

特殊螺纹套管接头柱面/球面密封结构有限元分析

朱 强¹, 杜 鹏¹, 王建军², 秦东晨¹

(1. 郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 中国石油集团石油管工程技术研究院 石油管工程重点实验室, 陕西 西安 710077)

摘 要: 采用 ANSYS 建立套管接头的轴对称模型, 着重分析一种特殊螺纹套管接头柱面/球面密封结构的密封性能, 分别对 3 种工况(机紧、机紧+拉伸、机紧+内压+拉伸)进行求解, 获得了密封端接触压力和等效应力的分布规律, 对比分析了不同工况下密封端接触压力和等效力, 揭示了拉伸载荷和套管内部压力对结构密封性的影响。结果表明, 该柱面/球面密封结构的接触压力和等效力符合密封要求, 为特殊螺纹套管接头的进一步优化设计提供理论指导。

关键词: 特殊螺纹套管接头; 柱面/球面; 接触压力; 有限元

中图分类号: TE931.2 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2016.05.016

0 引言

随着我国石油和天然气资源开采向深井、超深井、水平井和非常规天然气井方向不断发展, 通常使用的普通石油套管已经不能满足需求, 而需要更多地使用特殊螺纹套管^[1]。特殊螺纹套管接头采用金属/金属密封结构, 与普通螺纹啮合密封套管相比, 具有良好的密封性能。金属/金属密封端有锥面/锥面、锥面/弧面、柱面/球面等密封结构形式^[2]。锥面/锥面密封结构易于制造, 该结构的有限元分析和实验研究较多且趋于成熟。窦益华等^[3]研究了锥面/锥面密封结构特殊螺纹接头上扣扭矩与密封性能和连接强度的关系; 曹银萍等^[4]研究了特殊油管接头锥面/锥面密封结构在不同载荷工况下的密封性。

球面密封结构制造相对比较困难、成本较高, 相关研究文献较少。蔡茂佳等^[5]研究了交变载荷下某型球面密封结构的连接强度和密封性。由于管道外径和密封结构参数的差异, 每种密封结构都呈现出不同的密封特性。笔者对一种柱面/球面密封特殊螺纹套管接头进行分析, 该特殊螺纹接头密封结构由主密封和扭矩台肩两部分组成, 如图 1。上部为接箍, 内表面密封部位为球面; 下部

为套管, 密封部位为柱面, 两者相互配合达到密封效果。采取合理的结构简化措施, 在 ANSYS 中建立特殊螺纹接头轴对称模型, 分析机紧、机紧+拉伸、机紧+内压+拉伸 3 种工况下套管接头密封性能, 揭示不同工况对其密封性能的影响, 为密封结构优化设计提供一定理论指导。

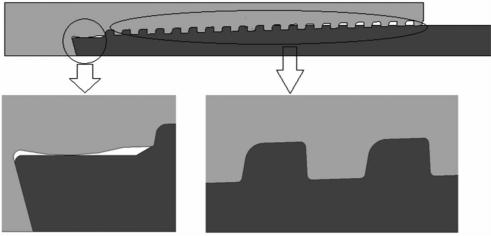


图 1 特殊螺纹套管接头结构

Fig.1 The structure of premium connection

1 有限元模型

1.1 套管接头模型与简化

该特殊螺纹套管接头为 5 寸半($\phi 139.70 \text{ mm} \times 9.17 \text{ mm}$)套管接头, 材料为 P110 钢级。接头螺纹部分采用偏梯形螺纹, 执行 API SPEC 5CT^[6] 和 API SPEC 5B^[7] 标准, 螺纹承载面为 3° , 导向面为 10° , 螺距为 5.08 mm , 每英寸 5 牙, 齿高为 1.57 mm , 螺纹锥度为 1:16。套管接头完整螺纹长度为

收稿日期:2016-04-09; 修订日期:2016-08-18

基金项目: 中国石油天然气集团公司资助项目(2014F-1501); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2013KJXX-07)

作者简介: 朱强(1976—), 男, 陕西三原人, 郑州大学讲师, 博士, 主要从事机械结构研究, E-mail: zhuqiang@zzu.edu.cn.

46.76 mm,不完整螺纹长度为 50.39 mm. 采用球面/柱面金属密封结构形式,台肩面采用 -15° 扭矩台肩结构,具有抗过扭和辅助密封作用,密封和台肩结构如图 1 中密封端放大图所示.

基于 ANSYS 对套管接头进行分析,参考相关文献的处理方法^[8-9],采用如下简化假设:①螺纹升角较小,忽略螺纹升角影响;②按轴对称方式建模,有效减少计算量;③套管接头材料视为各向均匀的同性体;④根据圣维南原理,为了合理模拟套管的受力,套管长度大于螺纹长度 3 倍以上.

1.2 材料属性模型

P110 钢级材料屈服强度为 758 MPa,抗拉强度为 862 MPa,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3. 套管受力较大,材料在加载力过程中会超过屈服极限,产生塑性变形. 为了准确模拟材料塑性,在 ANSYS 中输入材料的真实应力—应变曲线^[8],工程应力—应变与真实应力—应变之间的转换关系如下

$$\begin{cases} \varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_0) \\ \sigma = \sigma_0(1 + \varepsilon_0) \end{cases}$$

式中: ε 、 σ 为真实应变和真实应力; ε_0 、 σ_0 为工程应变和工程应力.

根据上式求出的真实应力—应变数据,采用 ANSYS 多线性随动强化模型进行材料定义,随动强化应力—应变曲线如图 2.

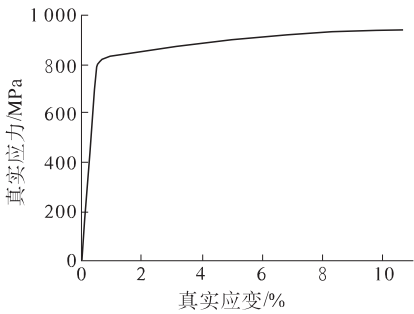


图 2 材料真实应力—应变多线性随动强化曲线
Fig.2 The true stress-strain curve with multi-linear kinematic hardening

1.3 有限元模型

采用 Plane183 单元对轴对称模型进行划分,接触部分使用接触单元定义接触对,通过不同实常数区分不同接触对. 接触分析采用库伦摩擦模型,摩擦系数为 0.02. 有限元网格(局部)模型和接触对如图 3 所示,其中线状部位为接触对.

特殊螺纹套管接头承受复杂载荷工况,分解后为机紧、轴向拉伸和内压工况^[9],不同工况加载

力不同,对套管接头的密封性能会产生影响. 综合套管接头受力情况,这里分别考虑机紧、机紧 + 拉伸、机紧 + 内压 + 拉伸 3 种工况下套管接头密封性能. 采用标准上扣扭矩模拟套管接头机紧后的状态;设置拉力为材料屈服强度的 80%,内压为 40 MPa. 施加载荷和约束后的模型如图 4,其中左端约束,右端施加轴向拉伸载荷或轴向压缩载荷,内表面施加压力.

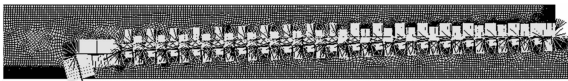


图 3 有限元网格(局部)和接触对定义
Fig.3 Finite element meshing model (partial) and contact pairs



图 4 施加载荷和约束模型图
Fig.4 Model diagram after applying loads and constraints

该分析涉及接触非线性、材料非线性和大变形. 分析过程中,求解选项的大变形开关打开. 非线性求解迭代使用完全牛顿法,即每一次迭代成功后都修改刚度矩阵. 同时为了求解容易收敛,打开线性搜索选项、自动时间步长和时间步长预测器.

2 有限元分析

特殊螺纹套管接头柱面/球面为主密封部位,保证密封性能;扭矩台肩结构主要用来抗过扭,同时起到辅助密封作用. 求解后得到 3 种工况下密封端结构 von Mises 应力云图,如图 5 所示. 套管和接头通过接触传递力,根据分析结果,提取上述分析模型主密封面和台肩面的接触应力. 密封部位具有良好密封性的条件是:①密封面有高于内压的接触压力;②密封面等效应力小于材料屈服强度,即不发生塑性变形^[10]. 通过这两个方面分析考察 3 种工况下套管接头的密封性能.

2.1 主密封面

主密封面指的是特殊螺纹套管的柱面/球面部位,通过柱面与球面的配合来保证整个接头密封性. 通过有限元分析并提取结果后,3 种工况下主密封面数据如表 1 和图 6.

表 1 3 种工况主密封面相关数据
Tab.1 Main sealing structure data in
three different load conditions

工况	最大接触 压力/MPa	平均接触 压力/MPa	接触压力最大 处的等效应 力/MPa
机紧	1 000	500	650
机紧 + 拉伸	650	400	350
机紧 + 内压 + 拉伸	710	450	400

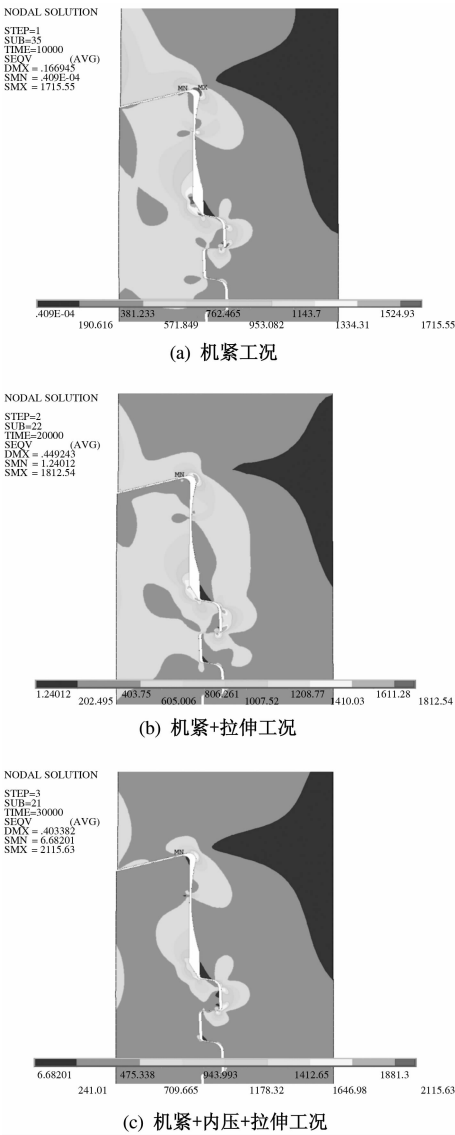


图 5 3 种工况密封端结构 von Mises 应力云图
Fig.5 Sealing structure von Mises stress in
three different load conditions

机紧工况是模拟套管接头机紧后的状态. 从结果可以看出,机紧后有效接触长度上最大接触压力约为 1 000 MPa,平均接触压力约为 500 MPa,接触区域材料等效应力维持在 650 MPa 左右. 机紧 + 拉伸工况是对套管进行机紧后加上轴向拉力的状况,轴向拉力是特殊螺纹套管经常承

受的载荷. 在轴向拉力的作用下,密封部位密封性能有所下降,最大接触压力降为 650 MPa 左右,平均接触压力为 400 MPa 左右,等效应力为 350 MPa. 机紧 + 内压 + 拉伸工况是在上述机紧 + 拉伸工况基础上加上管道的内部压力,这种工况更加符合套管实际工作状态. 在内压的作用下,与上一工况相比,最大接触压力增大为 710 MPa,平均接触压力增大为 450 MPa,等效应力增大为 400 MPa 左右. 套管接头材料的屈服强度为 758 MPa,加载内压为 40 MPa,3 种工况下主密封面的接触压力都远远大于内压,并且等效应力小于材料的屈服强度,符合密封条件要求.

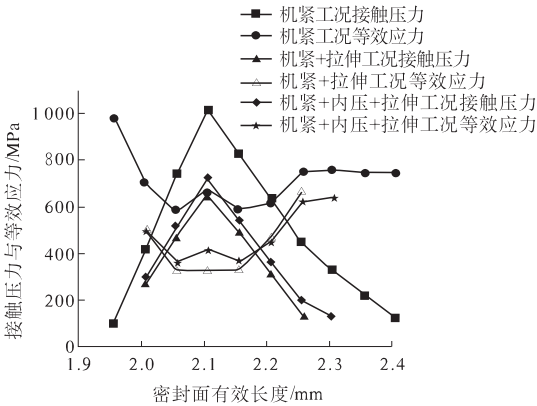


图 6 3 种工况主密封面上接触压力/等效应力
随接触长度变化曲线
Fig.6 Main sealing structure contact pressures/
VME stresses along the contact length in
three different load conditions

从表 1 可以看出,各项参数最低的工况是机紧 + 拉伸工况. 各项参数最高的工况是机紧工况. 从图 6 中看出,在机紧状态下加上轴向拉伸载荷后,接触压力曲线和等效应力曲线大幅下降,但由于初始机紧的作用,依然保有一定的接触压力. 加上内部压力后,接触压力曲线和等效应力曲线有所提高,但提高幅度不是很大,没有超过机紧工况的结果曲线,可以认为,内部压力有助于密封部位的性能提升.

2.2 辅助密封面

辅助密封面为 -15° 扭矩台肩部位,该部位金属与金属配合可以起到辅助密封的效果. 3 种工况下有限元分析结果如表 2 和图 7.

3 种工况下的接触压力曲线呈现两头高中间低的趋势,等效应力曲线则在中间凸起. 机紧工况下,接触压力最大值为 500 MPa,大部分区域的接触压力值在 350 MPa 附近,最大等效应力为 600 MPa. 机紧 + 拉伸工况下,接触压力最大值为 390 MPa,大部

分区域的接触压力值在 250 MPa 附近,最大等效应力为 500 MPa. 机紧 + 内压 + 拉伸工况下,接触压力最大值为 390 MPa,大部分区域的接触压力值在 250 MPa 附近,最大等效应力为 460 MPa.

表 2 3 种工况辅助密封面相关数据
Tab.2 Shoulder side data in three different load conditions

工况	最大接触压力/MPa	平均接触压力/MPa	最大等效应力/MPa
机紧	500	300	600
机紧 + 拉伸	390	250	500
机紧 + 内压 + 拉伸	390	250	460

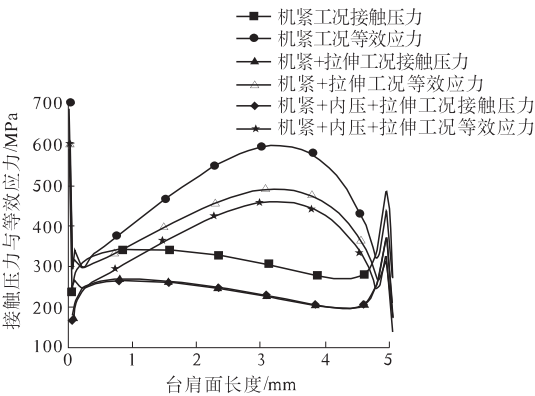


图 7 3 种工况台肩面上接触压力/等效应力
随接触长度变化曲线

Fig.7 Shoulder side contact pressures/VME stresses along the contact length in three different load conditions

从图 7 中可以看出,在机紧工况下,接触压力和等效应力数值整体都比较大,由于拉伸载荷的作用,在后两种工况下接触压力和等效应力的数值有所下降. 后两种工况下接触压力曲线重合在一起,而等效应力曲线有较小的差值,表明内压对台肩面的接触影响较小. 与主密封面相比较,3 种工况下辅助密封面的接触压力偏小,同时,辅助密封面的接触长度较主密封面长,在一定程度上增强了辅助密封面的辅助密封作用.

3 结论

特殊螺纹套管接头柱面/球面密封结构密封性能是决定复杂工况下油气开采的一项关键指标. 通过合理简化,建立套管接头非线性有限元模型,通过 3 种不同工况下的数据对比和分析,得到如下结论.

(1)在机紧、机紧 + 拉伸、机紧 + 内压 + 拉伸 3 种工况下,该套管接头柱面/球面主密封面的最大接触压力分别为 1 000 MPa、650 MPa 和 710

MPa,平均接触压力分别为 500 MPa、400 MPa 和 450 MPa,同时,接触部位的等效应力均小于材料的屈服强度.

(2)对比机紧 + 内压 + 拉伸和机紧 + 拉伸两种工况,前者在有内压作用情况下主密封面最大接触压力增加了 9.2 %,平均接触压力增加了 12.5 %,而辅助密封面接触压力没有变化,这表明接头内部压力一定程度上可以提高主密封部位的密封能力,而对辅助密封部位的影响很小.

(3)该柱面/球面密封结构特殊螺纹套管接头可以实现良好的密封,本研究为特殊螺纹套管接头的改进优化设计提供了一定理论指导.

参考文献:

[1] 喻开安,郝龙,王树龙. 油套管特殊螺纹接头结构参数对性能的影响[J]. 石油矿场机械,2013,42(12):25-29.

[2] 王建东,冯耀荣,林凯,等. 特殊螺纹接头密封结构比对分析[J]. 中国石油大学学报,2010,34(5):127-130.

[3] 窦益华,王珂,于洋,等. 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.

[4] 曹银萍,张福祥,杨向同,等. 不同载荷作用下特殊螺纹油管接头密封性分析[J]. 制造业自动化,2012,34(7):87-89.

[5] 蔡茂佳,于洋,曹银萍,等. 交变载荷作用下特殊螺纹油管接头连接强度及密封性分析[J]. 制造业自动化,2014,36(2):76-91.

[6] America Petroleum Institute. API SPEC 5CT: Specification for Casing and Tubing[S]. Ninth edition. USA: API, 2012.

[7] America Petroleum Institute. API SPEC 5B: Specification for Threading, Gauging and Thread Inspection of Casing, Tubing, and Line Pipe Threads[S]. Fifteenth edition. USA: API, 2008.

[8] 高连新,金烨,史交齐. 圆螺纹套管接头应力分布规律研究[J]. 机械强度,2004,26(1):42-48.

[9] 窦益华,于洋,曹银萍,等. 动载作用下特殊螺纹油管接头密封性对比分析[J]. 石油机械,2014,42(2):63-72.

[10] 黄翠英,张宏,段庆全. 地下储气库特殊螺纹套管接头密封性分析[J]. 石油机械,2010,38(5):49-51.

[11] 刘竹丽,赵敏敏,马朋朋,等. 基于 ANSYS 的斜齿轮副接触分析与可靠性分析[J]. 郑州大学学报(工学版),2015,36(2):6-9.

[12] 陈艳霞,林金宝. ANSYS 完全自学一本通[M]. 北京:电子工业出版社,2013.