块网格划分法对钻杆接头进行网格划分,螺纹部分使用精细网格,螺纹基体使用相对稀疏的网格,整个有限元模型的单元数与节点数见表 3。

表 3 有限元模型单元数与节点数

部 位	公接头基体	公接头螺纹	母接头基体	母接头螺纹
节点个数	12800	21880	10800	23076
单元个数	9280	10935	7040	11532

模型考虑了螺纹的螺旋升角,可以精确的模拟螺纹根部的应力集中和螺纹面上的接触压力,网格划分见图 2 所示。

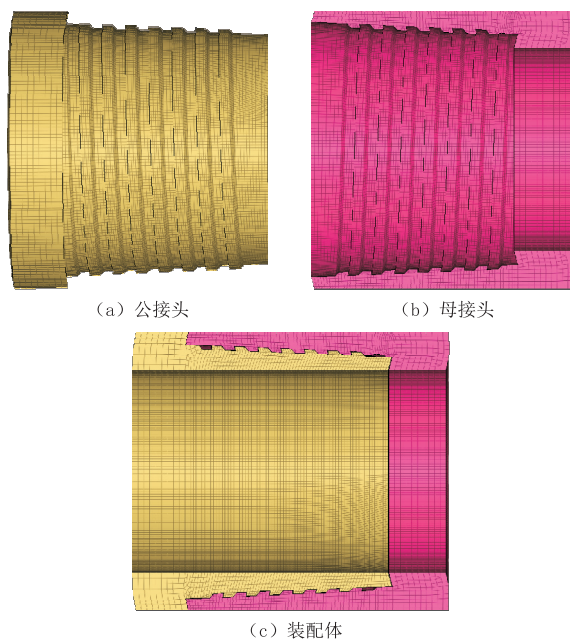


图 2 接头三维模型网格划分

Fig.2 Three-dimensional finite element model for the box connection

3.2 边界条件与位移约束

通过定义边界条件与施加位移约束,固定母接头杆体端,并对公接头沿轴向施加 3 mm 准静态拉伸位移,模拟钻杆接头拉伸破坏过程,钻杆接头应力

云图如图 3 和图 4 所示。

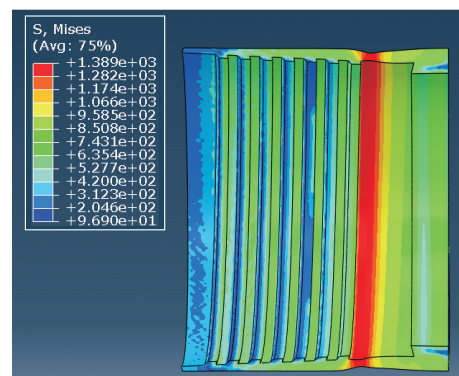


图 3 母接头拉伸应力云图

Fig.3 Stress nephogram of the box end under tension

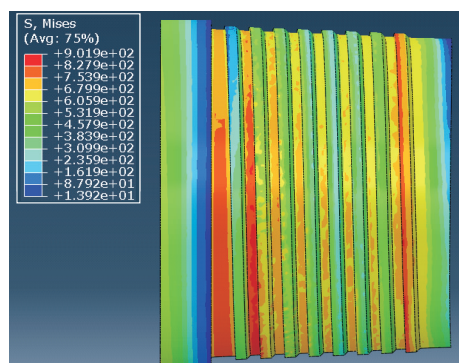


图 4 公接头拉伸应力云图

Fig.4 Stress nephogram of the pin end under tension

通过定义边界条件与施加位移约束,固定母接头杆体端,并对公接头沿上扣转动方向周向施加 180°准静态角位移,模拟钻杆接头扭转破坏过程,钻杆接头应力云图如图 5 和图 6 所示。

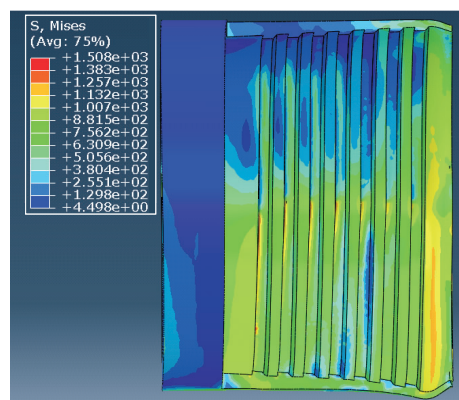


图 5 母接头扭转应力云图

Fig.5 Stress nephogram of the box end under torsion

3.3 模拟结果

在钻杆接头的有限元分析过程中,材料的弹塑性屈服判据为 von Mises 屈服准则,即在一定的变

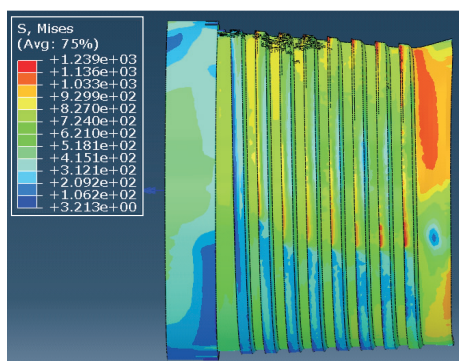


图6 公接头扭转应力云图

Fig.6 Stress nephogram of the pin end under torsion

形条件下,当材料的单位体积形状改变的弹性位能(又称弹性形变能)达到材料极限值时,材料发生屈服。在约束位移的作用下,当接头内部某单元的等效应力达到材料的屈服强度时,对应载荷为接头屈服强度;当接头内部某单元的等效应力达到材料的抗拉强度时,对应载荷为接头抗拉强度^[23-24]。

通过后处理分析,H-5000 钻杆接头的抗拉强度为 1946.0 kN,抗扭屈服强度为 24.0 kN·m。模拟值与理论计算值存在一定的差异,这是由于模拟的网格划分、约束定义及软件内部算法误差等原因导致的。

4 台架测试与结果对比

4.1 试制与测试

根据 H-5000 钻杆结构尺寸参数,试制了钻杆接头 4 副,其中 2 副用于拉伸破坏试验(如图 7),2 副用于扭转屈服试验(如图 8),进行理论与试验对比分析研究。通过 3000 kN 拉力试验机夹持试件两端并匀速拉伸,进行钻杆接头拉伸破坏试验,通过微机数控扭转试验机夹持试件两端并匀角速度扭转,实施钻杆接头扭矩屈服试验,验证钻杆结构设计的合理性与先进性,如图 9 和图 10 所示。

扭转试验表明,H 规格钻杆接头试件两端施加扭矩达到 27.3 kN·m 时,主台肩发生涨扣;拉伸试验表明,对于手动拧紧的 H 规格钻杆接头试件两端施加拉伸载荷达到 1906 kN 时,公、母接头同时在螺纹根部发生断裂,对于施加了 27.3 kN·m 上扣扭矩的 H 规格钻杆接头试件两端施加拉伸载荷达到 1884 kN 时,公螺纹根部发生断裂,两种情况下的断口如图 11、图 12 所示。施加上扣扭矩接头试件抗拉强度与手动拧紧接头试件相差 1.2%,因此



图7 拉伸破坏试件

Fig.7 Specimens for tensile failure test

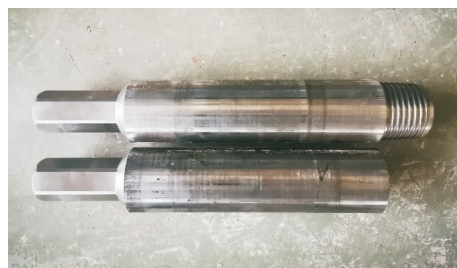


图8 扭转屈服试件

Fig.8 Yield torsion specimen

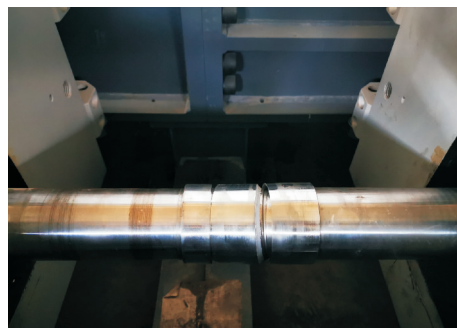


图9 拉伸破坏试验

Fig.9 Tensile test



图10 扭转破坏试验

Fig.10 Yield torsion test

在计算推荐上扣扭矩拧紧钻杆接头抗拉强度时,可以忽略扭矩影响,按公式(10)进行计算。



图 11 手动拧紧试件断裂情况

Fig.11 Fracture of manual tightened specimens



图 12 上扣扭矩拧紧试件断裂情况

Fig.12 Fracture of make-up test specimens

4.2 结果对比

综合理论计算、有限元仿真、台架测试对比结果如表 4 所示。由于模型简化、网格划分、软件算法、测量温度、仪器灵敏度等误差,导致结果存在一定差别,其中抗拉强度计算结果与有限元分析结果相差 4.5%,与台架测试结果相差 2.5%,抗扭屈服强度计算结果与有限元分析结果相差 6.7%,与台架测试结果相差 6.2%。可见计算结果与台架测试和有限元分析非常接近,这一对比结果很好的验证了绳索取心钻杆机械性能计算理论方法的准确性与可行性,对双台肩钻杆接头机械性能确定具有指导意义,在后续特深孔钻杆接头机械性能计算时可作为重要参考^[25]。

表 4 H-5000 钻杆接头机械性能对比

Table 4 Comparison of H-5000 tool joint mechanical properties

获取方式	抗拉强度/kN	抗扭屈服强度/(kN·m)
理论计算	1858.6	25.6
有限元仿真	1946.0	24.0
台架测试	1906.0	27.3

5 结论

通过开展钻杆接头的拉伸载荷与扭转载荷计算理论研究、有限元分析和台架试验研究,得出以下结论:

(1)构建了双台肩绳索取心钻杆接头受力模型,给出了钻杆机械性能(尤其是抗扭性能)与推荐上扣扭矩计算公式,抗扭屈服强度计算结果与有限元分析结果相差 6.7%,与台架测试结果相差 6.2%,可以作为特深孔钻杆接头机械性能计算的重要参考。

(2)H-5000 高性能薄壁绳索取心钻杆抗拉强度能达到 1906 kN,抗扭屈服强度能达到 27.3 kN·m,能够满足 5000 m 特深孔钻探需求,但考虑到钻杆接头“服役”过程中外表面的腐蚀和磨损,建议在现有设计基础上增大接头外径,预留适当磨损余量;

(3)上扣扭矩大小基本不影响钻杆接头抗拉强度,影响断裂形式。在台架试验中,手拧扭矩下的钻杆接头抗拉强度为 1906 kN,公、母接头同时在螺纹根部发生断裂;屈服强度扭矩下的钻杆接头抗拉强度为 1884 kN,只有公接头根部发生断裂;施加上扣扭矩接头试件抗拉强度与手动拧紧接头试件相差 1.2%,在计算推荐上扣扭矩拧紧钻杆接头抗拉强度时,可以忽略扭矩影响,按公式(10)进行计算。

(4)根据推导出的钻杆受力计算模型,适当减小主、副台肩接触面积比值、螺纹锥度或接触面摩擦系数,可以提高钻杆接头抗扭能力。

(5)台肩与螺纹处的应力集中现象明显,这成为制约钻杆整体机械强度的“瓶颈”,有必要通过优化台肩或螺纹结构达到均衡应力集中的目的,以适应更恶劣工况。

参考文献(References):

- [1] 张金昌,谢文卫.科学超深井钻探技术国内外现状[J].地质学报,2010,84(6):887-894.
ZHANG Jinchang, XIE Wenwei. Status of scientific drilling technology for ultra-deep well[J]. Acta Geologica Sinica, 2010,84(6):887-894.
- [2] 孙建华,张永勤,梁健,等.深孔绳索取心钻探技术现状及研发工作思路[J].地质装备,2011,12(4):11-14.
SUN Jianhua, ZHANG Yongqin, LIANG Jian, et al. Status and R & D approach of deep hole wire line core drilling technology[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2011,12(4):11-14.
- [3] 孙建华,陈师逊,刘秀美,等.小直径特深孔绳索取心口径系列及钻柱方案[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(8):1-5,17.

- SUN Jianhua, CHEN Shixun, LIU Xiumei, et al. Diameter series and drill pipe scheme for wire-line coring with small diameter in ultra-deep borehole[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013,40(8):1-5,17.
- [4] Francois Kessler, Jack Smith. Double-shouldered tool joints increase torsional strength[J]. Journal of Petroleum Technology, 1996,48(6):514-517.
- [5] Tony Collins, Francesco Vaghi. Analysis of the fatigue resistance of rotary shouldered connections[J]. SPE, 2002;74564.
- [6] Michael J.Jellison, Steve P.Hassmann, Doug Snapp. New developments in drill stem rotary shoulder connection[J]. SPE, 2000;62785.
- [7] 梁健,尹浩,孙建华,等.特深孔地质岩心钻探钻杆口径及管柱规格研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(8):36-46. LIANG Jian, YIN Hao, SUN Jianhua, et al. Research on hole diameter, drill string specification and casing program for ultra-deep geological core drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(8):36-46.
- [8] GB/T 24956-2010, 钻柱设计和操作限度的推荐作法[S]. GB/T 24956-2010, Recommended practice for drill string design and operating limits[S].
- [9] 庄泳,鲁喜宁,高连新,等.气密钻杆接头受力分析与紧扣圈数优选[J].石油机械,2015,43(7):30-35. ZHUANG Yong, LU Xining, GAO Lianxin, et al. Force analysis and fastening turns optimization of airtight drill pipe joint[J]. China Petroleum Machinery, 2015,43(7):30-35.
- [10] 任辉,高连新,鲁喜宁,等.新型双台肩钻杆接头研究与应用[J].石油机械,2011,39(3):63-66. REN Hui, GAO Lianxin, LU Xining, et al. Research and application of new double shoulder drill pipe joint[J]. China Petroleum Machinery, 2011,39(3):63-66.
- [11] 吴翔实,高连新,袁鹏斌.石油钻杆接头上扣扭矩计算方法研究[J].钻采工艺,2017,40(2):67-70. WU Xiangshi, GAO Lianxin, YUAN Pengbin. Method for calculating make-up torque on petroleum tool joint[J]. Drilling & Production Technology, 2017,40(2):67-70.
- [12] 林元华,施太和,姚振强,等.钻具螺纹接头力学性能计算方法及其应用[J].上海交通大学学报,2005,39(7):1058-1062. LIN Yuanhua, SHI Taihe, YAO Zhenqiang, et al. A model to compute the mechanical property of drillpipe tool joint and its application[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005,39(7):1058-1062.
- [13] 林元华,施太和,赵鹏,等.复杂地层钻具接头力学性能模拟及应用[J].钢铁,2005,40(8):43-47. LIN Yuanhua, SHI Taihe, ZHAO Peng, et al. Simulation on mechanical properties of drilling tool joint for complex formation lithology and application[J]. Iron and Steel, 2005,40(8):43-47.
- [14] 林元华,张林,罗增,等.双台肩钻具螺纹接头的力学性能分析及测试[J].机械设计与研究,2010,26(3):61-63. LIN Yuanhua, ZHANG Lin, LUO Zeng, et al. The mechanical property analysis and test of the screw joint of drilling tool with double shoulder[J]. Machine Design and Research, 2010,26(3):61-63.
- [15] 冯少波,狄勤丰,李宁,等.降级钻杆接头抗扭和抗拉性能的三维有限元分析[C]//第26届全国结构工程学术会议论文集, 2017:190-196.
- FENG Shaobo, DI Qinfeng, LI Ning, et al. Three dimensional finite element analysis of torsional and tensile properties for abraded tool joints[J]. Proceedings of the 26th National Conference on Structural Engineering, 2017:190-196.
- [16] 尹浩,梁健,孙建华.特深钻探钻柱组合优化设计研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(4):56-62. YIN Hao, LIANG Jian, SUN Jianhua. Research on optimum drilling string assembly design for extra deep hole drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(4):56-62.
- [17] GB/T 16950-2014, 地质岩心钻探钻具[S]. GB/T 16950-2014, Geological core drilling tools[S].
- [18] 冯清文.绳索取心钻杆螺纹锥度与强度关系及应力研究[J].探矿工程,1995(6):24-26. FENG Qingwen. Study of relationship between wireline drill pipe thread taper and strength and its stresses[J]. Exploration Engineering, 1995(6):24-26.
- [19] 梅凤翔.工程力学[M].北京:高等教育出版社,2003. MEI Fengxiang. Engineering mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [20] 王达,何远信,等.地质钻探手册[M].长沙:中南大学出版社, 2014. WANG Da, HE Yuanxin, et al. Geological drilling manual [M]. Changsha: Central South University Press, 2014.
- [21] 译:郭可谦,高素娟,王晓凤,等;著:山本晃.螺纹联接的理论与计算[M].上海:上海科学技术文献出版社,1984. Translator: GUO Keqian, GAO Sujian, WANG Xiaofeng, et al; Author: Akira Yamamoto. Theory and calculation of screw connection [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Literature Press, 1984.
- [22] 狄勤丰,陈锋,王文昌,等.双台肩钻杆接头三维力学分析[J].石油学报,2012,33(5):871-877. DI Qinfeng, CHEN Feng, WANG Wenchang, et al. Three-dimensional mechanical analysis of the double-shouldered tool joint[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012,33(5):871-877.
- [23] 梁健,郭宝科,孙建华,等.深孔绳索取心钻杆抗拉脱能力有限元分析[J].煤田地质与勘探,2013,41(2):90-93. LIANG Jian, GUO Baoke, SUN Jianhua, et al. Finite element method of resistance to pull-off for deep hole wire-line drill rod [J]. Coal Geology & Exploration, 2013,41(2):90-93.
- [24] 梁健,郭宝科,王志刚,等.绳索取心复合钻柱的动力学行为研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(7):34-40. LIANG Jian, GUO Baoke, WANG Zhigang, et al. Dynamics behavior of compound drill string for wire line coring[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(7):34-40.
- [25] 高申友,孙建华,蔡纪雄,等.绳索取心钻杆负角度螺纹扭矩计算分析和测试研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(5):45-50. GAO Shenyou, SUN Jianhua, CAI Jixiong, et al. Calculation analysis on negative angle thread torque of wire-line coring drill pipe and test research [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(5):45-50.

(编辑 韩丽丽)