

基于Abaqus的O形橡胶密封圈热应力分析

王丹¹, 韩磊², 陈加鑫²

(1. 中海油能源发展采油服务公司技术中心, 天津 300457; 2. 海洋石油工程股份有限公司建造公司, 天津 300452)

摘要: 建立O形橡胶密封圈平面轴对称有限元模型, 采用Abaqus有限元软件的Mooney-Rivlin模型, 分析O形橡胶密封圈加压后的Von Mises应力分布及温度对应力的影响。结果表明, O形橡胶密封圈应力与温度呈一次线性关系, 温度变化对O形橡胶密封圈密封性能有一定影响。

关键词: O形橡胶密封圈; Abaqus有限元分析; 热应力; 温度; 密封性能

O形橡胶密封圈一般适用于静密封, 其使用温度范围取决于所用橡胶材料, 超过材料的耐受温度极限会造成密封圈产生大的压缩永久变形, 直至失效。美国挑战者号航天飞机的失事正是由于O形橡胶密封圈在低温下失去密封能力而导致的。因此, 研究橡胶密封圈的温度对其密封性能的影响具有重要意义^[1-2]。

本课题在弹性力学理论基础上, 运用Abaqus有限元软件对O形橡胶密封圈进行正常工况下的仿真, 然后改变温度, 进行热应力分析, 通过对比不同仿真结果得出应力与温度的关系。

1 热弹性力学理论

众所周知, 当温度改变时, 物体由于外在约束与内部约束的相互作用, 不能完全自由膨胀而产生应力, 该应力称为热应力, 也叫变温应力^[3]。热应力的求解分为以下2步: 首先由热传导方程求出温度分布, 然后由热弹性力学方程求出应力和位移。

近代的线性热应力理论是由法国的杜哈梅尔和德国的诺依曼于1835年提出, 简称杜哈梅尔-诺依曼理论^[3]。热弹性力学作为弹性力学的一部分, 其解题思路与弹性力学一致, 只是要将温度变化产生的应力、应变用热弹性力学原理计算出来。根据线性热应力理论, 微元体的总应变由2部分组成: 一是由应力引起的应变, 二是由温度变化引起的应变, 推广到温度场中, 即:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{E}[\sigma_i - \mu(\sigma_i + \sigma_i)] + \alpha t \quad (1)$$

式中, ε_i 为应变, E 为弹性模量, μ 为泊松比, σ_i 为应力, α 为线膨胀系数; t 为温升, i 代表 x, y, z 三个方向。

式(1)是用应力及温度表征应变的广义虎克定律, 可由式(1)推导, 用应变和温度表征应力的广义虎克定律:

$$\sigma_i = 2G\varepsilon_i + \lambda e - \beta t \quad (2)$$

式中, e 为体积应变; G 为剪切模量; λ 为拉梅常数, β 为热应力系数。

$$\lambda = \frac{E\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} \quad (3)$$

$$\beta = a(3\lambda + 2G) \quad (4)$$

2 有限元分析

随着计算机的发展及有限元分析软件(如Abaqus和Ansys)的开发, 对轮胎和橡胶制品进行了越来越深入的研究; 但由于橡胶材料的非线性、几何非线性和边界条件非线性, 增加了仿真模拟难度。在此, 以轮胎和橡胶制品研究中常用的Mooney-Rivlin模型为例, 根据应变原理, 对O形橡胶密封圈进行不考虑温度因素的应力分析及考虑温度因素的热应力分析^[4-5]。

2.1 模型建立

研究选用O形丁腈橡胶密封圈, 其内径为50 mm, 截面直径为7 mm, 邵尔A型硬度为80度; 根据Mooney-Rivlin模型, 用硬度求弹性模量^[6], 密封圈参数 $C_1=1.380$, $C_2=0.345$, 线膨胀系数为

$120 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ，温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

O形橡胶密封圈在与密封函和轴配合时，其弹性模量要远低于轴弹性模量，因此将轴面和密封函建为解析刚体。O形橡胶密封圈材料是一种超弹性材料，近似认为是不可压缩的。本研究网格单元类型采用 $\text{CA} \times 4\text{H}$ ，共划分为1160个单元，1215个节点。

2.2 O形橡胶密封圈内应力分析

对建立的O形橡胶密封圈有限元模型分2步施加荷载，首先对O形橡胶密封圈进行预紧压缩，压缩率10%；其次对O形橡胶密封圈施加1 MPa压力，应力-应变结果如图1所示。

从图1看出，O形橡胶密封圈的变形不大，且挤出间隙的宽度对其没有影响。O形橡胶密封圈的最大应力为1.973 MPa，主要分布在离接触面较近的地方。压力增大为5 MPa和10 MPa，O形橡胶密封圈应力云图分别如图2和3所示，最大应力分别为4.334 MPa和6.490 MPa。对比发现，压力不同，O形橡胶密封圈的应力峰值区域不同，压力越高，O形橡胶密封圈变形越大，且越易发生挤出损坏。

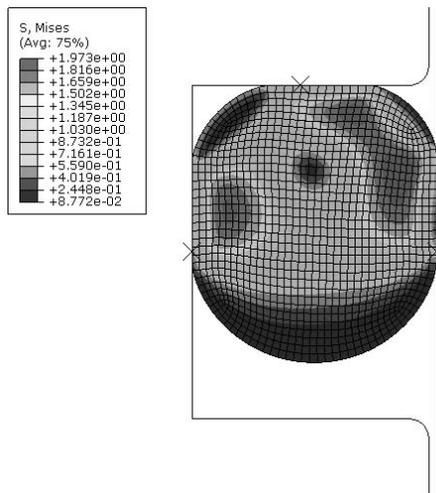


图1 预压缩率10%时O形橡胶密封圈1 MPa压力下的Von Mises应力云图

2.3 温度场分析

本研究建立的是稳态常温温度场，设定温度为室温 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ，对于受1 MPa压力的O形橡胶密封圈，经过求解后得到的应力-应变结果如图4所示。

对比图4与图1可以看出，最大应力由1.973 MPa变为2.081 MPa时，O形橡胶密封圈的形状发生

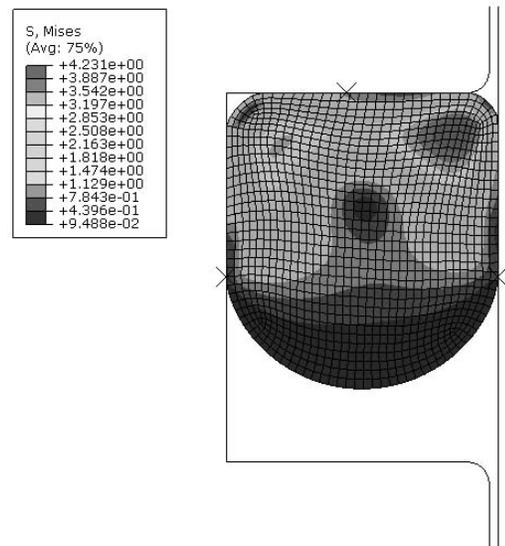


图2 预压缩率10%时O形橡胶密封圈5 MPa压力下的Von Mises应力云图

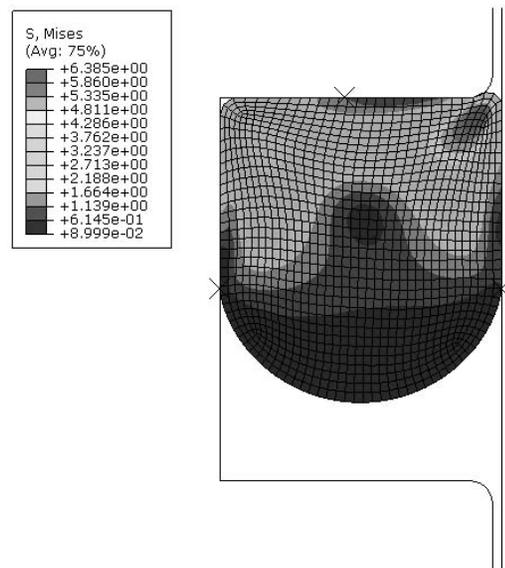


图3 预压缩率10%时O形橡胶密封圈10 MPa压力下的Von Mises应力云图

了细小的变化，内部网格发生了滑移。

改变温度，分别进行 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ， $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ， $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ， $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ， $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ， $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ， $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ， $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 的热应力分析，O形橡胶密封圈在不同温度和压力下的有限元分析所得的最大应力如表1所示。

从表1看出，O形橡胶密封圈的最大应力随着温度升高而增大。由常温（ $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ）升高到丁腈橡胶的使用温度极限（ $120 \text{ }^\circ\text{C}$ ），O形橡胶密封圈最大

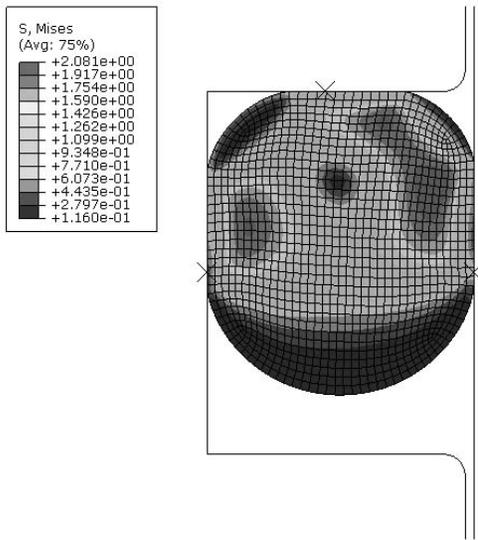


图4 25 °C时O形橡胶密封圈1 MPa压力下的Von Mises应力云图

表1 不同温度和压力下O形橡胶密封圈的最大Von Mises应力

温度/°C	压力/MPa		
	1	5	10
0	1.971	4.225	6.378
10	2.018	4.268	6.422
20	2.060	4.312	6.468
25	2.070	4.334	6.490
30	2.102	4.354	6.511
50	2.185	4.437	6.598
80	2.313	4.564	6.728
120	2.487	4.734	6.903

应力变化约为0.4 MPa, 该应力变化对于低密封压力下使用的O形橡胶密封圈密封性能影响较大, 而对于高密封压力下使用的O形橡胶密封圈密封性能的影响相对较小。

根据表1中数据, 用Matlab进行插值计算绘制图5, 以更直观地显示O形橡胶密封圈应力的变化规律。

从图5可以看出, 不同压力下, O形橡胶密封圈的最大应力都随着温度的升高而增大, 而且最大应力与温度呈线性关系, 这与广义虎克定律[式(2)]中应力 σ 与温度 t 之间为一次线性关系一致。

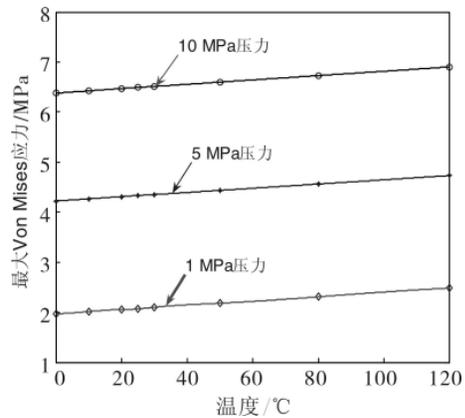


图5 O形橡胶密封圈在不同温度下的Von Mises应力变化

3 结论

(1) 在一定预压缩率下, O形橡胶密封圈随着密封压力的增大, 其Von Mises应力随之增大, 且压力越大O形橡胶密封圈越容易挤出损坏。

(2) 在环境温度变化时, O形橡胶密封圈的应力和应变变化, 其Von Mises应力随着温度的升高而增大, 应力与温度呈一次线性关系。

(3) 温度的变化对低密封压力下使用的O形橡胶密封圈密封性能影响较大, 而对高密封压力下使用的O形橡胶密封圈密封性能影响相对较小。

参考文献:

- [1] 胡建. 旋转油封温度分布的有限元法分析[J]. 特种橡胶制品, 1986, 7(5): 53-57.
- [2] 邵天敏. 压缩永久变形对O形橡胶密封圈密封性能的影响[J]. 润滑与密封, 1997, (4): 47-49.
- [3] 李维特, 黄保海, 毕仲波. 热应力理论分析及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [4] 谭晶, 杨卫民, 丁玉梅, 等. O形橡胶密封圈密封性能的有限元分析[J]. 润滑与密封, 2006, (9): 65-68.
- [5] Charlton D J, Yang J. A Review of Methods to Characterize Rubbere Elastic Behavior for Use in Finite Element Analysis[J]. Rubber Chemistry & Technology, 1994, 67(3): 493-502.
- [6] 王伟, 邓涛, 赵树高. 橡胶Mooney-Rivlin模型中材料常数的确定[J]. 特种橡胶制品, 2004, 25(4): 8-10.

Thermal Stress Analysis of Rubber O-rings Based on ABAQUS FEA Software

Wang Dan¹, Han Lei², Chen Jiabin²

(1. Technical Center, CNOOC Energy Technology & Service-Oilfield Technology Services Co., Tianjin 300457, China;

2. Construction Company, Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: The plane symmetric finite element model for rubber O-ring was established by using the Mooney-Rivlin model of ABAQUS software, and the Von Mises stress distribution of rubber O-ring under pressure and the influence of temperature on the stress were investigated. The results showed a linear relationship between the stress of O-ring and temperature, and temperature change could affect the sealing performance of O-ring.

Keywords: rubber O-ring; ABAQUS finite element analysis; thermal stress; temperature; sealing performance

信息·资讯

横滨橡胶公司扩大泰国工厂轮胎产能

横滨橡胶公司决定投资80亿日元建设1家新厂，以扩大其泰国子公司的卡车/公共汽车轮胎产能。新厂占地2.6 hm²，将于2013年7月开始建设，预计于2015年4月建成，2015年12月全面投产。新厂投产后横滨在泰国的卡车/公共汽车轮

胎年产能将从35万条增长到70万条，主要出口到北美和欧洲市场。

横滨在泰国也有乘用车轮胎和轻卡车轮胎工厂，现有年产能为400万条。

鲁迪

普利司通将在俄罗斯建轿车子午线轮胎厂

为了满足独联体轮胎市场强劲增长的需求，普利司通公司计划在俄罗斯乌里扬诺夫斯克州建设1家轿车子午线轮胎厂。该厂将成为普利司通在独联体地区的第1家轮胎厂，主要生产冬季轮胎，计划于2016年上半年投产，2018年

下半年轮胎日产能可达1.2万条。该厂将由普利司通独联体轮胎（BMCIS）公司负责经营。BMCIS公司是由普利司通公司和日本三菱公司按9：1的比例共同投资组建的，项目总投资额约375亿日元。

卢迪