

《ISO 13679：石油天然气工业 套管及油管螺纹连接试验程序》的仿真方法

张建兵¹ 白松² 李双贵³ 陈晓华³

1. 西安石油大学机械工程学院 2. 陕西国防工业职业技术学院 3. 中国石化西北油田分公司工程技术研究院

摘 要 依照《ISO 13679:石油天然气工业 套管及油管螺纹连接试验程序》进行实物试验并据此评价油管和套管特殊扣的性能,不仅耗时长而且成本高昂。为此,以 $\text{Ø}73.0\text{ mm}\times 5.51\text{ mm}$ J55 钢级中低压力、中高温度的经济型气密封特殊扣为例,基于 ABAQUS 软件,通过建立有限元模型,在考虑仿真分析过程中的几何非线性、材料非线性和边界条件非线性耦合问题的基础上,依据弹塑性的双线性等向强化模型和超弹性 Moony-Rivlin 模型的材料本构关系,对上扣工况和 ISO 13679 的 II 级试验 B 系载荷包络线工况进行了仿真评价,计算得到了各个工况下特殊扣的接触位移、最大接触压力、密封积分强度、等效应力等重要参数,其计算结果与实物密封试验结果的误差小于 7.3%,对于密封性能的有限元分析结果与实验结果一致,进而利用上述参数评价了特殊扣在各工况下的结构与密封性能。结论认为,按照 ISO 13679 的试验内容和程序所建立的仿真评价方法,能够高效地对气密封特殊扣的性能进行评价,可以极大地节约时间成本与经济成本,能在一定程度上代替特殊扣的实物评价。

关键词 油管 套管 特殊扣 密封 弹塑性接触 仿真评价 ISO 13679 ABAQUS 软件

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2017.10.009

A simulation evaluation method for testing casing and tubing connections based on ISO 13679 test procedures

Zhang Jianbing¹, Bai Song², Li Shuanggui³ & Chen Xiaohua³

(1. College of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 2. Shaanxi Institute of Technology, Xi'an, Shaanxi 710300, China; 3. Engineering Technology Institute of Sinopec Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 37, ISSUE 10, pp.66-72, 10/25/2017. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: It is time-consuming and costly to evaluate tubing and casing connections by conducting a full-scale test in accordance with ISO 13679:2002 – *Petroleum and natural gas industries—Procedures for testing casing and tubing connections*. Therefore, we explored a method through computer simulation by which an efficient evaluation was made on the gas-tight seal connections of casing and tubing in line with the test regulations of the ISO 13679. An indoor test was thus conducted on the economical J55-grade gas-tight seal connections with $\text{Ø}73.0\text{ mm}\times 5.51\text{ mm}$. First, test procedures and methods for evaluating connections specified in the ISO 13679 were adopted, and the ABAQUS finite element analysis software was applied. Then, considering the geometric nonlinearity, material nonlinearity and boundary condition nonlinearity in the finite element analysis process, the material constitutive relation of elastoplastic bilinear isotropic model and hyperelastic Mooney–Rivlin model was applied to make simulation calculation of the working conditions of making up of connections and of level-II-Series B test/Test Load Envelope of ISO 13679. And, the key parameters were obtained including contact displacement, maximum contact pressure, seal-integrated intensity and equivalent stress of the connections under different working conditions. On this basis, an effective evaluation was made on structures and sealing properties of connections under different working conditions. The simulation results agreed so well with the full-scale test results with an error less than 7.3%. Finally, the above parameters were applied in simulated evaluation of connections' structures and sealing performances under different working conditions. In conclusion, this simulation evaluation method based upon the test content and procedures of ISO 13679 is more feasible and economical than a full-scale test in the evaluation of gas-tight connections.

Keywords: Tubing; Casing; Premium thread joint; Seal; Elastic–plastic contact; Simulation Evaluation; ISO 13679; ABAQUS

基金项目: 国家自然科学基金项目“膨胀套管螺纹连接几何、材料与接触非线性工作特性研究”(编号: 51074126)、“基于构型力学理论的井壁损伤失稳研究”(编号: 51674200)。

作者简介: 张建兵, 1974年生, 教授, 博士; 研究方向主要为油井管新技术与理论。地址: (710065) 陕西省西安市雁塔区电子二路18号。电话: 13992826038。ORCID: 0000-0002-3234-185X。E-mail: zhjb@xssyu.edu.cn

0 引言

2002 年发布的《ISO 13679: 石油天然气工业 套管及油管螺纹连接试验程序》^[1] 是油、套管特殊扣实物力学性能评价的权威标准^[2-3]。ISO 13679 试验程序复杂, 对试验设备要求极高, 完成一套完整的特殊扣 IV 级评价试验至少约需 3 个半月, 试验费用约数百万元。当前, 国内仅有国家石油管材质量监督检验中心和国家石油天然气管材工程技术研究中心等极少数单位具备开展该评价试验的硬件条件和检验资质。

近年来, 计算机仿真技术取得了长足发展^[4-5], 国内外学者已将计算机有限元分析手段用于油、套管特殊扣的研究工作中。Sugino 等^[6] 在 VAM21 特殊扣开发过程中利用有限元方法对其密封性能进行了分析验证。Gabriel 等^[7] 结合有限元分析方法和全尺寸实物试验方法对一种套管特殊扣进行了疲劳、过扭以及密封性能评价。Zhu 等^[8] 利用 ANSYS 有限元软件分析了外径大于 508 mm 的大尺寸套管在不同的预上扣扭矩下的螺纹应力分布特征。许志倩等^[9-10] 利用有限元软件对 VAM TOP 套管特殊扣在轴向力作用下的承载分布规律进行了计算分析, 还将微观泄漏机理引入非 API 套管特殊扣密封性能研究, 建立了表面粗糙度和密封结构加工参数与微观气体泄漏率之间的函数映射关系。祝效华等^[11] 建立了磨损套管连接螺纹的三维数值仿真模型, 研究了复杂结构井中套管的上扣特性以及固井条件下磨损深度、磨损开度与井眼曲率对套管连接螺纹的影响。祝效华等^[12] 还借助有限元法设计了一种大位移井用超高抗扭的双台肩钻杆螺纹接头。狄勤丰等^[13] 建立了双台肩钻杆特殊扣的三维有限元模型, 利用显式动力学有限元方法分析了双台肩钻杆特殊扣在上扣扭矩、轴向拉力和弯矩作用下的力学特性。许定江等^[14] 利用 ANSYS 软件对偏梯形螺纹特殊扣进行了不同工况下的温度—应力耦合计算, 分析了温度载荷对套管螺纹特殊扣应力、接触压力及特殊扣附近位移的影响。窦益华等^[15] 利用 ABAQUS 软件建立了某特殊螺纹油管特殊扣三维有限元模型, 分析了特殊扣在最佳、最小、最大上扣扭矩下的上扣过程。王建东等^[16] 采用有限元分析方法对比了锥面 / 锥面和弧面 / 锥面这两种不同的主密封结构形式在上扣、拉伸、弯曲及内压加拉伸载荷条件下的相关技术参数, 得到了不同型面组合的密封能力随载荷的变化规律。高连新等^[17] 用有限元方法对一种窄间隙特殊扣套管的抗拉强度和不同拉伸载荷下密封面上的接触压力进行了分析,

并以此对套管的实物试验性能进行验证。

总体来看, 以往借助计算机有限元对油、套管特殊扣的研究大多着眼于特殊扣的结构对其某一方面的技术参数的影响规律的分析。这些研究工作对特殊扣的设计开发起到了很好的推动作用, 但按照 ISO 13679 的试验内容和程序对油、套管特殊扣性能所进行的系统性的计算机仿真评价还基本没有看到。

本文探索按照 ISO 13679 的试验程序和方法对油、套管特殊扣进行计算机仿真评价, 从而摸索一种可以在一定程度上作为全尺寸实物实验代替手段的特殊扣评价方法。

1 仿真评价程序及载荷

ISO 13679 对特殊扣的评价试验分为 4 个级别, 每个级别又分为 3 个系列, 从而构成一个试验矩阵, 对此有兴趣的读者请参看标准原文, 限于篇幅, 这里不做赘述。对于给定的特殊扣, 根据其使用环境工况选定试验级别和相应的试验系列, 以在试验过程中螺纹特殊扣不发生结构损坏和介质泄露量在允许范围内为通过试验。

笔者以一种广泛用于鄂尔多斯盆地长庆油田和延长油田中低压气井和中等温度的经济型气密封特殊扣进行分析, 该特殊扣螺纹牙型为长圆螺纹, 以密封槽和橡胶密封圈构成主密封, 外螺纹对顶面为副密封。选定 ISO 13679 的 II 级试验的 B 系列条件进行仿真评价。

1) 施加过盈量模拟上扣。螺纹处径向施加过盈量 0.1 mm, 对顶面轴向施加过盈量 0.05 mm。

2) 依据 ISO 13679 的 II 级 B 系试验载荷包络线进行加载并计算, 将弯曲载荷等效成轴向力进行处理, 载荷工况见表 1。

表 1 载荷包络线各载荷点的值

载荷点	管体弯曲度 /[$(^{\circ}) \cdot (30 \text{ m})^{-1}$]	轴向总载荷 /kN	内压 /MPa
1	0	240.87	0.00
2	20	240.87	36.80
3	20	202.84	39.19
4	20	123.22	40.80
5	20	0.00	37.57
6	20	-77.47	32.63
7	20	-154.95	25.24
8	20	-220.80	16.35
9	0	-220.80	0.00

注: 管体弯曲载荷等效为轴向力

2 仿真评价的主要技术参数

经分析,选定以下参数作为仿真评价气密封特殊扣性能的主要依据。

1) 接触位移。要保证特殊扣主、副密封不失效,首先要使接触面保持接触状态,因此特殊扣密封结构在径向与轴向的接触表面单元位移可作为评判特殊扣密封结构性能的一个重要参数。

2) 最大接触压力。本文分析的特殊扣的主密封为橡胶对金属密封,这种密封以阻断、自密封、过盈为其密封机理,即接触压力越高,其密封能力越强。特殊扣金属材料的泊松比、上扣变形和介质压力直接影响密封副间的接触压力。防止泄漏最主要的条件是金属与橡胶密封面之间的间隙为 0,若使密封面间隙为 0,则密封面间的最大接触压力应大于密封介质的压力。其中上扣变形与介质压力共同作用下的接触压力模型为式(1),满足密封系统不泄露的条件是式(2)。

$$p_m = q_0 + p_{\max} \quad (1)$$

$$p < q_0 + p_{\max} \quad (2)$$

式中 p_m 表示密封耦合面的最大接触压力, MPa; q_0 表示预紧变形后耦合面的最大接触压力, MPa; p_{\max} 表示工作介质作用下的最大压力, MPa; p 表示介质压力, MPa。

3) 密封积分强度。本文分析的特殊扣在外螺纹对顶面部位构成金属-金属的辅助密封,这里采用密封积分强度来表征其密封性能。密封积分强度不仅考虑了接触压力的影响,还引入了接触长度。

$$W = \int p_n dL \quad (3)$$

式中 W 表示密封积分强度, MPa·mm; p_n 表示单元接触压力, MPa; L 表示接触长度, mm。

4) 等效应力。为保证密封面不发生塑性变形以及特殊扣的结构完整性,应使特殊扣各部位的等效应力小于材料的强度极限。

3 有限元模型及处理方法

3.1 有限元模型建立

该特殊扣管体和接箍为低合金钢,密封圈为超弹性近不可压缩橡胶材料,材料的力学性能分别见表 2 和表 3。采用轴对称三节点三角形实体单元划分管体和接箍网格,密封圈网格单元选用三角形杂交单元,有限元模型见图 1。

表 2 管体与接箍材料力学性能表

弹性模量 /MPa	泊松比	屈服强度 /MPa	拉伸强度 /MPa	摩擦因数	膨胀系数
210 000	0.3	379	517	0.025	0.000 010

表 3 橡胶密封圈材料力学性能表

泊松比	Mooney 系数			摩擦因数	膨胀系数
	C_{01}	C_{10}	D_1		
0.4	8	32	0.000 01	0.025	0.000 59

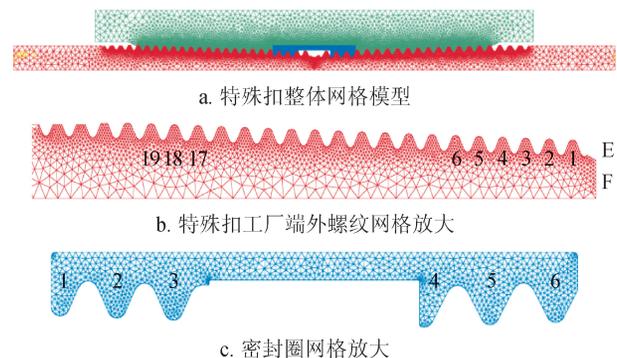


图 1 特殊扣有限元模型图

3.2 非线性处理

特殊扣在井下复杂载荷的作用下会产生塑性变形^[18],管体和接箍材料的应力应变关系不再是线弹性关系,所以此问题属于大应变或有限应变问题。橡胶密封圈的应力应变关系是一个非常复杂的非线性函数,可借助 2 个应变不变量和变形前后的体积比,用应变能函数表示。本文分析的特殊扣存在接箍内螺纹与管体外螺纹、管体外螺纹工厂端与现场端、密封圈内螺纹与管体外螺纹、密封圈两端与接箍密封槽等多对接触面。这些接触面中有的属于过盈配合,密封圈材料受到过盈配合的高度约束,变形过程中橡胶体体积发生变化,应该考虑材料的可压缩性。上扣过程及上扣后螺纹副发生接触,而接触部分处于弹塑性状态下,所以该特殊扣的仿真分析涉及几何非线性、材料非线性和边界条件非线性耦合问题,这里采用弹塑性接触有限元法求解。

3.2.1 几何非线性和材料非线性处理

采用 ABAQUS/Standard 隐式模式,每个分析步骤都开启几何非线性。采用 Newton-Raphson 算法增量迭代, Mises 屈服条件,相关联流动法则。硬化规律为线性等向硬化,硬化参数采用等效塑性应变。本构关系、屈服函数、流动法则的表达如下:

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl}^{ep} d\varepsilon_{kl} \text{ 或 } d\sigma_{ij} = D_{ijkl} (d\varepsilon_{kl} - d\varepsilon_{kl}^p) \quad (4)$$

$$f = f(\sigma, \bar{\varepsilon}^p) = \overline{3J_2}' - (\sigma_y^0 + H' \bar{\varepsilon}^p) \leq 0 \quad (5)$$

$$d\varepsilon_{kl}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}} \quad (6)$$

式中 $d\sigma_{ij}$ 、 $d\varepsilon_{kl}$ 和 $d\varepsilon_{kl}^p$ 分别表示应力增量、应变增量、塑性应变增量； D_{ijkl} 和 D_{ijkl}^{ep} 分别表示弹性模量张量、弹塑性模量张量； f 表示屈服函数， $\overline{J_2}'$ 表示偏应力张量的第二不变量， σ_y^0 表示初始屈服强度， H' 表示硬化系数， $\bar{\varepsilon}^p$ 表示等效塑性应变， $d\lambda$ 表示塑性乘子增量， $d\lambda = d\bar{\varepsilon}^p$ ， σ_{kl} 为应力分量。

橡胶材料的 Mooney-Rivlin 形式超弹性本构关系为^[19]：

$$U = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2 \quad (7)$$

式中 U 表示应变势能； \bar{I}_1 和 \bar{I}_2 表示材料中的扭曲度量；参数 C_{10} 、 C_{01} 描述材料的剪切特性， D_1 表示材料的可压缩性， J 是变形后与变形前的体积比。

依据弹塑性材料和超弹性材料本构关系，以双线性等向强化模型和 Mooney-Rivlin 模型来处理材料非线性。

3.2.2 接触边界处理

在两接触体可能的公共边界 S_c 上定义局部坐标系 nab ，向量 n 表示可能接触面的法向， δ 表示可能接触面之间的初始间隙， u 表示位移，上标 1 和 2 分别表示接触体 1 和 2。接触条件可定义为可能接触面的相对间距及相对间距的增量^[20]：

$$d\varepsilon_n = du_n^1 - du_n^2 + \delta \quad (8)$$

接触条件的迭代是一个搜索接触状态的过程，接触面可能会出现黏结、滑移、张开、嵌入等 4 种状态，特殊扣接触面可能还存在初始间隙为负的情况，因此采用的接触算法为直接约束法。定义外螺纹端为接触体，接箍和橡胶密封圈为目标体，接触力发生在接触体的节点与目标体表面之间。为了将接触体和目标体的单元组合在一起，对单元刚度矩阵进行转换并消除接触体节点的法向自由度。分析中首先设定接触对的主、从面，开启有限滑移模式；设置初始间隙和接触面之间的容差范围。

在 ABAQUS/Standard 中采用一致切线刚度将材料非线性和接触迭代算法同时进行，可根据系统非线性的程度自动控制增量的大小和所需迭代次数，以每次迭代的结果修正结构位移，得到更新的刚度矩阵，最终得到收敛的结果。

4 评价参数及有限元模型的适用性

通过实验对有限元模型进行了修正及验证。设计了简化的金属—金属及金属—橡胶密封结构试样，第一组试样为两片叠加在一起的 37Mn₅ 金属板，模拟金属对金属密封，板宽为 15 mm，厚 9 mm，长 17 mm；第二组试样为在第一组试样的金属板间增加了 2 mm 厚的丁腈橡胶片，模拟金属对橡胶密封。在密封试验台上进行了试样气体密封试验，在试样上粘贴了应变片来测量试验过程中试样的应力应变。试验时将试样浸泡于液体环境中，向金属板施加变化的相向压缩力及沿其长度方向的拉力或压力载荷，同时向试样密封部位施加气体压力，有专门装置来捕获金属板间泄露的气泡。

同时用有限元模型对试样的密封性能及位移与应变大小进行分析计算，有限元建模的几何参数及材料参数完全取自试样的实测值。利用实物试验结果对有限元模型进行了修正，最后得到的主要参数的计算结果与实物密封试验结果的误差在 7.3% 以内，对于密封性能的有限元分析结论与实验结果一致。

5 结果及分析

5.1 接触位移

图 2 为本文特殊扣上扣工况和载荷包络线工况下工厂端外螺纹各牙齿的位移，螺纹牙齿序号的编排方式参见图 1-b。

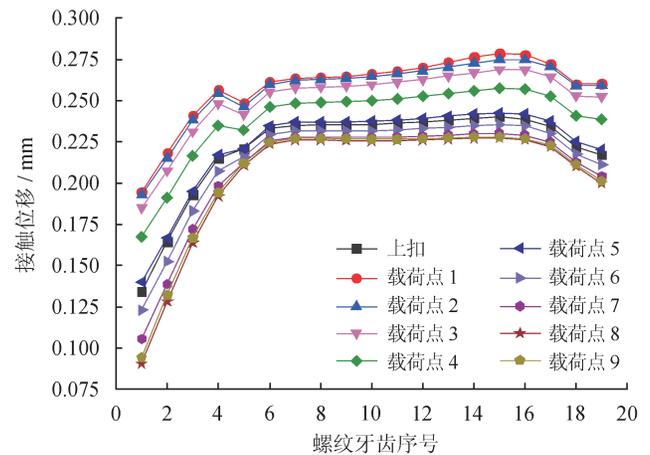


图 2 各工况下特殊扣工厂端外螺纹牙齿位移图

由图 2 可见，沿着从特殊扣端部到螺纹根部的方向，在与密封圈内螺纹啮合处，最大位移逐渐增大，在橡胶材料与金属材料过渡的第 5 牙螺纹，最大位移发生突变；在与金属接箍螺纹啮合处，最大位移

缓慢增大，到最后 3 牙螺纹最大位移有减小的趋势；密封圈部位的最大位移在各载荷点均小于其他部位。上扣工况下，特殊扣外螺纹的最大位移为 0.24 mm；载荷包络线工况下，最大位移发生在特殊扣只受拉伸载荷时的工况，即载荷点 1，此时第 15 牙螺纹牙齿的位移最大，为 0.278 mm。在有拉伸载荷的 1、2、3 和 4 载荷点的最大位移明显大于其他载荷点，说明特殊扣外螺纹最大位移受轴向载荷的影响较大。

图 3 为各工况下密封圈内螺纹齿侧径向位移，螺纹牙齿排列顺序见图 1-c。可以看出，依载荷点增大的顺序，密封圈各牙齿的径向位移先增大后减小。各工况下最大径向位移均发生在第 3 牙螺纹上，在载荷点 5 出现最大位移值，其大小为 0.1 mm，此值远小于特殊扣金属螺纹的位移值。观察图中有内压作用的第 2 到第 8 载荷点的位移情况可以发现，内压的作用对密封圈径向位移影响明显，有内压载荷时的位移值明显大于无内压的工况，尤其是在内压载荷开始出现的载荷点 2 位移发生了明显增大。内压促使管子外螺纹涨大而压迫密封圈，这时可以产生自密封效果而进一步提高特殊扣的密封性能。

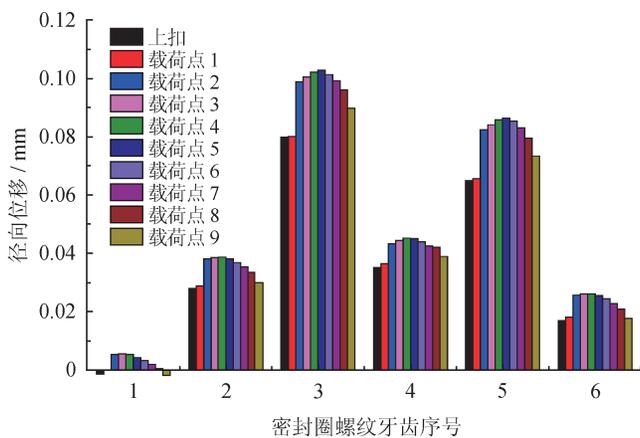


图 3 各工况下密封圈螺纹径向位移图

图 4 为各工况下特殊扣外螺纹对顶面切线上点的轴向位移，图 4 中以对顶面上最外侧的点作为切线的起点，横坐标表示切线上向着对顶面内侧的方向各点相对切线起点的距离，位移正值表示远离对顶面初始位置的位移，负值反之。

可见，在各工况下对顶面上沿着由外侧向内侧的方向，轴向位移逐渐减小，即最外侧轴向位移最大，最内侧轴向位移最小。这一现象在实物试验中是很难发现的，这充分体现了仿真评价的优势。在拉伸载荷与内压载荷作用下的 1、2、3 载荷点，对顶面轴向位移为正值，说明密封副有分离的趋势，最大

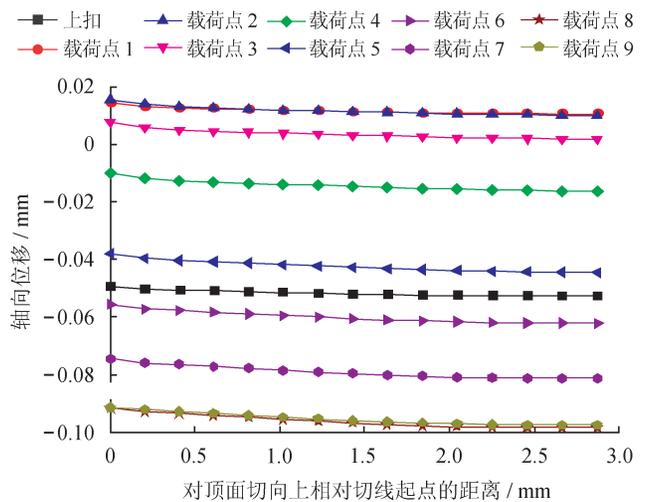


图 4 各工况下外螺纹对顶面上的轴向位移图

轴向位移出现在轴向拉伸载荷最大时的载荷点 1，其值为 0.02 mm，但仍小于上扣后的轴向过盈量，对顶面的辅助密封作用减弱，但并未完全丧失。

5.2 最大接触压力

计算得到了各工况下特殊扣工厂端外螺纹各牙齿齿侧的接触压力。外螺纹第 2、3、4 牙螺纹与密封圈螺纹旋合，起主密封作用，各工况下这 3 个牙齿齿侧接触压力始终稳定维持在 100 MPa 左右，可见该特殊扣的主密封结构在各工况下都是可靠稳定的。在与接箍螺纹接触的部位，接触压力曲线总体呈凹槽状分布，在第 5、6 牙和最后 3 牙处，螺纹牙齿齿侧的接触压力比其他螺纹牙齿大很多，且已经超过了螺纹材料的屈服强度，说明螺纹在这些部位有发生粘扣的趋势。

分析密封圈在各工况下的接触压力可以发现，上扣后密封圈预紧变形，产生了较大的接触压力，最大值为 99.15 MPa。在仅有内压载荷作用的载荷点 5 接触应力最大，为 144.75 MPa。分析可知，在各工况下，除了第 4 牙螺纹外，密封圈其余各密封接触面上最大接触压力均远大于各载荷点的内压载荷值，说明该特殊扣的主密封的密封性能是可靠的。

分析外螺纹对顶面在各工况下的接触压力可以看出，沿着对顶面切线由外侧向内侧的方向，接触压力基本呈现先增大而后持平的走势。除了对顶面最外侧，在各工况下接触压力的值均介于 330 MPa 与 500 MPa 之间，其中纯拉伸载荷下的接触压力水平最低，这与前面对接触位移的分析结果是一致的。从仿真结果来看，这个接触压力水平是能确保对顶面的辅助密封作用的。

5.3 密封积分强度

图 5 为各工况下特殊扣的辅助密封部位的密封积分强度。

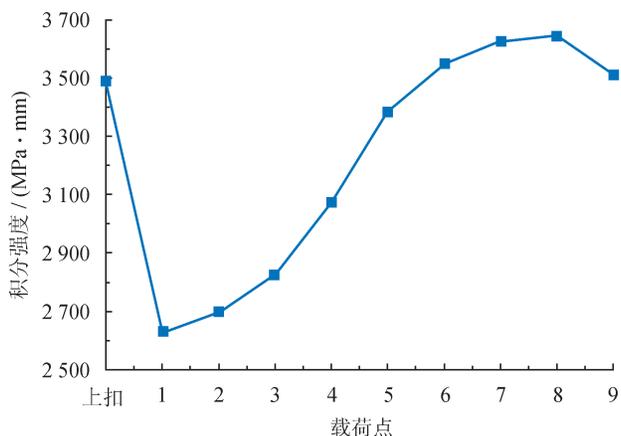


图 5 各工况下特殊扣辅助密封部位的密封积分强度图

上扣时对顶面轴向过盈了 0.05 mm，因此密封积分强度相对较大，其值为 3 489 MPa · mm，载荷包络线工况下密封积分强度先缓慢增大，之后略有减小，最大密封积分强度值为 3 648 MPa · mm，最小值为 2 824 MPa · mm。在有轴向拉伸载荷(载荷点 1、2、3)时，对顶面趋于分离，密封积分强度值小，密封副的密封效果减弱，在有轴向压缩载荷时，辅助密封面接触应力大，密封积分强度值水平高，密封可靠性也高。

5.4 等效应力

计算得到了特殊扣上扣后各部位的等效应力，发现管体的总体应力水平比接箍高，最大应力位于对顶面部位，其值为 359.10 MPa，未超过材料的强度极限。但由于该特殊扣材料强度低 (J55 钢级)，拧紧后整体应力水平偏高，这增加了螺纹粘扣的可能性。在管子对顶的台肩部位存在高压压缩应力，其反作用力使接箍产生附加的轴向拉应力，但由于接箍厚度远大于管体，该轴向应力不会影响特殊扣的连接强度。

载荷包络线工况下特殊扣关键部位的最大等效应力如图 6 所示。由图 6 可知，在各载荷点各关键部位的等效应力水平比较平稳，应力分布和变化趋势与上扣状态的情况相似，密封圈内螺纹在加载过程中应力保持在较低水平。不同载荷点最大等效应力出现的位置基本上都在螺纹牙部位，最大等效应力的最大值未超过材料的强度极限。总体来说，各工况下特殊扣应力分布较合理，不论是等效应力、轴

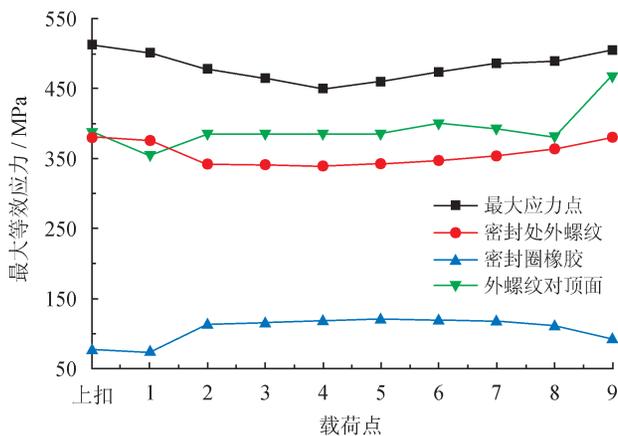


图 6 载荷包络线工况下特殊扣关键部位最大等效应力图

向应力还是径向应力，外螺纹的应力值总是大于接箍的应力值，说明与接箍相比，管体外螺纹容易失效。

6 认识与建议

本文按照 ISO 13679 的实物评价程序和要求，采用计算机有限元方法对一种气密封油管特殊扣进行了仿真评价。所分析的特殊扣既包含弹塑性材料，又包含超弹性橡胶材料，接触边界多、接触条件复杂，仿真评价分析具有一定的代表性和难度。

依据本文的评价参数和方法可以用来评价油管特殊扣的结构与密封完整性。限于篇幅，本文仅进行了载荷包络线评价，未进行热循环试验评价，但作为一种方法上的探索，已足以说明采用计算机有限元仿真评价方法按照 ISO 13679 程序要求进行复杂载荷下特殊扣结构与密封完整性评价是可行的，采用仿真评价手段可以大大地减少特殊扣力学评价的经济成本和时间。同时，计算机仿真评价还可以发现实物试验中所无法观察到的现象，对于优化改进特殊扣设计具有参考价值。相信随着计算机仿真技术的发展，其在油套管特殊扣评价中的应用也会不断发展和完善，将来可以在一定程度上以计算机仿真评价作为特殊扣实物评价的替代手段。

参 考 文 献

- [1] American Petroleum Institute. Petroleum and natural gas industries—Procedures for testing casing and tubing connections[S]. API RP 5C5/ISO 13679, 2002.
- [2] 赵永安, 丁维军, 张忠铨, 徐永康. 复杂井况条件下的管柱完整性研究及产品开发生[J]. 宝钢技术, 2015(1): 66-71.
Zhao Yong'an, Ding Weijun, Zhang Zhonghua & Xu Yongkang. Research on the tubing string integrity under complex well

- conditions and product development[J]. Bao-Steel Technology, 2015(1): 66-71.
- [3] 王双来, 彭娜, 刘卜. 高温高压井特殊螺接头的选用与评价试验[J]. 钢管, 2016, 45(1): 64-71.
Wang Shuanglai, Peng Na & Liu Bu. Selection of premium connection as used in HPHT well and relevant evaluation test methods[J]. Steel Pipe, 2016, 45(1): 64-71.
- [4] 岳彩旭, 蔡春彬, 黄翠, 刘二亮. 切削加工过程有限元仿真研究的最新进展[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(4): 815-825.
Yu Caixu, Cai Chunbin, Huang Cui & Liu Erliang. Recent advances in finite element simulation of machining processes[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(4): 815-825.
- [5] 赖俊杰, 何吉, 向前. 高性能计算在水工结构工程数值仿真中的应用进展[J]. 武汉大学学报(工学版), 2015, 48(5): 634-638.
Lai Junjie, He Ji & Xiang Qian. Advances in application of high performance computing to hydraulic structure numerical simulation[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2015, 48(5): 634-638.
- [6] Sugino M, Nakamura K, Yamaguchi S, Daly D, Briquet G & Verger E. Development of an innovative high-performance premium threaded connection for OCTG[C]//Offshore Technology Conference, 3-6 May 2010, Houston, Texas, USA. DOI: <http://dx.doi.org/10.4043/20734-MS>.
- [7] Carcagno GE, Bufalini A, Conde L & Toscano R. Low SCF integral premium connections for use in highly demanding casing and tubing drilling operations[C]//Offshore Technology Conference, 3-6 May 2004, Houston, Texas, USA. DOI: <http://dx.doi.org/10.4043/16566-MS>.
- [8] Zhu BZ, Steen T, Patterson WR Jr, Thomas MA, Balaji DK, Kumar GR. Low cycle fatigue analysis of threaded connectors for subsea drilling and production[C]//SPE Offshore Europe Oil and Gas Conference and Exhibition, 3-6 September 2013, Aberdeen, UK. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/166554-MS>.
- [9] 许志倩, 闫相祯, 杨秀娟. 特殊螺纹套管接头连接性能的安全可靠性分析[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(9): 1146-1153.
Xu Zhiqian, Yan Xiangzhen & Yang Xiujuan. Safety reliability analysis of connection capability of non-API casing connection joints[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(9): 1146-1153.
- [10] 许志倩, 闫相祯, 杨秀娟, 殷晓康, 王明达, 郑晓云. 微观泄漏机理在非API套管接头密封性能评估中的应用[J]. 石油学报, 2014, 35(5): 963-971.
Xu Zhiqian, Yan Xiangzhen, Yang Xiujuan, Yin Xiaokang, Wang Mingda & Zheng Xiaoyun. Application of micro-leakage mechanism for evaluating the sealing performance of non-API casing connections[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(5): 963-971.
- [11] 祝效华, 张智, 常学军, 李良川. 复杂结构井磨损套管连接螺纹的三维力学行为[J]. 石油学报, 2015, 36(6): 748-753.
Zhu Xiaohua, Zhang Zhi, Chang Xuejun & Li Liangchuang. Three-dimensional mechanical behavior of worn casing connecting thread in complex structural well[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(6): 748-753.
- [12] 祝效华, 张智. 大位移井超高抗扭双台肩钻杆接头的设计[J]. 天然气工业, 2017, 37(4): 89-97.
Zhu Xiaohua & Zhang Zhi. Design of an ultra-high torque double-shoulder tool joint for extended reach wells[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(4): 89-97.
- [13] 狄勤丰, 陈锋, 王文昌, 王明杰, 赵域栋, 袁鹏斌, 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, Wang Mingjie, Zhao Yudong, Yuan Pengbin, et al. Three-dimensional mechanical analysis of the double-shouldered tool joint[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(5): 871-877.
- [14] 许定江, 练章华, 邓元洲, 林铁军. 不同工况下套管偏梯形螺纹连接的温度—应力耦合[J]. 石油机械, 2015, 43(12): 68-72.
Xu Dingjiang, Lian Zhanghua, Deng Yuanzhou & Lin Tiejun. Analysis of temperature—stress coupling on casing buttress thread in different working conditions[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(12): 68-72.
- [15] 窦益华, 王轲, 于洋, 曹银萍. 特殊螺纹油管接头上扣性能三维有限元分析[J]. 石油机械, 2015, 43(4): 99-104.
Dou Yihua, Wang Ke, Yu Yang & Cao Yinping. Study on makeup characteristics of premium connection by three dimensional finite element analysis[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(4): 99-104.
- [16] 王建有, 冯耀荣, 林凯, 秦长毅, 宋延鹏. 特殊螺纹接头密封结构比对分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(5): 126-130.
Wang Jiandong, Feng Yaorong, Lin Kai, Qin Changyi & Song Yanpeng. Comparison analysis of premium connection's seal structure[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010, 34(5): 126-130.
- [17] 高连新, 汪华林, 张毅, 韩新利. 窄间隙特殊扣套管的使用性能分析[J]. 天然气工业, 2007, 27(11): 58-60.
Gao Lianxin, Wang Hualin, Zhang Yi & Han Xinli. Performance analysis for casings with special small-clearance threads[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(11): 58-60.
- [18] 李军, 陈勉, 柳贡慧, 张辉. 套管、水泥环及井壁围岩组合体的弹塑性分析[J]. 石油学报, 2005, 26(6): 99-103.
Li Jun, Chen Mian, Liu Gonghui & Zhang Hui. Elastic-plastic analysis of casing-concrete sheath-rock combination[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(6): 99-103.
- [19] 庄茁, 由小川, 廖剑晖, 岑松, 沈新普, 梁明刚. 基于ABAQUS的有限元分析和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
Zhuang Zhuo, You Xiaochuan, Liao Jianhui, Cen Song, Shen Xinpu & Liang Minggang. Finite element analysis and application based on ABAQUS[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [20] 胡志强, 陈健云, 陈万吉, 林皋, 李学文. 弹塑性接触问题的非光滑非线性方程组方法[J]. 计算力学学报, 2003, 26(6): 684-690.
Hu Zhiqiang, Chen Jianyun, Chen Wanji, Lin Gao & Li Xuewen. Elasto-plastic contact problem for nonsmooth nonlinear equations method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2003, 26(6): 684-690.