

文章编号: 1000-4750(2017)Suppl-0295-05

复杂载荷下油井管接头数值仿真平台的研发与应用

狄勤丰¹, 宋海涛¹, 陈 锋^{1,2}, 王文昌¹, 张 鹤¹, 靳泽中¹

(1. 上海大学, 上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072; 2. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘 要: 日益复杂的油气井钻采条件使得油井管柱面临越来越苛刻的载荷工况, 油井管接头作为整个管柱的薄弱环节, 其失效问题非常突出。实物实验费用昂贵、实验周期长, 且复杂载荷工况难以施加, 无法满足实际要求。该文基于油井管接头三维全尺寸弹塑性有限元分析, 构建了复杂载荷下油井管接头数值仿真平台, 是实物实验的一个有力补充。该仿真平台所得极限工作扭矩与 API 标准提供数据基本吻合(零轴向力条件下), 同时具有分析复杂工况条件下油井管接头三维力学特性的能力。通过该仿真平台, 能很好地描述复杂载荷作用下油井管接头的受力特征, 快速、全面地评估复杂载荷作用下油井管接头的连接强度和密封性能, 明确油井管接头的极限载荷工况。

关键词: 油井管接头; 复杂载荷; 三维力学分析; 有限元方法; 仿真平台

中图分类号: TE931.2 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.03.S002

THE DEVELOPMENT AND APPLICATION OF NUMERICAL PLATFORM FOR THREADED CONNECTIONS UNDER COMPLEX LOADS

DI Qin-feng¹, SONG Hai-tao¹, CHEN Feng^{1,2}, WANG Wen-chang¹, ZHANG He¹, JIN Ze-zhong¹

(1. Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: With the exploration of oil and gas sources moves further to greater depths and into harsher environments, the working condition of pipe string becomes increasingly severe. As the weakest part of the string, the failure of threaded connections occurs frequently. Full-scale experiments are costly, time consuming and complex loads are difficult to apply. Based on three-dimensional elasto-plastic finite element analysis, a numerical platform for threaded connections is developed, which is a powerful complement to physical experiments. The calculated ultimate working torque of threaded connections by the numerical platform is consistent with the data in API standard (without axial tension). Furthermore, the numerical platform can be used to analyze the three-dimensional mechanical properties of threaded connections under complex loads. The numerical platform can evaluate the structural and sealing integrity of threaded connections accurately, and determine the load limits of threaded connections.

Key words: threaded connections; complex loads; three-dimensional mechanical analysis; finite element method; numerical platform

收稿日期: 2016-03-22; 修改日期: 2016-11-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1663205, 51174130); 上海市重点学科建设项目(S30106); 上海市优秀学术带头人项目(12XD1402500); 上海市部分地方院校能力建设项目(12160500200); 上海市力学在能源工程中的应用重点实验室开放基金项目(ORF-201602); 上海市教育委员会(高峰学科建设项目); 上海市青年科技英才扬帆计划项目(17YF1428000)

通讯作者: 陈 锋(1986—), 男, 浙江人, 讲师, 博士, 主要从事有限元仿真计算的研究工作(E-mail: chenfang536@126.com).

作者简介: 狄勤丰(1963—), 男, 江苏人, 教授, 博士, 主要从事石油工程力学问题的研究(E-mail: qinfengd@sina.com);

宋海涛(1989—), 男, 江苏人, 硕士生, 主要从事有限元仿真分析工作(E-mail: 892972506@qq.com);

王文昌(1982—), 男, 甘肃人, 讲师, 博士, 主要从事管柱力学方面的应用研究(E-mail: wangwenchang1982@163.com);

张 鹤(1989—), 男, 河北人, 博士生, 主要从事管柱力学研究(E-mail: crane_zhang@163.com);

靳泽中(1989—), 男, 河南人, 硕士生, 主要从事有限元仿真分析工作(E-mail: jinzezhong@126.com).

日益苛刻的油气井钻采条件使得油井管柱受力状态非常复杂，管柱受到拉伸、压缩、弯曲、扭转、内外压和热循环等载荷的复合作用，油井管柱失效问题突出。油井管接头由公扣、母扣通过螺纹啮合而成，是油井管柱的薄弱环节，据统计油套管失效事故约 64% 发生在螺纹连接处(国内此数字更是高达 86%)^[1]，钻柱失效事故约 65% 发生在钻杆接头部位^[2]。因此，在下井前应对油井管接头进行安全性能评估，以保障作业安全。

全尺寸实物实验虽能直观地评价油井管接头的使用性能，但却无法描述接头内部真实的应力-应变状态，且费用高，周期长。此外，由于实验条件有限，复杂载荷(轴向载荷、弯矩、扭矩、内外压、温度联合作用)很难施加^[3-5]。数值计算理论和计算机技术的飞速发展使得计算模拟替代了大量的物理实验，且能计算一些无法做实验的极端工况，其在节约经费、缩短开发周期、提高产品质量等方面发挥了重要作用。

当前，油井管接头多达数百种，其所面临的载荷工况日益复杂，为了保证作业安全必须在下井前对油井管接头进行全面的性能评估。此外，开发具有更高性能的特殊螺纹接头要求深入了解螺纹接头的受力特征。为此，有必要发展适用于复杂载荷下油井管接头受力特征评价的数值仿真平台。

1 油井管接头仿真平台的设计

油井管接头受到轴向力、弯矩、扭矩、内压、外压和热循环等载荷的综合作用，处于复杂的三轴应力状态。当前普遍采用的二维轴对称有限元分析由于忽略了螺纹的螺旋升角，并不适用于复杂载荷条件下油井管接头的应力特征描述^[6]。

鉴于此，笔者及其所在的研究团队发展了油井管接头三维全尺寸数值仿真平台，其可以快速、全面地评价油井管接头在复杂载荷作用下的连接强度和密封性能，对指导油田正确选用合适的油井管接头和开发具有更高性能的特殊螺纹接头具有重要的意义。

1.1 结构设计

图 1 为油井管接头仿真平台的构架特征，整个仿真平台主要由 CAD 建模系统、扣型库系统、材料库系统、有限元分析系统、结果可视化系统以及各系统间信息集成与传递接口等部分组成。该仿真平台的核心在于构建适用于复杂载荷工况条件的

具有高计算精度的油井管接头三维有限元模型。通过形成常见油井管接头的扣型库、常用材料的力学参数库，可以快速、全面地评估油井管接头的连接强度和密封性能，分析容易发生失效的位置及失效的模式，确定油井管接头所能承受的极限载荷组合，为油田正确选用接头型号及新型接头的设计开发提供指导。

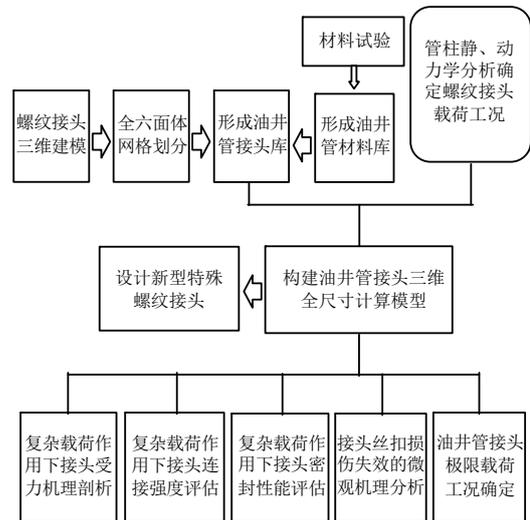


图 1 油井管接头仿真平台构架

Fig.1 Framework of numerical platform for threaded connections

1.2 扣型库

油井管包括油管、套管、钻杆、钻铤等，其接头种类繁多，除了 API 标准接头之外，世界各大油井管生产厂商还开发了形式多样的特殊螺纹接头，这些接头性能表现参差不齐，给各大油田的选用造成很大的困扰。为了快速确定适用于实际井况的最佳扣型，构建油井管接头扣型库是研发油井管接头仿真平台的重要工作之一。扣型库的结构特征见图 2。

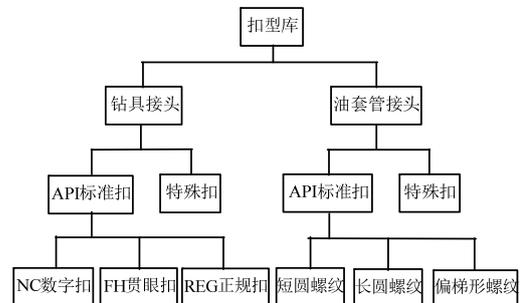


图 2 扣型库

Fig.2 Database of threaded connections

1.3 材料库

油井管接头种类繁多，形式各异，其所使用的

材料也具有不同的材料性能,为了保证仿真结果能更加准确的反映油井管接头的力学特性,以一系列力学试验为基础,构建油井管接头材料参数库。

采用各向同性硬化法则描述材料进入塑性变形后的后继屈服函数在应力空间中变化的规律,即规定材料进入塑性变形以后加载曲面在各个方向均匀地向外扩张,但其形状、中心及其在应力空间中的方位均保持不变。在 von Mises 屈服条件下,各向同性硬化的后继屈服函数可表示为:

$$f(\sigma_{ij},k) = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_s^2(\bar{\epsilon}_p) = 0 \quad (1)$$

式中, σ_s 是当前的弹塑性应力,它是等效塑性应变 $\bar{\epsilon}_p$ 的函数。 $\sigma_s(\bar{\epsilon}_p)$ 可从材料的单轴拉伸试验的 σ - ϵ 曲线得到。

以 S135 钢级的某钻杆接头材料为例,试验测得其弹性模量为 2.06×10^5 MPa,泊松比为 0.29。根据材料试验,可得其材料屈服极限为 893.0 MPa,强度极限为 1020.6 MPa。仿真计算时,需要将材料名义应力-名义应变转化为真实应力-塑性应变,如表 1 所示。根据实验,材料失效时塑性应变为 0.198,将其作为材料失效准则。考虑到含 40%~60% 重量锌粉末的螺纹脂的影响,配合面间(包括螺纹之间和台肩面之间)的摩擦系数取 0.08^[7]。

表 1 真实应力-塑性应变关系
Table 1 True stress-plastic strain data

真实应力/MPa	塑性应变	真实应力/MPa	塑性应变
827.4	0	961	0.01523
845.2	0.0001	976.5	0.02008
855.3	0.00023	1009.3	0.03059
861.4	0.00032	1035.4	0.04007
875.6	0.00069	1061.5	0.05041
888.1	0.00119	1082.9	0.06065
907.1	0.00251	1099.8	0.07082
927.3	0.00519	1110.5	0.08
944.6	0.01033	1117.2	0.09095

1.4 核心模型

油井管接头仿真平台的核心在于构建适用于复杂载荷工况条件的具有高计算精度的三维弹塑性有限元模型。油井管接头是由公扣、母扣通过三维螺旋曲面啮合而成,其受力分析是一个复杂的非线性问题,应力集中非常严重,要准确的模拟复杂载荷作用下油井管接头的力学特性,高质量的网格是关键,它直接决定计算精度和计算效率^[8]。本系统基于分块网格划分技术,在螺纹啮合区域,台肩接触区域布置细密的高质量六面体网格,从而可以

更加精确的模拟接触面上的接触压力、螺纹牙根部的应力集中;其他应力梯度小的区域,布置相对稀疏的网格,从而控制计算规模。

应用虚功原理,基于拉格朗日描述的油井管接头单元控制方程为^[9]:

$$\iiint_V \mathbf{S} \delta \mathbf{E} dV = \iint_A \mathbf{F} \delta u dA \quad (2)$$

式中: \mathbf{S} 为 Kirchhoff 应力张量; \mathbf{E} 为 Green 应变张量; \mathbf{F} 为单元表面上的力载荷矢量; δu 为虚位移; V 为初始构型中体积; A 为初始构型中表面积。

Green 应变张量 \mathbf{E} 采用增量形式得:

$$\delta \mathbf{E} = \mathbf{B} \delta u_e \quad (3)$$

$$\delta u = \mathbf{N} \delta u_e \quad (4)$$

式中: \mathbf{B} 为单元应变矩阵; u_e 为节点位移; \mathbf{N} 为单元形函数。考虑到节点位移变分的任意性,对所有单元的控制方程进行组合,得到油井管接头的有限元控制方程:

$$\sum \mathbf{c}^T \iiint_V \mathbf{B}^T \mathbf{S} dV = \sum \mathbf{c}^T \iint_A \mathbf{N}^T \mathbf{F} dA \quad (5)$$

式中, \mathbf{c}^T 为单元节点位移扩阶到结构系统节点位移的 Boolean 矩阵。

求解控制方程式(5),得到各节点的位移,根据几何方程可得单元的应变,随后根据材料的本构关系即可计算出单元应力。

1.5 可视化输出

利用专业后处理软件对计算结果进行可视化数据处理。通过应力云图的形式,可以较好地呈现复杂载荷作用下油井管接头的应力分布特征。通过提取加载过程中接触面上的接触力、接触面积变化规律曲线,可以清晰地描绘台肩啮合面以及各螺纹牙的承载情况等。通过数据分析,可以评估油井管接头的连接强度和密封性能,预测容易发生失效的位置及失效的模式,确定油井管接头所能承受的极限载荷组合,为油田正确选用接头型号及新型特殊螺纹接头的设计开发提供指导。

2 复杂载荷下油井管接头数值仿真平台的应用

以 $\left(4\frac{1}{2}\right)''$ API 标准钻杆接头 NC46 为例,其尺寸参数如表 2 所示。通过油井管接头数值仿真平台

分析其在上扣扭矩、轴向力、弯矩、工作扭矩作用下的力学特性。

表 2 钻杆接头尺寸参数
Table 2 Specifications of tool joint

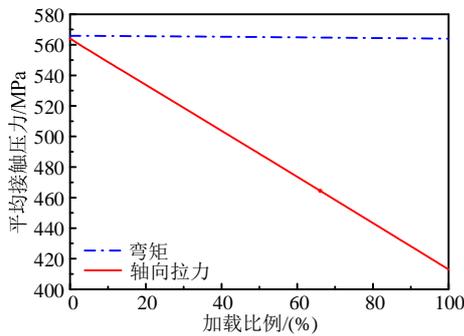
接头外径/mm	接头内径/mm	基面中径/mm	镗孔内径/mm
158.75	69.85	117.50	124.62
公接头长度/mm	丝扣连接型式	扣型	上扣扭矩/(kN·m)
114.3	NC46	V-0.038R	33.44

2.1 复杂载荷条件下钻杆接头三维应力特征分析

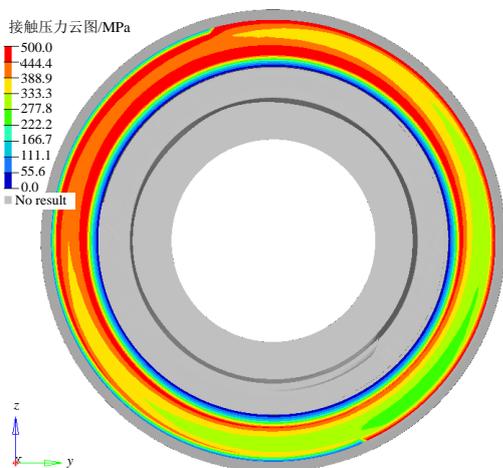
对紧扣后(上扣扭矩为 33.44 kN·m)的钻具接头施加 1500 kN 的轴向拉伸载荷和 18.33 kN·m 的 y 向弯矩(对应 10°/30 m 的钻具弯曲状态), 考察接头的力学特性。

2.1.1 密封性能

复杂载荷作用下钻具接头拥有可靠的密封性能是保障钻柱密封完整性的关键。对于 API NC46 钻具接头, 其密封性能主要依靠台肩实现。对紧扣后的钻具接头分别施加 1500 kN 的轴向拉伸载荷和 18.33 kN·m 的 y 向弯矩, 得到台肩上平均接触压力如图 3(a)所示。可见轴向拉力的作用使得台肩上的接触压力大幅下降, 容易引发接头台肩密封失效的风险^[10]。合理的上扣预紧和台肩设计是保证接头在大轴向力条件下密封可靠的关键。



(a) 平均接触压力变化规律



(b) 接触压力分布云图

图 3 台肩面受力特征

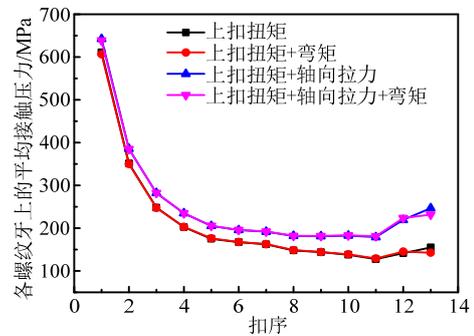
Fig.3 Mechanical characteristic of shoulder

弯矩作用下台肩啮合面上平均接触压力基本保持不变(如图 3(a)所示), 然而由于弯矩的不对称作用, 台肩面上接触压力分布变得不均匀(如图 3(b)所示), 受压侧接触压力大幅上升, 受拉侧接触压力大幅下降。过高的接触压力使得台肩面受压侧存在一定的塑性失效风险, 而过低的接触压力使得台肩面受拉侧存在一定的泄漏失效风险。

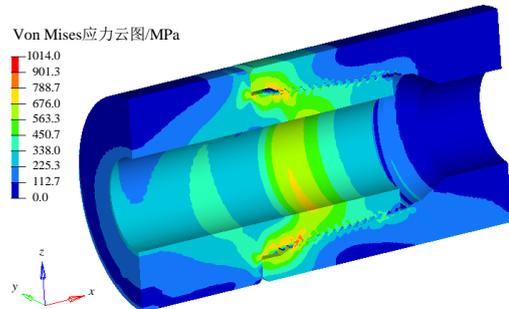
2.1.2 连接强度

外载荷作用下各螺纹牙上的承载特征直接决定了钻具接头的连接强度。图 4(a)给出了不同载荷工况条件下各螺纹牙的承载特征, 可见各螺纹牙承载很不均匀。上扣扭矩作用下, 前几个螺纹牙(靠近台肩的几个螺纹牙)的承载水平很高而其他螺纹牙承载水平较低, 这是由 API 单台肩钻具接头的受力特征决定的。对比可见, 弯矩的作用基本不改变各螺纹牙的承载特征(但同样会出现受拉侧、受压侧), 而轴向拉力的作用将提高各螺纹牙的承载水平, 特别是后端几牙螺纹。

由图 4(b)可见, 由于施加了弯矩, 钻具接头的 von Mises 应力分布呈现出不对称性, 尤以公扣台肩处最为明显。在复合载荷作用下, 公扣近台肩的前几个螺纹牙处应力水平较高, 是相对危险的区域。钻具接头的最大 von Mises 应力为 1014.0 MPa, 位于公扣近台肩第一个啮合螺纹牙处。



(a) 各螺纹牙承载特征



(b) 钻具接头 von Mises 应力分布

图 4 复杂载荷作用下钻具接头受力特征

Fig.4 Mechanical characteristics of tool joint under complex loads

2.2 计算结果的验证

为了将计算结果与 API 钻具接头抗扭强度计算公式所得结果(纯抗扭强度)作比较, 本节计算确定无轴向力条件下钻具接头的极限工作扭矩。

对紧扣后的钻具接头直接施加工作扭矩至其失效, 工作扭矩的施加曲线如图 5 所示。可见当工作扭矩大于一定数值后接头的预紧平衡状态被打破, 接头不再能保持稳定的啮合状态。此时工作扭矩开始出现波动, 这种波动反映了公扣、母扣啮合面在工作扭矩的作用下不断地平衡→滑动→平衡→滑动→最终破坏的过程。为了反映接头的承载能力, 取波动过程中工作扭矩有效值(即图 5 中几个波峰、波谷的均方根值 RMS)作为该钻具接头的极限工作扭矩。根据均方根值的定义, 计算出该钻具接头的极限工作扭矩为 $54.54 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

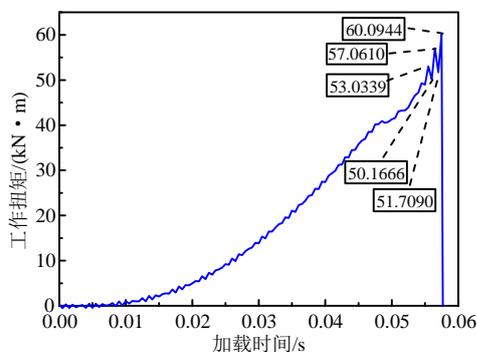


图 5 NC46 钻具接头工作扭矩加载曲线

Fig.5 Plots of working torque vs loading time for NC46 tool joint

根据 API RP 7G 提供的单台肩钻具接头抗扭强度计算公式, 无轴向力条件下该单台肩钻具接头的极限工作扭矩为 $55.73 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 与三维弹塑性有限元分析所得极限工作扭矩 $54.54 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 相比, 相对误差为 2.1%。

3 结论

(1) 油井管接头实物实验难以反映螺纹接头内部真实的应力-应变情况, 而且试验费用昂贵, 试验周期长, 复杂载荷很难施加, 数值仿真平台是对实物实验的有力补充。

(2) 复合载荷下油井管接头数值仿真平台可以在下井前快速、全面地评估油井管接头的连接强度和密封性能, 为油田合理选用油井管接头提供参考。

(3) 通过数值计算, 可以明确接头失效的机理, 确定出油井管接头的极限载荷工况, 为现场操作提供合理建议, 降低油井管接头失效风险。

(4) 基于油井管柱接头数值仿真平台, 可以深入探究复杂载荷条件下油井管接头的力学特性, 为新型特殊螺纹接头开发提供参考。

参考文献:

- [1] 蔡晓闻, 高连新. 我国油套管特殊螺纹接头的发展现状[J]. 焊管, 2008, 31(4): 41-44.
Cai Xiaowen, Gao Lianxin. Current development situation of the special thread connection for Tubing/Casing [J]. Welded Pipe and Tube, 2008, 31(4): 41-44. (in Chinese)
- [2] 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. (in Chinese)
- [3] Hilbert L B, Kalil I A. Evaluation of premium threaded connections using finite-element analysis and full-scale testing [C]. SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans, Louisiana, 1992: 23904.
- [4] 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 Jiao Tong University, 2005, 39(7): 1058-1062. (in Chinese)
- [5] 李再均, 鲜奇飏, 张兴超, 等. 双台肩钻具接头台肩距离的数值模拟和力学测试[J]. 石油矿场机械, 2012, 41(4): 47-52.
Li Zaijun, Xian Qibiao, Zhang Xingchao, et al. Numerical simulation and mechanical property test of double shoulder tool joint [J]. Oil Field Equipment, 2012, 41(4): 47-52. (in Chinese)
- [6] 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. (in Chinese)
- [7] API, API RP 7G: Recommended practice for drill stem design and operating limits [S]. 16th ed. 1998.
- [8] Benzley S E, Perry E, Merkle K, et al. A comparison of all hexagonal and all tetrahedral finite element meshes for elastic and elasto-plastic analysis [C]. Proceedings, 4th International Meshing Roundtable, Sandia National Laboratories Albuquerque, NM, 1995: 1-13.
- [9] 祝效华, 董亮亮, 董华, 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, et al. 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. (in Chinese)
- [10] 许志倩, 闫相祯, 杨秀娟. 非 API 套管接头完整性评估计算方法[J]. 工程力学, 2016, 33(2): 188-199.
Xu Zhiqian, Yan Xiangzhen, Yang Xiujuan, et al. Integrity evaluation method for non-API casing connections [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(2): 188-199. (in Chinese)