

文章编号: 0253-2697(2013)06-1176-05 DOI: 10.7623/syxb201306019

基于密封性能要求的超深井钻柱极限提升力的确定

陈 锋¹ 狄勤丰¹ 王文昌¹ 王明杰¹ 袁鹏斌² 周永其²

(1. 上海大学上海市应用数学和力学研究所 上海市力学在能源工程中的应用重点实验室 上海 200072;
2. 上海海隆石油管材研究所 上海 200949)

摘要:为了评估大轴向载荷作用下的钻杆接头密封性能,保证钻杆接头的使用性能,采用三维有限元方法建立了双台肩钻杆接头高精度有限元模型,研究了钻杆接头的密封机理,并分析了其在上扣扭矩和轴向拉力作用下的力学特性。研究结果表明,双台肩钻杆接头的密封以主台肩、副台肩为主,只有当上扣扭矩使主、副台肩上产生一个合理的接触压力后,才能保证接头的密封性能;轴向拉力的作用将降低主、副台肩上的接触压力,从而影响接头的密封性能;当轴向拉力超过2500 kN时,主、副台肩将失去密封性能,从而增加接头发生应力腐蚀的风险。该研究结果对超深井钻杆接头使用性能的提高和钻柱极限提升力的确定具有一定的参考价值。

关键词:钻具接头;密封性能;三维有限元;极限提升力;超深井

中图分类号:TE921

文献标识码:A

Determination of ultimate lifting capacity of drill string for ultra-deep wells based on sealing performance of tool joint

CHEN Feng¹ DI Qinfeng¹ WANG Wenchang¹ WANG Mingjie¹ YUAN Pengbin² ZHOU Yongqi²

(1. Shanghai Institute of Applied Mathematics & Mechanics, Shanghai University,
Shanghai Key Laboratory of Mechanics in Energy Engineering, Shanghai 200072, China;
2. Shanghai HiLong Petroleum Tubular Goods Research Institute, Shanghai 200949, China)

Abstract: In order to evaluate the sealing performance of tool joint in large axial load and ensure the usability of tool joint, a precision finite element model of double shoulder tool joint was established using three-dimensional finite method to describe the sealing mechanism of tool joint. This model could analyze mechanical characteristics of tool joints under actions of make-up torque and axial tension. The results showed that: The sealing performance of double shoulder tool joint was mainly with the primary and secondary shoulder, and rational contact pressure which was produced by the primary and secondary shoulder guaranteed the sealing performance of tool joint; Axial tension may reduce the contact pressure on the primary and secondary shoulder, which weakened the sealing performance of tool joint; When the axial tension reaches to 2 500 kN, the primary and secondary shoulder would lose their sealing performance, which increased the risk of stress corrosion of tool joint. These results could be taken as a reference in determining the ultimate lifting capacity of drill string and improving the performance of tool joint.

Key words: tool joint; sealing performance; 3-D finite element analysis; ultimate lifting capacity; ultra-deep well

随着石油天然气资源的勘探开发,一些高含腐蚀介质的油气田正在被不断地发现和钻探,钻柱工作的介质环境有时会十分恶劣。此外,深井、定向井、大位移井、水平井的数量也在逐年增多,钻柱的受力特征越来越复杂,其因应力和应力腐蚀引起的钻柱失效问题也日益突出。对中国10多个油气田进行钻柱失效分析及调查统计表明,每年约发生数百次钻柱抗扭失效(钻杆内螺纹接头的纵裂事故)。根据断口形貌及金相分析表明,目前大部分接头上的纵向裂纹是由于应力腐蚀的扩展机理^[1-2],因此应力腐蚀是引起钻杆接头开

裂失效的主要原因。

对于双台肩钻杆接头,其发生应力腐蚀的必要条件是主、副台肩的密封性能变差,井内腐蚀介质进入螺纹啮合区域,进而引发接头开裂失效。钻井作业中,为了避免发生恶性卡钻事故,通常通过加大提升载荷来解决,这样就可能会因轴向载荷过大而影响钻杆接头的密封性能。为此,有必要深入分析钻杆接头的受力特征,在满足接头密封性能要求的前提下,确定钻杆所能承受的极限载荷,从而为减少钻柱的应力腐蚀问题提供参考。

目前国内外对钻杆接头丝扣的力学特性分析主要

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 51174130, No. 50674065)、上海市重点学科建设项目(S30106)、上海石油管工程技术研究中心建设项目(10dz22522300)、上海市部分地方院校能力建设项目(12160500200)、上海领军人才基金项目和上海市科委优秀学术带头人项目(12XD1402500)资助。

第一作者:陈 锋,男,1986年8月生,2008年获上海大学学士学位,现为上海大学博士研究生,主要从事石油工程力学方面的研究工作。Email: stokes1986@126.com

通信作者:狄勤丰,男,1963年8月生,1984年毕业于华东石油学院,1997年获西南石油大学博士学位,现为上海大学教授、博士生导师,主要从事石油工程力学方面的研究。Email: qinfengd@sina.com

采用二维轴对称有限元模型^[3-6]或忽略螺纹螺旋升角的三维有限元模型^[7],其无法有效地分析上扣扭矩、轴向拉力等复合载荷作用下的丝扣受力特征。笔者采用三维有限元分析方法,对钻杆接头在复合载荷作用下的密封性能进行分析,并确定了基于密封性能要求的钻柱极限提升力。

1 双台肩钻杆接头的密封机理

对于双台肩钻杆接头,主要的密封功能由两个台肩承担,其中主台肩承担主密封功能,副台肩承担辅助密封功能。其密封形式为金属-金属密封,即由光滑的金属表面弹性过盈配合而实现密封。国内外专家对金属-金属密封结构的密封性能展开了广泛的研究^[8-12],研究结果表明,其密封性能主要由以下因素决定:

(1) 接触压力。在弹性密封极限范围内,密封面的接触压力越高,密封性能越好。一般认为,防止流体泄漏的条件为密封面上的接触压力大于流体的压力。笔者取接触面上的平均接触压力值为判断依据,如果台肩密封面上的平均接触压力大于流体压力,井内腐蚀介质就不会渗入到螺纹啮合区域;反之,腐蚀介质则会渗入螺纹啮合区域,从而带来应力腐蚀的隐患。

(2) 接触面积。由于加工的原因,密封面的光洁度只能维持在一定水平,不可能完全光滑。由于表面粗糙度的存在,使得密封面配合后仍存在微小的间隙。当密封面有较大的接触面积时,其间隙的截面积较小,且间隙路径较长,根据流体力学原理,此时由流体剪切力提供的阻力也更大,从而有利于实现密封性能。

(3) von Mises 应力。接触压力并不是越高越有利于接头的密封,过高的接触压力将会引起材料的塑性变形,从而导致密封面出现黏结等不利现象。在有限元分析中,为了保证密封面不发生塑性变形,应保证密封面上的 von Mises 应力小于材料的屈服强度。

笔者基于上述 3 点,对钻杆接头在上扣扭矩和轴向拉力作用下的密封性能进行评价,确定了以密封性能为依据的最大轴向载荷,以便为确定极限提升载荷和评价丝扣的应力腐蚀风险提供依据。

2 双台肩钻杆接头三维弹塑性有限元模型的建立

以外径 130.18 mm 双台肩钻杆接头为计算对象,建立了其三维弹塑性有限元模型,并采用 ABAQUS 软件模拟钻杆接头的力学特性。钻杆接头的主要参数为:加厚处外径为 168.28 mm;管体外径为 130.18 mm,内径为 95.25 mm;螺纹锥度为 1:12;副台肩间隙为 0.2 mm。钻杆接头所用材料为 37CrMnMoA,其

为各向同性的弹塑性材料,弹性模量为 2.06×10^5 MPa,泊松比为 0.29,摩擦系数为 0.08。

2.1 钻杆接头摩擦接触模型

钻杆螺纹接头的计算分析是一个典型的高度非线性摩擦接触问题,属于非光滑力学范畴。笔者采用罚函数法处理摩擦接触问题,其在每一个时间步检查各处节点是否穿透主面,如有穿透,则在该处节点与被穿透主面间引入一个较大的界面接触力,其大小与穿透深度和主面的刚度成正比。

计算过程中接触面上存在分离、黏结、滑动 3 种接触状态,并可表征为^[13]

分离状态:

$$d\mu_n^{(1)} - d\mu_n^{(2)} + \delta > 0, p_n = p_t = 0 \quad (1)$$

黏结状态:

$$\begin{cases} du_n^{(1)} - du_n^{(2)} + \delta = 0, p_n = -E_n(du_n^{(2)} - du_n^{(1)} - \delta) \\ |du_t^{(1)} - d\mu_t^{(2)}| = 0, p_t = -E_t(du_t^{(2)} - du_t^{(1)}) \end{cases} \quad (2)$$

滑动状态:

$$\begin{cases} du_n^{(1)} - du_n^{(2)} + \delta = 0, p_n = -E_n(du_n^{(2)} - du_n^{(1)} - \delta) \\ |du_t^{(1)} - d\mu_t^{(2)}| > 0, p_t = -\mu |p_n| \operatorname{sgn}(d\mu_t^{(2)} - du_t^{(1)}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $d\mu_n^{(\alpha)}$ 和 $d\mu_t^{(\alpha)}$ 为接触点法向增量位移和切向增量位移,mm; α 分别表示两个接触体, $\alpha = 1, 2$; δ 为接触体的初始间隙,mm; p_n 和 p_t 为接触面上的法向力和切向力,N; μ 为滑动摩擦系数; E_n 、 E_t 为惩罚因子,N/mm。

2.2 有限元网格划分

为了构建高计算精度和高计算效率的有限元模型,在螺纹段使用精细网格,而在远离螺纹段的管体使用相对稀疏的网格。整个有限元模型的单元数为 21.9×10^4 ,节点数为 27×10^4 。计算时选用的单元类型为 C3D8I。网格划分情况如图 1 所示,在母扣端部建立运动耦合形式的节点耦合,施加固定约束;在公扣端部建立分布耦合形式的节点耦合,施加外载荷。

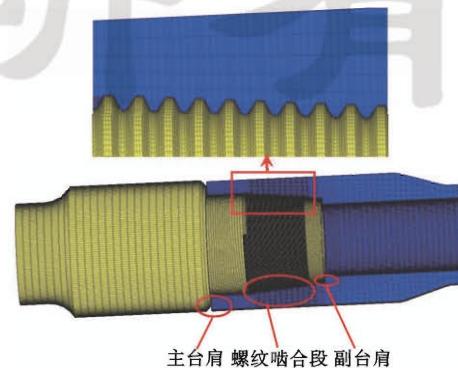


图 1 螺纹接头三维有限元模型

Fig. 1 3-D finite element model of tool joint

3 上扣扭矩对钻杆接头密封性能的影响

钻杆接头的上扣特性对钻柱的连接完整性和密封完整性具有重要影响。按照实际工况,施加完上扣扭矩后释放大钳,采用光滑的加载曲线进行加载^[14],上扣扭矩值为 39 208 N·m。

3.1 接触压力和接触面积

通过三维有限元分析,得到上扣过程中主台肩、副台肩、螺纹牙啮合面上的接触压力、接触面积变化情况(图 2),上扣后主台肩、副台肩上拥有较高的接触压力,起主要密封作用。需要注意的是副台肩啮合面在

其间隙闭合后接触压力会急剧上升,因此合理的副台肩间隙和合理的上扣扭矩是接头密封性能稳定性的保证^[15]。在大钳松开的过程中(对应加载时间为 0.1~0.2 s),各啮合面上的接触压力保持不变,这些力将作为预紧力存在于钻杆接头中。

由图 2(b)可见,主台肩、副台肩啮合面的接触面积在扭矩上升到一定值之后保持不变,说明此时啮合面已经完全接触。螺纹牙上的接触面积在上紧过程中(对应加载时间为 0~0.1 s)不断增大,这是因为上扣扭矩作用下两端的螺纹牙首先发生接触,随着上扣扭矩的不断增大,中间段螺纹牙逐步接触。

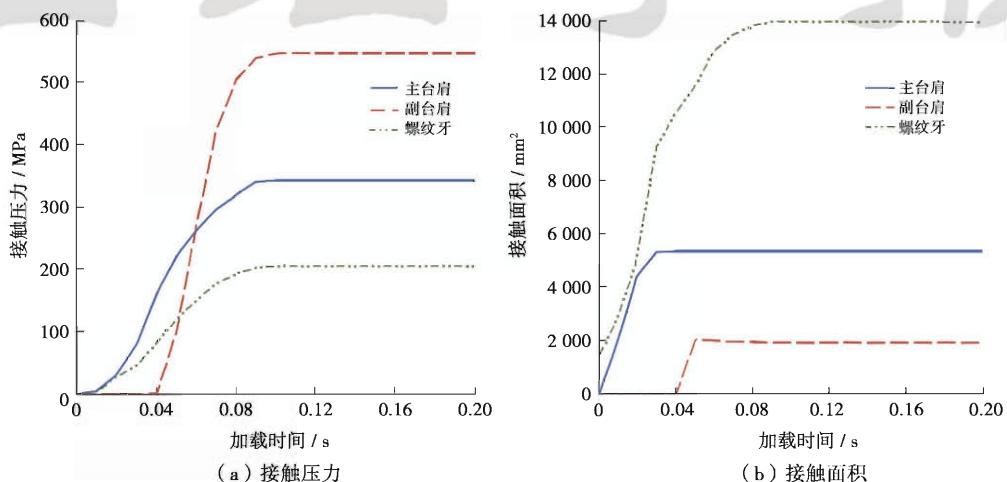


图 2 上扣过程中接触压力、接触面积变化情况

Fig. 2 Changes of contact pressure and contact area during make-up process

3.2 von Mises 应力

在上扣过程中,主台肩、副台肩上的最大 von Mises 应力变化情况如图 3 所示,主台肩、副台肩上的最大 von Mises 应力随着上扣扭矩的增大而增大。副台肩处由于留有一定的初始间隙,所以当上扣扭矩较小时副台肩面上的应力水平也较低。一旦副台肩初始间

隙闭合,副台肩上的应力水平将大幅上升。上扣后主台肩、副台肩啮合面上的 von Mises 应力最大值分别为 364.6 MPa、525.3 MPa。可见,若副台肩上局部区域 von Mises 应力超过了屈服应力,会产生一定量的塑性变形,从而造成密封面损伤。因此,应适当增大副台肩间隙以保护副台肩。

4 轴向拉伸载荷对钻杆接头密封性能的影响及极限提升力确定

对上扣后(上扣扭矩为 39 208 N·m)的螺纹接头施加轴向拉伸载荷,考察接头的力学特性。轴向拉伸载荷加载过程中各啮合面上的接触压力、接触面积变化情况如图 4 可见,随着轴向拉力增大,主台肩、副台肩啮合面上的接触压力逐步减小。对于螺纹牙啮合面上的接触压力,在主台肩脱开以前(轴向拉力小于 2 500 kN),接触压力基本保持不变;而在主台肩脱开以后(轴向拉力大于 2 500 kN),接触压力开始急剧上升。也就是说,上扣扭矩的预紧作用使得主、副台肩上产生了一定的预紧力,较小的轴向拉力将主要由主、副台肩

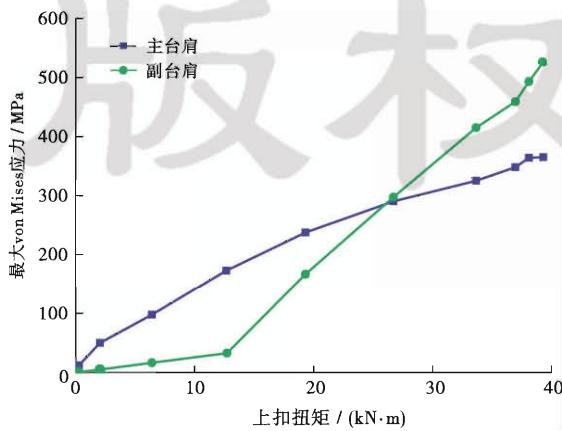


图 3 上扣过程中主、副台肩上最大 von Mises 应力变化情况
Fig. 3 Changes of maximum von Mises stress on primary and secondary shoulder during make-up process

来承担。而当轴向拉力超过一定水平,使得台肩啮合面脱开后,轴向拉力将主要由螺纹牙来承担。

由图4可见,当轴向拉力达到2500 kN时,主台肩啮合面上的接触压力已降为0,接触面积亦降为0,此时主台肩已经丧失了密封功能。在钻井作业中,如果发生遇卡等情况,势必增大上提载荷,此时台肩面的密封功能就会变差,钻井液等腐蚀介质就更容易渗入到螺纹啮合区域。因此,从密封可靠性的角度,此时的极限提升载荷约为2500 kN。若考虑钻杆内、外钻井液

压力的影响,极限提升载荷应定得更低。

钻柱在起钻时是以三根一柱的形式进行作业,中间的接头并不会卸扣并重新上扣。如果中间接头的轴向拉伸载荷超过了极限提升载荷,则钻井液将渗入到螺纹啮合区域中,若不及时清理,将增加接头发生应力腐蚀的风险。因此,对于轴向拉伸载荷大于极限提升载荷的接头,应执行卸扣操作并对螺纹进行适当清理,即应提出解卡条件下钻柱起下钻作业规范。对于可能出现密封问题的钻杆接头应采用严格的卸扣和清洁操作。

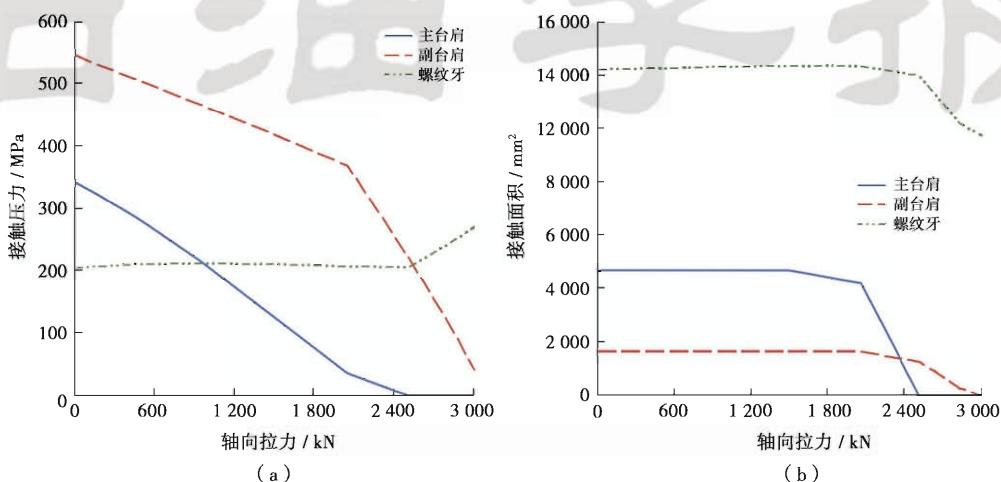


图4 接触压力、接触面积随轴向拉力的变化

Fig. 4 Changes of contact pressure and contact area during axial tensile loading process

需要指出的是,如果台肩密封面出现永久损伤,则不能仅对接头进行简单的卸扣清理,而应对台肩密封面进行修复,以保证接头的密封性能。在3000 kN轴向拉力作用下钻杆接头塑性应变分布如图5所示。主台肩、副台肩上的塑性应变尚处于较低的水平,基本不会造成台肩密封面的永久损伤。因此,对于轴向拉伸载荷不超过3000 kN的接头可以卸扣清理后重新使用。值得注意的是,螺纹牙上发生了一定的塑性变形,尤其是靠近主台肩的

几牙螺纹。

图6给出了各螺纹牙上的平均接触压力,其中第一个螺纹牙为最靠近主台肩的螺纹牙。在上扣扭矩作用下螺纹牙的承载呈现出两头大、中间小的特点。在1000 kN的轴向拉力作用下,各螺纹牙的承载仅比紧扣状态略有增加;而在3000 kN的轴向拉力作用下,各螺纹牙的承载相比紧扣状态有大幅度的增加,尤其是靠近主台肩的几牙螺纹。因此,当轴向拉力超过一定值时应及时卸扣检查螺纹是否受损。

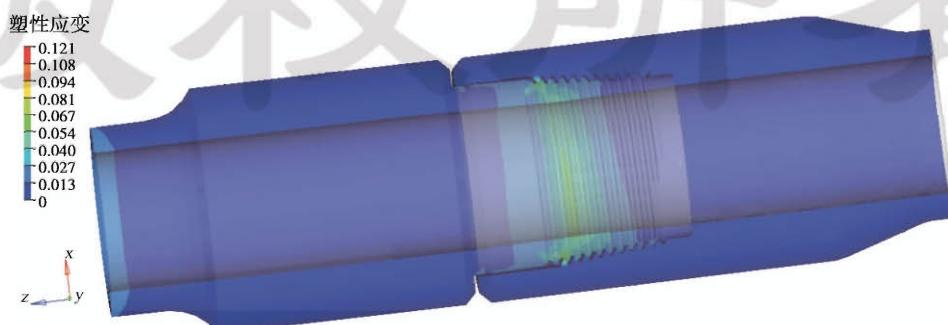


图5 在轴向拉力作用下钻杆接头塑性应变分布

Fig. 5 Plastic strain distribution of tool joint under axial tension

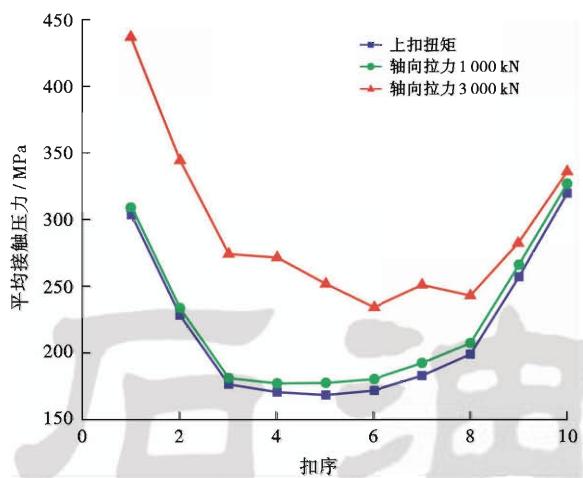


图6 不同各螺纹牙上的平均接触压力

Fig. 6 Average contact pressure in different thread numbers

5 结 论

(1) 通过钻杆接头的三维有限元分析,可以得到复合载荷作用下接头的接触压力、接触面积和塑性变形情况,判断接头的密封性能,从而确定基于密封性能要求的钻柱极限提升力。

(2) 上扣的预紧作用使主台肩、副台肩上产生较高的接触压力和接触面积,其主要起密封作用。

(3) 轴向拉伸载荷使主台肩、副台肩啮合面上的接触压力和接触面积下降,影响台肩密封面的密封性能,使得钻井液等腐蚀介质更加容易进入螺纹啮合区域,从而增加钻杆接头发生应力腐蚀的风险。

(4) 对于轴向拉伸载荷超过2500 kN的接头,应卸扣并对螺纹牙进行适当的清理,并检查螺纹是否受损,以降低接头发生应力腐蚀的风险。

参 考 文 献

- [1] 王新虎,薛继军,高蓉,等.钻杆内螺纹接头纵向开裂机理及材料性能指标研究[J].天然气工业,2007,27(4):69-71.
Wang Xinhua, Xue Jijun, Gao Rong, et al. Study on longitudinal fracture mechanism and material property indicators of box-ended drillpipe tool joint[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27 (4): 69-71.
- [2] 张瑟,张国正,张春婉,等.双台肩钻杆接头开裂失效分析[J].石油矿场机械,2010,39(1):71-77.
Zhang Se, Zhang Guozheng, Zhang Chunwan, et al. SSC failure analysis of high strength double shouldered tool joint[J]. Oil Field Equipment, 2010, 39 (1): 71-77.
- [3] Tafreshi A. SIF evaluation and stress analysis of drillstring threaded joints[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1999, 76(2):91-103.
- [4] Baragetti S. Effects of taper variation on conical threaded connections load distribution[J]. Journal of Mechanical Design, 2002, 124(2):320-329.
- [5] 李斌,杨智春,于哲峰.钻柱接头扣型改进设计的有限元分析[J].机械强度,2006,28(5):721-724.
Li Bin, Yang Zhichun, Yu Zhefeng. Finite element analysis of improving designs for a drill string joint[J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 28 (5): 721-724.
- [6] Lin Yuanhua, Zhu Dajiang, Zeng Dezhi, et al. Numerical and experimental distribution of stress fields for double shoulder tool joint[J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(6):1584-1594.
- [7] 祝效华,董亮亮,童华,等.拉弯复合载荷作用下的API短圆套管螺纹力学行为[J].石油学报,2013,34(1):157-163.
Zhu Xiaohua, Dong Liangliang, Tong Hua. Mechanical behaviors of short-round thread of the API casing under combined load of stretching and bending moment[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34 (1): 157-163.
- [8] Ogasawara M. Development of Nippon Steel Premium Connections [J]. Nippon Steel Technical Report, 1988, 38:10-17.
- [9] 练章华,杨龙,韩建增,等.套管偏梯形螺纹接头泄漏机理的有限元分析[J].石油矿场机械,2004,33(5):53-57.
Lian Zhanghua, Yang Long, Han Jianzeng, et al. Using finite element analysis on leakage mechanism for leaning thread in casing [J]. Oil Field Equipment, 2004, 33(5):53-57.
- [10] Bailey E, Petrella J, Smith J. Development of gas tight seal for tool joint[R]. SPE 49202, 1998.
- [11] Bradley A B, Nagasaku S, Verger E. Premium connection design, testing, and installation for HPH sour wells[R]. SPE 97585, 2005.
- [12] 高连新,金烨,张居勤.石油套管特殊螺纹接头的密封设计[J].机械工程学报,2005,41(3):216-220.
Gao Lianxin, Jin Ye, Zhang Jiqin. Seal design of premium threaded casing connections[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(3):216-220.
- [13] 张洪武,关振群,李云鹏,等.有限元分析与CAE技术基础[M].北京:清华大学出版社,2004:55.
Zhang Hongwu, Guan Zhenqun, Li Yunpeng, et al. Finite element analysis and CAE technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004:55.
- [14] 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.
- [15] 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,2013,33(增刊1):353-357.
Chen Feng, Di Qinfeng, Ouyang Yanhui, et al. The influence of the clearance of secondary shoulder to the performance of double shoulder drill pipe joint [J]. Engineering Mechanics, 2013, 33 (Supplement 1):353-357.

(收稿日期 2013-05-21 改回日期 2013-08-17 编辑 王培玺)