

# 基于静态模型和应变率模型的特殊螺纹接头有限元分析

李小兵, 胡志立

( 衡阳华菱钢管有限公司, 湖南 衡阳 421001 )

**摘要:** 利用 ABAQUS 软件, 分析 L80 钢级 HSM-2 特殊螺纹接头静态模型和应变率模型对上扣扭矩、应力应变及密封接触压力的影响, 并与实测结果进行对比。对比分析结果表明: 采用静态模型计算时, 其屈服扭矩结果严重偏小, 并出现特殊螺纹接头过早到达屈服扭矩的假象, 等效塑性应变结果偏大; 采用应变率模型计算的屈服扭矩结果比较符合实际, 材料屈服强度得到提高; 静态模型和应变率模型对密封性能的计算结果基本一致。

**关键词:** 油套管; 特殊螺纹接头; 有限元分析; 应变率; 上扣扭矩; 应力; 应变; 密封接触压力

**中图分类号:** TG335.71; TE931+.2 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-2311(2017)04-0062-04

## Finite Element Analysis of Premium Connection Base on Static Model and Strain Rate Model

LI Xiaobing, HU Zhili

( Hengyang Valin Steel Tube Co., Ltd., Hengyang 421001, China )

**Abstract:** The effects of the static model and strain rate model used for the L80 HSM-2 premium connection on the calculation of make-up torque, stress strain and sealing contact pressure are analyzed by use of ABAQUS software and the analysis is compared with the experimental cases. The results show that the yield torque is seriously low, the yield torque of the premium connection appears prematurely and the equivalent plastic strain is higher when calculating by the static model, while the yield torque conforms to the actual cases with the material strength increased when calculating by the strain rate model. The calculation results of the sealing performance are basically consistent when calculating either by the static model or by the strain rate model.

**Key words:** tubing & casing; premium connection; finite element analysis; strain rate; make-up torque; stress; strain; sealing contact pressure

目前, 利用有限元和试验相结合的方法研究特殊螺纹接头, 已引起广泛关注<sup>[1]</sup>。特殊螺纹接头能适应普通 API 螺纹接头无法胜任的深井、超深井、高温高压油气井、稠油热采井等恶劣井况<sup>[2-3]</sup>。特殊螺纹接头上扣扭矩是一个很重要的参数, 是上扣过程的直接反馈, 上扣扭矩曲线也反映了接头加工质量和上扣质量。扭矩过大或过小都会影响接头的使用性能, 不当的上扣扭矩会使特殊螺纹接头存在泄漏风险, 严重时会造成掉井事故的发生。因此, 特殊螺纹接头的上扣特性得到了广泛研究<sup>[4-7]</sup>。但

笔者发现, 考虑材料应变率对上扣过程的影响的研究很少。与静载荷作用相比, 弹塑性材料在考虑应变率的动载荷作用下的本构关系具有一系列不同的力学特性, 其中最重要的特性之一是: 应变率条件下, 许多金属材料的屈服强度明显提高。应变率对材料的影响在金属材料领域得到了极大重视<sup>[8-13]</sup>。关于应变率对特殊螺纹接头上扣特性、受力状态及密封性能的影响还鲜见报道。

本文以衡阳华菱钢管有限公司(简称华菱衡钢)  $\Phi 114.3 \text{ mm} \times 8.56 \text{ mm}$  规格 L80 钢级 HSM-2 特殊螺纹接头为模型, 分别对材料静态模型和材料应变率模型进行有限元计算, 分析静态模型和应变率模型对上扣扭矩、应力应变及密封接触压力的影响。

李小兵(1971-), 男, 高级工程师, 主要从事油套管螺纹接头的开发及其制造加工工艺研究。

### 1 模型建立

以  $\Phi 114.3 \text{ mm} \times 8.56 \text{ mm}$  规格 L80 钢级 HSM-2 特殊螺纹接头为研究对象, 利用 ABAQUS 有限元软件, 根据接头的实际材料性能输入其弹性模量和泊松比, 并以表格形式输入真应力、真应变数据。根据接头的结构和受力特点, 将其按轴对称情况处理, 且将接头的接触中面处理为对称面, 该截面内各点只有径向位移自由度; 为消除管端效应, 建模时取管体长度约为螺纹长度的 3 倍; 接头的材料为低合金钢, 视其为均匀的各向同性体; 接触面的摩擦因数与实际接触面粗糙度及实际螺纹脂类型有关, 按实际试验选取。

HSM-2 特殊螺纹接头的有限元模型网格划分如图 1 所示。对接触部位进行细化, 采用 CAX4 四节点四边形单元, 接触模式为面对面接触。

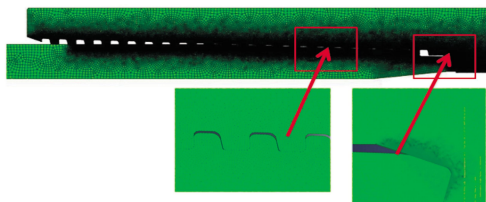


图 1 HSM-2 特殊螺纹接头的有限元模型网格划分

### 2 结果与讨论

#### 2.1 上扣扭矩分析

上扣扭矩是特殊螺纹接头很重要的一项参数, 上扣扭矩过大会使扭矩台肩或密封面塑性变形过量, 导致连接强度失效或密封失效; 上扣扭矩过小将导致密封面的接触应力不足, 从而造成密封失效。上扣扭矩特性分析是特殊螺纹接头产品开发中重要的一环, 扭矩曲线可以反映出接头结构是否合理。

利用 ABAQUS 软件接触分析计算和数据处理能力, 对外螺纹接头和内螺纹接头接触部位进行接触计算和数据处理, 扭矩  $T$  可以由公式(1)得出:

$$T = \mu \int \int r^2 p dL d\theta \quad (1)$$

式中  $r$  —— 从有限元分析结果中提取的接触点半径, mm;

$p$  —— 从有限元分析结果中提取的接触压力, N;

$\mu$  —— 接触摩擦因数;

$L$  —— 接触轴向长度, mm;

$\theta$  —— 接触周向角度, ( $^\circ$ )。

HSM-2 特殊螺纹接头上扣扭矩随台肩过盈量变化曲线如图 2 所示。

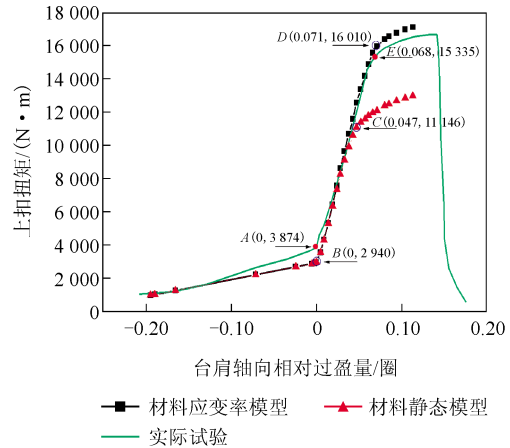


图 2 HSM-2 特殊螺纹接头上扣扭矩随台肩过盈量变化曲线

对台肩扭矩来讲, 台肩过盈量在 0.047 圈以内时材料静态模型和材料应变率模型曲线基本重合, 均呈线性, 两者的台肩扭矩均小于实际试验的台肩扭矩(图 2 中 A、B 点), 是因为实际实物试样存在椭圆度等加工误差影响了表面光滑度, 在达到台肩扭矩前进行了上扣配合自“归圆”和自光滑化, 从而造成实际扭矩比有限元计算结果大。这种自“归圆”现象和自光滑化现象在大量实际实物试验中表现为第二次上扣的台肩扭矩往往比第一次上扣台肩扭矩小。

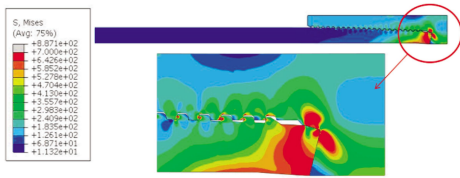
从屈服扭矩讲, 静态模型曲线在 0.047 圈开始出现斜率明显降低、呈非线性的屈服状态, 即 C 点为静态模型上扣屈服点, 屈服扭矩为 11 146 N·m; 而应变率模型一直到 0.071 圈(D 点)才出现非线性的屈服状态, 屈服扭矩为 16 010 N·m; 实际试验曲线在 0.068 圈(E 点)出现非线性的屈服状态, 屈服扭矩为 15 335 N·m。应变率模型在屈服后的扭矩均偏大于实际试验扭矩, 可能是因为实际试验中螺纹接头接触部位相对运动造成屈服破坏后会在接触部位产生大量的热, 造成材料发生一定软化, 从而降低了摩擦因数。

由此可见, 不论是屈服扭矩还是屈服台肩过盈圈数, 应变率模型更接近于实际试验结果。

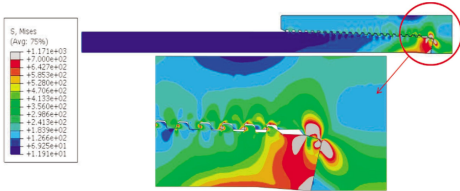
#### 2.2 应力应变状态分析

HSM-2 特殊螺纹接头等效应力云图如图 3 所示, 等效塑性应变云图如图 4 所示。可以看出: 应

变率模型应力水平明显高于静态模型，但是应变率模型等效塑性应变明显小于静态模型。

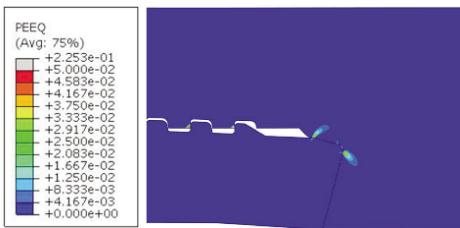


(a) 静态模型

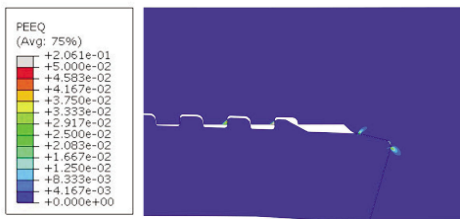


(b) 应变率模型

图3 HSM-2 特殊螺纹接头等效应力云图



(a) 静态模型



(b) 应变率模型

图4 HSM-2 特殊螺纹接头等效塑性应变云图

HSM-2 特殊螺纹接头台肩最大等效塑性应变随台肩过盈量变化曲线如图5所示。可以看出：静态模型的台肩最大等效塑性应变始终远大于应变率模型，其中静态模型的台肩最大等效塑性应变在台肩过盈量为0.047圈时出现快速增大，对应于图2所示静态模型到达屈服扭矩；应变率模型的台肩最大等效塑性应变在台肩过盈量为0.071圈时出现较快增大，对应于图2所示应变率模型在此时到达屈服扭矩。

应力应变分析与上扣扭矩分析得到相互印证。

综上所述，应变率使材料的屈服强度得到提

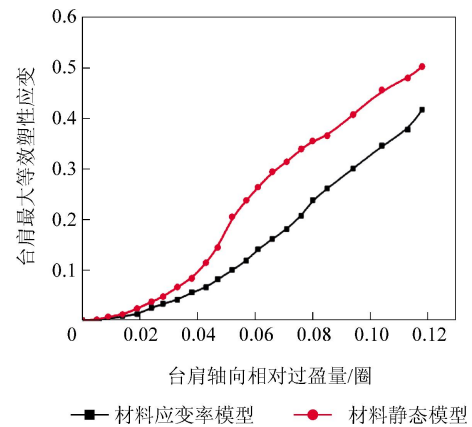


图5 HSM-2 特殊螺纹接头台肩最大等效塑性应变随台肩过盈量变化曲线

高，静态模型计算等效塑性应变结果过于偏大。

### 2.3 密封接触应力分析

一般采用密封面上的密封指数(Sealindex)表征特殊螺纹接头的密封性能，密封指数定义为密封面上接触应力对接触长度的积分<sup>[14]</sup>；密封指数综合体现了接触应力和接触长度的效果，计算公式如下：

$$\text{Sealindex} = \int_L \sigma dL \quad (2)$$

式中  $\sigma$  —— 接触应力，MPa。

HSM-2 特殊螺纹接头密封面接触应力随接触长度变化曲线如图6所示。其中，材料静态模型接触长度为2.65 mm，接触应力对接触长度的积分（即曲线包围的面积）为2 212 MPa·mm；材料应变率模型接触长度也为2.65 mm，接触应力对接触长度的积分为2 259 MPa·mm，与静态模型的基本一致。由此可见，计算HSM-2特殊螺纹接头密封性能时，采用静态模型和应变率模型的结果基本相同。

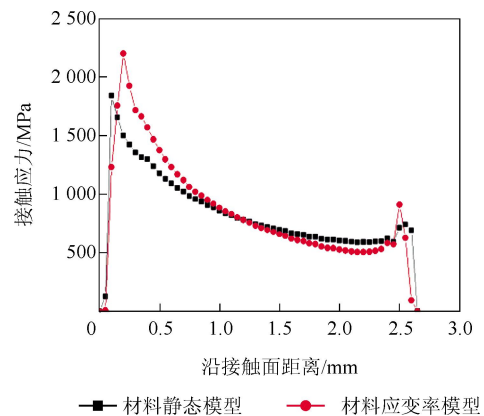


图6 HSM-2 特殊螺纹接头密封面接触应力随接触长度变化曲线

### 3 结 论

用 ABAQUS 软件分析了华菱衡钢  $\Phi 114.3 \text{ mm} \times 8.56 \text{ mm}$  规格 L80 钢级 HSM-2 特殊螺纹接头静态模型和应变率模型对上扣扭矩、应力应变及密封接触压力的影响,并与实测结果进行了对比。静态模型的有限元计算屈服扭矩结果严重偏小,并出现特殊螺纹接头过早到达屈服扭矩的假象,而应变率模型扭矩计算结果比较符合实际;相比静态模型,应变率模型材料屈服强度得到提高,而且静态模型等效塑性应变结果过于偏大;静态模型和应变率模型对密封性能的计算结果基本一致。

### 4 参考文献

- [1] Hilbert Jr L B, Kalil I A. Evaluation of premium threaded connections using finite-element analysis and full-scale testing[C]. Society of Petroleum Engineers: SPE/IADC Drilling Conference, 1992.
- [2] 谢香山. 油井管特殊螺纹接头的发展[J]. 钢管, 2000, 29(5): 9-12.
- [3] 高连新, 史交齐. 油套管特殊螺纹接头连接技术的研究现状及展望[J]. 石油矿场机械, 2008, 37(2): 15-19.
- [4] 孙建安, 王琍. 特殊螺纹接头上扣过程仿真分析[J]. 宝钢技术, 2015(4): 41-45.
- [5] 吴稀勇, 闫龙, 陈涛. 特殊螺纹接头扭矩的分析[J]. 焊管, 2010, 33(9): 12-14.
- [6] 解学东, 史交齐, 申昭熙, 等. PSC 特殊螺纹接头上扣特性研究[J]. 石油机械, 2005, 33(9): 12-15.
- [7] 王一岑, 苑清英, 符利兵, 等. 油套管上卸扣扭矩准确度的影响因素及改善措施[J]. 焊管, 2017, 40(1): 54-58.
- [8] 郑文龙, 王春华. 应变速率和位移速率对测定金属材料屈服强度影响的探讨[J]. 工程与试验, 2009(2): 1-5.
- [9] 李慧中, 张新明, 陈明安, 等. 2519 铝合金热变形流变行为[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(4): 621-625.
- [10] 李雷, 曹睿, 张继, 等. 不同应变速率下 TiAl 基金属压缩断裂行为的研究[J]. 稀有金属, 2008, 32(4): 409-414.
- [11] 唐长国, 朱金华, 周惠久. 金属材料拉伸的高应变率增塑现象及分析[J]. 材料研究学报, 1996, 10(1): 19-24.
- [12] 唐长国, 朱金华, 周惠久. 金属材料屈服强度的应变率效应和热激活理论[J]. 金属学报, 1995, 31(6): 248-253.
- [13] 沙桂英, 徐永波, 于涛, 等. AZ91 镁合金的动态应力-应变行为及其应变率效应[J]. 材料热处理学报, 2006, 27(4): 77-81.
- [14] Xie Junren, Tao Gang. Analysis of oil well casing connections subjected to non-axisymmetric loads[C]. 2007 ABAQUS Users' Conference, 2007.

(收稿日期: 2017-04-01)

### ● 专利信息

#### 一种塑料机械用无缝钢管加工工艺

公开了一种塑料机械用无缝钢管加工工艺,包括以下步骤:根据实际加工需要,选择对应尺寸的钢管;将钢管一端用铝材封闭,然后装入合金材料,再将另一端用铝材封闭,使合金材料密封在钢管内;将封闭好的钢管送入加热炉进行加热,在加热过程中使钢管在加热炉内匀速转动,使合金材料熔化;控制加热炉内的温度在  $900 \sim 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,加热  $30 \sim 50 \text{ min}$ ,拉出钢管,放入真空离心设备上等进行等加速度离心旋转,使熔化后的合金材料均匀镀覆在钢管内壁上,形成一层合金层;冷却后,去应力,再将钢管内外壁抛光打磨。该工艺简单,易于实际操作,加工的钢管具有非常好的耐磨、耐腐蚀性能。(专利申请号: CN201510571831.9 公开号: CN105149554A 申请日: 2015.09.09 公开日: 2015.12.16 申请人: 安徽省凯峰塑料机械有限公司)

#### 一种不锈钢管打磨机

涉及一种不锈钢管打磨机,包括两个水平安装在地面上的固定装置,固定装置中安装有钢管,在固定装置的左侧设置有固定架,在固定架上安装有打磨机构,打磨机构包括电动机,电动机的动力输出轴上安装有打磨片,打磨片正对着钢管的管口。该实用新型结构简单、设计合理、工作效率高,能够对钢管的管口进行打磨。(专利申请号: CN201520389738.1 公开号: CN204819086U 申请日: 2015.06.09 公开日: 2015.12.02 申请人: 江苏德明新材料有限公司)

(王元菽)