

密封圈热-结构耦合场参数化有限元分析

杨秀萍^{1,2}, 于润生², 刘学新²

(1. 天津理工大学 天津市先进机电系统设计与智能控制重点实验室, 天津 300384; 2. 天津理工大学 机械工程学院, 天津 300384)

摘要:应用超弹性理论和传热学原理,对带有挡圈的 O 形密封圈热-结构耦合场进行有限元分析,研究工作参数对密封圈性能的影响。结果表明:密封圈的根部以及与缸壁接触部位变形较大,最大 Mises 应力发生在根部;工作压力增大时,剪切应力和最大接触压应力明显增大。摩擦及机械滞后生热导致密封圈具有较高的温度场;流体压力、相对滑动速度增大以及流体温度升高时,密封圈温升均明显增大。为减少重复工作,提高分析效率,便于优化设计,开发了基于 ANSYS/MATLAB 的密封圈参数化自动分析系统,可以对不同类型、尺寸及工作条件下的密封圈进行分析。

关键词:密封圈;温度场;热-结构耦合;有限元分析;参数化模型

中图分类号: TQ336.4⁺2; O241.82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-890X(2015)09-0547-05

密封圈广泛应用于石油机械设备中,在采油生产中具有举足轻重的作用。如隔水管接头密封失效会增加钻井成本,钻井液泄漏还会污染海洋等,同时,随着海洋油气钻井向深水领域发展,钻井隔水管的工作压力和温度不断发生变化,对密封圈的性能和质量要求越来越高。近年来对密封圈的研究主要集中在应力、应变等结构力学特性上^[1-2]。长时间、高压工况下,系统会发热,由于橡胶材料的导热性较差,积累在密封圈内部的热量无法传出,使温度升高,对密封圈密封性能和使用寿命产生严重影响^[3]。本工作应用超弹性理论和传热学原理,对 O 形密封圈的热-结构耦合场进行仿真,研究工作参数对密封圈应力和温升的影响及规律;在此基础上,借助参数化设计思想,采用 APDL 语言,针对不同类型和尺寸的密封圈进行参数化建模;基于 MATLAB 开发调用 ANSYS 程序的接口软件,建立人机交互界面,以自动完成密封圈的有限元分析,可对设计参数进行优化,减少重复工作^[4]。

1 热-结构耦合场计算模型

1.1 橡胶材料模型

橡胶材料选为丁腈橡胶,其力学特性表现为

作者简介:杨秀萍(1962—),女,天津人,天津理工大学教授,硕士,主要从事液压传动及有限元应用的教学与科研工作。

复杂的材料非线性、接触非线性和几何非线性,目前普遍采用的橡胶材料模型为近似不可压缩弹性材料的 Mooney-Rivlin 模型。本文采用两常数的 Mooney-Rivlin 模型,已知橡胶邵尔 A 型硬度为 85 度,计算得到弹性模量 $E=13.8$ MPa, Rivlin 系数 $C_{10}=1.84$, $C_{01}=0.46$, 取泊松比 $\nu=0.499$ ^[5]。

1.2 温度场分析理论

O 形密封圈用于动密封时,由于摩擦副之间相对滑动摩擦会产生热量,同时密封圈具有橡胶的粘弹性,工作过程中产生机械滞后而生热,连续工作一定时间后,密封圈及其金属接触部件达到热平衡状态,因此密封圈的温升场可视为有内热源的稳态热传导问题,热传导微分方程变为泊松方程^[6]:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{q_v}{k} = 0$$

式中, t 为温度; k 为热导率; q_v 为内热源强度,即生热率。

密封圈往复运动过程中,假设应力、应变按正弦规律变化,单位时间内由于机械滞后而产生的能量即生热率为^[7]

$$q_v = \Delta W / T = \pi \epsilon_0^2 E_1 \tan \alpha / T \quad (1)$$

式中, ΔW 为单位体积的橡胶材料在一个往复周期中损耗的能量; T 为载荷作用周期; ϵ_0 为节点最大应变; E_1 为储能弹性模量,用于克服橡胶的收缩力; $\tan \alpha$ 为机械滞后因子。

对于接触摩擦产生的热量,可用热流密度表示^[8]:

$$q=c\tau v \quad (2)$$

式中, q 为热流密度; c 为摩擦热的能量转换因子; τ 为接触摩擦应力; v 为对偶件的相对滑动速度。

1.3 有限元计算模型

选取的 O 形密封圈直径 5.3 mm,内径 20 mm,挡圈尺寸 4.3 mm×2 mm。由于结构和载荷均具有轴对称性,因此建立轴对称有限元模型,如图 1 所示。采用结构-热间接耦合法求解,先进行应力场分析,然后将应力场切换到温度场。

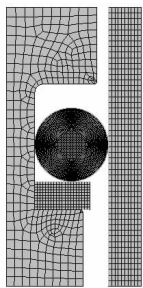


图 1 O 形密封圈有限元模型

应力场求解时,首先在轴筒上施加位移,使密封圈得到初始压缩量,然后施加流体工作压力载荷,最后轴筒以一定的速度沿轴向方向移动一段距离,模拟密封圈的相对滑动过程。计算后,采用 APDL 语言提取节点的应变,代入公式(1)求出节点的生热率;同时提取相对滑动接触单元上节点的摩擦应力,代入公式(2),得到热流密度。

温度场求解时,生热率作为体载荷加到模型中,滑动接触表面施加热流密度,密封圈与流体介质之间采用对流换热边界条件,与凹槽、轴筒及挡圈及之间采用接触换热条件。

2 结果分析

2.1 应力场

当初始压缩率为 15%、工作压力为 6 MPa 时,得到密封圈变形和应力分布如图 2 所示。

经过初始压缩和工作压力的作用,密封圈内侧根部以及和缸壁面接触部位出现较大的变形,如图 2(a)所示;最大 Mises 应力位于密封圈根部区域的内部,如图 2(b)所示;最大剪切应力为 2.3 MPa,发生在内侧根部区域,如图 2(c)所示;两侧

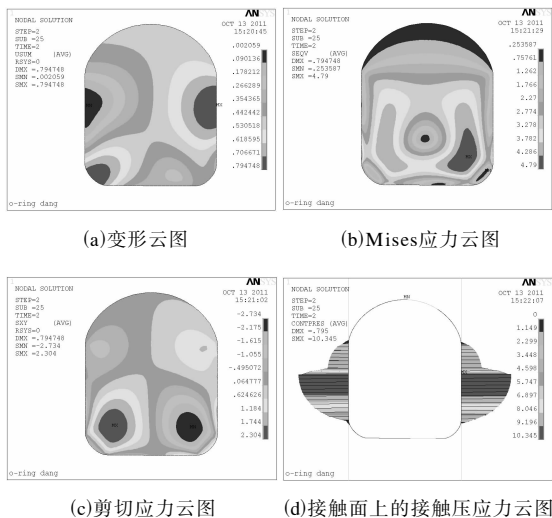


图 2 密封圈应力场分析结果

接触单元上的接触压应力对称分布,最大值为 10.3 MPa,位于接触单元的中间区域,如图 2(d)所示。

根据密封圈失效准则^[9],最大接触压应力大于介质压力,不会发生泄漏,最大剪切应力没有超过材料的许用抗剪强度 $[\tau_b]=4.6$ MPa,不会发生剪切破坏失效,故该工况下密封圈没有失效。

2.2 温度场

流体温度为 30 °C、相对滑动速度为 0.2 m·s⁻¹、工作压力为 14 MPa 时,得到的温度场分析结果如图 3 所示。

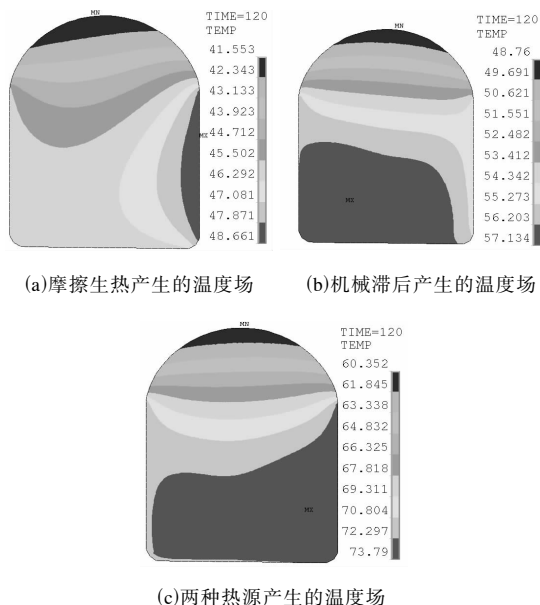


图 3 O 形密封圈温度场云图

图 3(a)所示为摩擦生热产生的温度场,温升主要位于密封圈相对滑动的接触边缘,由于与缸体接触,散热条件较好,因此内部不易形成热量堆积;图 3(b)所示为机械滞后产生的温度场,高温区位于靠近挡圈一侧,此处橡胶较厚,由于橡胶热导率小,导致热量不易散发,产生热量积累,因此温升高于摩擦引起的温升,且范围较大。二者共同作用下的温度场如图 3(c)所示,密封圈内部最高温度可达 74°C ,较流体介质温度升高 44°C 。橡胶材料的强度和弹性模量随温度升高明显减小,长期处于高温时,密封圈容易老化,失去弹性,产生永久变形,裂纹增多甚至断裂。

3 参数对密封圈性能的影响

密封圈的工作性能与工作条件和材料特性有关,对于相同橡胶材料,基于上述模型,研究参数对密封圈性能的影响。

3.1 流体压力对应力场的影响

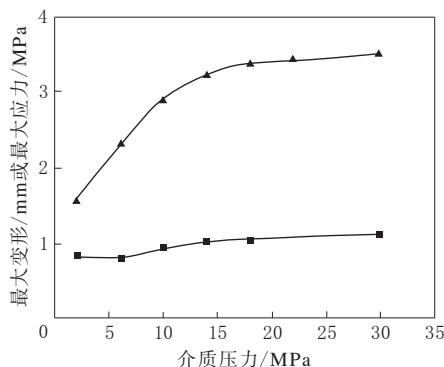
介质压力对应力场的影响如图 4 所示。流体工作压力增大时,最大变形变化不大; $p < 15\text{ MPa}$ 时,剪切应力明显升高, $p > 15\text{ MPa}$ 时,曲线变化平缓,没有超过 $[\tau_b]$,不会发生剪切失效;Mises 应力增大缓慢,最大接触压应力与介质压力呈线性关系,但始终大于介质压力,故能保证密封性能。

3.2 参数对温度场的影响

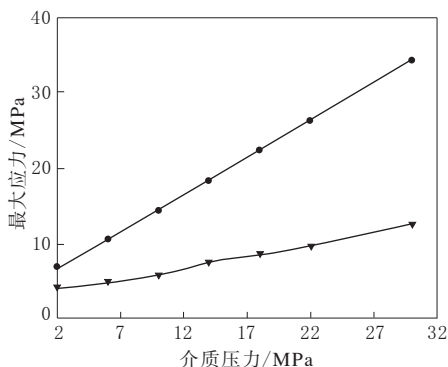
流体工作压力增大时,密封圈的应变随之增大,由公式(1)可知,生热率增大,温度显著升高,呈近似线性规律变化。如图 5(a)所示,当压力超过 14 MPa 时,局部温度会达到 70°C 以上,比流体介质温度升高 40°C ,长期工作时,流体温度会升高,因此密封圈的 actual 温升更高。

密封圈和工作流体之间为对流换热,流体温升大时,密封圈的温升随之升高,如图 5(b)所示,呈线性规律。当系统散热条件不好时,介质温升大,会使密封圈温度过高。

O 形密封圈和刚性壁相对滑动速度增大时,摩擦损失增大,由公式(2)可知,热流密度增大,密封圈的温升升高。如图 5(c)所示,相对滑动速度小于 $0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,温度在 80°C 以下。



(a) 最大变形和最大剪切应力



(b) 最大 Mises 应力和最大接触压应力

■—最大变形; ▲—最大剪切应力; ▼—最大 Mises 应力;
●—最大接触压应力。

图 4 介质压力对应力场的影响

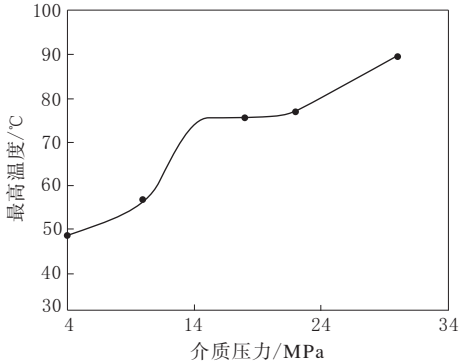
4 参数化自动分析系统

为研究不同类型、尺寸的密封圈及其结构和工作参数对性能的影响,减少重复工作,借助参数化设计思想,基于 ANSYS 的 APDL 语言,建立不同类型和尺寸的密封圈参数化模型(宏文件),利用 MATLAB 的可视化功能,开发调用 ANSYS 程序的接口软件,建立人机交互界面,以自动完成密封圈的有限元分析。实现这一过程的程序结构如图 6 所示,人机交互界面如图 7 所示。

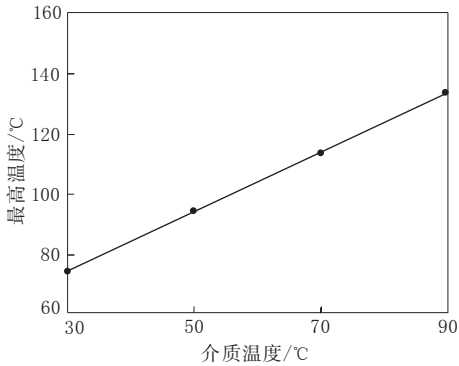
操作过程如下。

(1)选择密封圈的类型,如 O 形、Yx 形等;将计算参数,如初始压缩率、工作压力、摩擦因数等,分别输入到相应的文本框中。

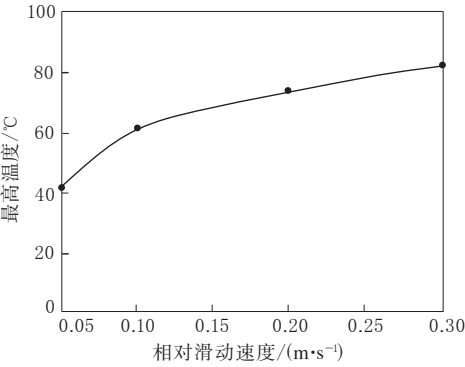
(2)点击“输入”按钮,系统将所选类型和输入的参数通过文本操作,对相关参数进行赋值,生成参数文件。



(a)介质压力



(b)介质温度



(c)相对滑动速度

图5 参数对温度场的影响

(3)点击“ANSYS 分析”按钮,系统以批处理的模式调用 ANSYS 软件,对参数赋值并运行用 APDL 编写的宏文件。

(4)进行有限元求解时,软件随时显示求解状态,直至显示求解完成的提示。

(5)点击菜单栏的“云图显示”菜单,选择应力、位移云图等子菜单,软件通过回调函数将相应的分析结果以图形方式返回屏幕。

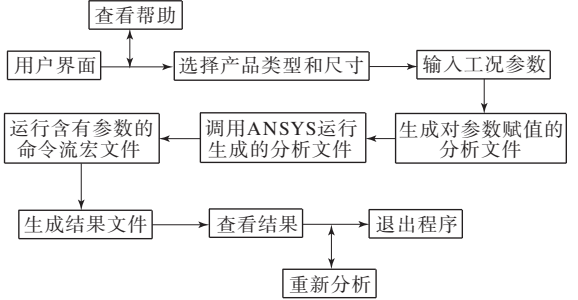


图6 自动分析程序结构示意图



图7 人机交互界面

(6)重新分析及获取帮助或者退出软件时,可点击相应的菜单项。

5 结论

(1)O 形密封圈根部、密封圈与刚性壁接触部位变形较大,最大 Mises 应力发生在根部。

(2)流体工作压力增大时,最大变形和 Mises 应力增幅较小,但剪切应力明显增大,最大接触压应力与流体压力呈线性关系。

(3)摩擦生热主要使密封圈相对滑动接触部分有明显的温升,机械滞后生热使 O 形密封圈底侧内部有较高温升,其温升大小及范围明显大于前者。两种热源作用下,密封圈有很高的温度场。

(4)对于相同橡胶材料,流体压力、相对滑动速度增大以及流体温度的升高,均使密封圈温升明显增加。

(5)基于 ANSYS/MATLAB 开发的密封圈参数化自动分析系统,可减少重复工作,提高分析效率,便于优化设计;该软件具有开放性,对于不同形状的密封圈,可以在该软件基础上进行修改,便于扩展。

参考文献:

- [1] 温纪宏,陈国明,畅元江,等. 隔水管接头 O 形密封圈密封性能分析[J]. 石油机械,2013,41(1):45-48.
- [2] 韩传军,张杰. 矩形橡胶密封圈的有限元分析及优化[J]. 橡胶工业,2013,60(2):98-103.
- [3] 陈兰贞. 基于 Patran /Marc 橡胶模具加热系统温度场数值模拟[J]. 机床与液压,2008,36(9):135-137.
- [4] 杨秀萍,王鹏林. 基于 ANSYS APDL 语言的零件参数化有限元分析[J]. 组合机床与自动化加工技术,2005(11):10-11.
- [5] 于润生,杨秀萍. Yx 形液压密封圈的有限元分析及结构优化[J]. 润滑与密封,2011,36(7):66-69.
- [6] 郭乙木,陶伟明,庄苗. 线性与非线性有限元及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2003:10.
- [7] 杨秀萍,郭津津. 单螺杆泵定子橡胶温度场分析[J]. 润滑与密封,2008,33(7):53-55.
- [8] 王泽鹏,张秀辉,胡仁喜,等. ANSYS 12.0 热力学有限元分析从入门到精髓[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [9] 任全彬,蔡体敏,王荣桥,等. 橡胶“O”形密封圈结构参数和失效准则研究[J]. 固体火箭技术,2006,29(1):13-14.

收稿日期:2015-03-22

Parametric Finite Element Analysis of Thermal-Structure Couple on Seal Ring

YANG Xiu-ping, YU Run-sheng, LIU Xue-xin
(Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: The hyperelasticity theory and heat transfer principle were applied to the coupled field simulation of thermal and structure of O-ring with block ring by finite element analysis. The effect of working parameters on seal performance was studied. The results showed that the largest deformation appeared at bottom part and contact position with cylinder wall, the biggest Mises stress occurred at bottom part. The shear stress and maximum contact pressure increased significantly with the increase of medium pressure. The frictional and mechanical hysteresis led to high temperature field in seal ring. The temperature rise of seal ring evidently increased when medium pressure, relative slide speed and medium temperature increased. The parametric simulation system of seal ring was then developed based on ANSYS/MATLAB which was efficient and effective for the analysis of different type and dimension of O-ring seals under various working conditions.

Key words: seal ring; temperature field; thermal-structure couple; finite element analysis; parametric model

一种电容器专用丁腈橡胶 密封垫及其制备方法

中图分类号:TQ336.4+2;TQ333.7 文献标志码:D

由安徽江威精密制造有限公司申请的专利(公开号 CN 103627049A, 公开日期 2014-03-12)“一种电容器专用丁腈橡胶密封垫及其制备方法”,涉及的密封垫配方为:丁腈橡胶(NBR) 74~78,软木颗粒 6~8,炭黑 N330 43~46,改性凹凸棒土 12~15,磷酸二氢锌 5~7,硼酸锌 3~4,焦磷酸锌 12~15,防老剂 RD 1~2,防老剂 MB 1~2,2-巯基苯并咪唑 1~2,甲基三甲氧基硅烷 1~3,硫黄 1~2,促进剂 M 1~2. 该密封垫采用 NBR 制成,具有良好的耐油性,且耐高低温性能好,使用寿命长,成本低。

(本刊编辑部 赵 敏)

制备丁基橡胶溶液的方法及其应用

中图分类号:TQ336.1+1 文献标志码:D

由中国石油化工股份有限公司和中国石油化工股份有限公司北京化工研究院申请的专利(公开号 CN 103665229A, 公开日期 2014-03-26)“制备丁基橡胶溶液的方法及其应用”,提供了一种制备丁基橡胶(IIR)溶液的方法,包括:(a)将 IIR 胶粒水混合物通过振动筛脱水;(b)将脱水后的胶粒水混合物溶解在烷烃和/或环烷烃中得到含水胶液;(c)将含水胶液先通过重力沉降脱水进行一级脱水、再通过电脱水进行二级脱水得到水质量分数小于 0.003 的 IIR 溶液。该方法还可用于卤化丁基橡胶生产中。与现有 IIR 溶胶工艺相比,该发明不仅设备投资低,而且溶胶效果好。

(本刊编辑部 赵 敏)