

# 橡胶O形密封圈的变形及应力分析

航天工业总公司四十一所 任全彬 陈汝训 杨卫国

【摘要】建立了橡胶O形密封圈多边界有摩擦接触问题的接触模型,同时还根据多维应力蠕变理论的基本原理建立了橡胶类材料的应力松弛模型。在此基础上,采用已有文献给出的大应变问题有限元法,计算了橡胶O形密封圈在工作状态下的变形及应力分布规律,从而为可靠地设计橡胶O形密封圈提供了理论依据。

主题词: 橡胶O形密封圈 大应变问题 接触问题 应力松弛

分类号: V255.3 O343.3

目前,国内外橡胶O形密封圈(简称O形圈)的设计基本上是依赖一些经验数据和定性原则<sup>[1]</sup>,O形圈在密封槽内的变形及密封界面上的接触压应力的分布是影响O形圈密封性能的重要参数,但要得到精确的解是非常困难的。本文在一定的假设条件下,用有限元法<sup>[2]</sup>计算了在固体火箭发动机贮存和工作状态下的O形圈在密封槽内的变形及应力,得到的计算结果和实验结果符合较好,为可靠地设计橡胶O形密封圈提供了一定的理论依据。

## 1 计算模型

### 1.1 基本假设

(1) O形圈材料具有确定的弹性模量 $E$ 和泊松比 $\nu$ ; (2) 取 $\nu$ 为接近0.5的常数; (3) 钢构件组成的密封槽槽壁看作O形圈变形时的约束边界,O形圈受到的压缩看作由某个约束边界的指定位移引起; (4) 接触点接触状态有粘式接触和滑移接触; 接触边界上存在静摩擦力和滑动摩擦力; (5) O形圈材料拉伸与压缩的蠕变性质相同; (6) 蠕变不引起体积变化。

### 1.2 有限元基本方程

为反映大应变及摩擦力对O形圈变形的影响,并由基本假设(1)、(2),可以采用大变形弹性速率型本构方程<sup>[3]</sup>。采用轴对称八节点曲边环形等参元,由虚功率方程,并考虑到材料的体积应变几乎为0,大应变问题有限元基本方程见文献<sup>[1]</sup>。

### 1.3 接触模型

在O形圈安装过程中,由于钢和橡胶刚度差别很大,四周由钢构件组成的槽壁是O形圈变形时不可逾越的边界(如图1)。故可以把这些空间位置一定的接触边界看作O形圈变形时的约束边界,O形圈受到的压缩看作由某个约束边界上的指定位移引起。O形圈本身边界上各节点的边界条件则由各节点同约束边界的接触状况确定。

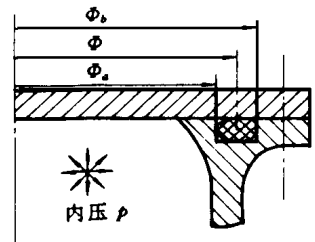


图1 O形圈的接触模型

### 1.4 接触条件

某边界节点在第  $i$  增量步内对接触状态第  $k$  次求解后, 若有  $\delta_{i,k} < 0$ , 则表明此边界节点和约束边界相接触。其中  $\delta_{i,k}$  表示边界节点对于约束边界的法向距离。在第  $k+1$  次求解时, 仍以上一增量步求出的真实接触状态为初始接触状态。令  $\delta_i$  为初始接触状态下边界节点对于约束边界的法向距离, 为使此节点刚好位于接触边界上, 也即使  $\delta_{i,k+1} = 0$ , 则必须使其法向位移增量等于  $\delta_i$ , 即满足  $\Delta u_n = \delta_i$ 。

### 1.5 粘式接触条件

此时接触点和接触边界紧紧粘接在一起, 只能随接触边界作刚体运动, 而没有相对运动。设 O 形圈与接触边界之间的摩擦力满足 Coulomb 定律, 并用  $\mu_1$ 、 $\mu_2$  分别表示静摩擦系数、滑动摩擦系数, 则有  $r_n \leq 0$ ,  $|\mu_1 r_n| \geq |r_t|$ 。  $r_n$ 、 $r_t$  分别为法向、切向的接触节点力。此种接触节点在对接触状态的求解过程中所具有的边界条件为  $\Delta u_n = C_n$ ,  $\Delta u_t = C_t$ 。  $\Delta u_n$ 、 $\Delta u_t$  分别为此接触节点的法向、切向位移增量,  $C_n$ 、 $C_t$  为此增量步内约束边界的法向、切向刚体位移。此式表明粘式接触节点将随约束边界一起作刚体运动。

### 1.6 滑移接触条件

对粘式接触节点, 若有  $r_n \leq 0$ ,  $|\mu_1 r_n| < |r_t|$ , 此时, 接触节点在约束边界上有切向相对移动, 变为滑移接触节点。此种接触节点在对接触状态的求解过程中具有的边界条件为  $\Delta u_n = C_n$ ,  $p_t = \pm |\mu_2 r_n|$ 。  $p_t$  为作用在接触节点上的切向外载,  $p_t$  的方向与切向接触节点力  $r_t$  的方向一致。

### 1.7 应力松弛模型

装配后的 O 形圈在发动机贮存期间, 其与密封槽接触界面上的应力会逐渐减小, 而变形却基本不变, 即存在着应力松弛现象。O 形圈的应力松弛将直接降低其密封性能。应力松弛现象是蠕变的一个特例。虽然蠕变的物理过程与塑性流动有所不同, 但根据基本假设(5)、(6), 塑性应力应变理论可类似地推广到蠕变。据此, 文献[4]给出的全量型蠕变理论基本方程为

$$e_{ij} = (3\bar{\epsilon}/2\bar{\sigma})s_{ij} \quad (1)$$

其中  $e_{ij}$  为应变偏量,  $s_{ij}$  为应力偏量。等效应力  $\bar{\sigma}$  和等效应变  $\bar{\epsilon}$  的关系符合描述一维应力蠕变的陈化理论公式, 即

$$\bar{\epsilon} = \text{常数}, \quad \bar{\sigma} = c/(1 + at^b) \quad (2)$$

式中  $a$ 、 $b$  为材料常数,  $t$  为时间,  $c$  为松弛过程开始时的等效应力。

又由基本假设(6), 可知

$$\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = 3K(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) \quad (3)$$

式中  $K = 1/3(1 - 2\nu)$ 。式(1)~(3)为一封闭方程组, 在求得 O 形圈装配后的初始应力后, 可以据此求得某一时刻时 O 形圈的松弛应力。

## 2 计算结果与分析

根据上一章的理论推导, 采用 FORTRAN 语言编制了有限元计算程序, 其中大应变部分参考文献[1], 接触部分和应力松弛部分为独立编制。其对接触状态求解的基本思路是: 在每一增量步内每次求解时, 都以上一增量步求出的真实接触状态为初始接触状态, 然后施加本增量步的载荷增量, 求解新的接触状态, 直到相邻两次求得的新接触状态一致时为止。我们用此程

序对文献[5]中的受压橡胶圆环的变形进行了验算,结果是一致的。

用于计算的 O 形圈结构如图 1, 具体尺寸为: O 形圈截面直径  $D = 5 \text{ mm}$ ,  $Q_2 = 200 \text{ mm}$ ,  $Q_3 = 194 \text{ mm}$ ,  $Q_4 = 208 \text{ mm}$ , 材料常数为:  $E = 10 \text{ MPa}$ ,  $\nu = 0.49$ ,  $\mu_1 = 0.9$ ,  $\mu_2 = 0.6$ 。

## 2.1 O 形圈的变形

O 形圈安装后, 横截面产生压缩变形, 变形后的宽度  $B$  及接触宽度  $b$  是设计密封槽结构时的重要参数。在不同压缩量下本文计算出的  $B$  及  $b$  值示于图 2 中, 图中还给出了文献[6]中的试验值, 可以看出二者相当一致的。

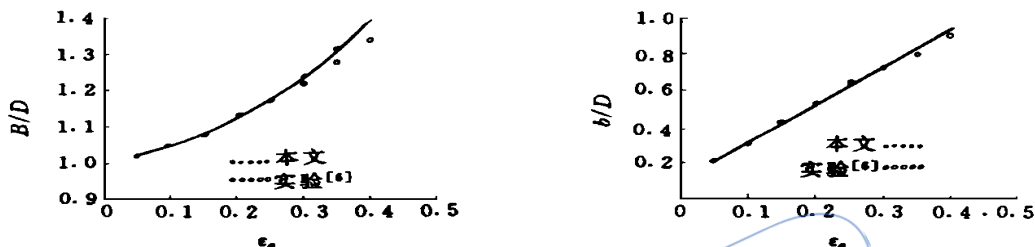


图 2  $B$  及  $b$  随压缩量  $\epsilon_0$  的变化曲线

## 2.2 密封界面上的接触压应力

O 形圈保证密封的必要条件是密封界面上的最大接触压应力  $(\sigma_x)_{\max}$  大于或等于内压  $p$ 。计算表明, 密封界面上接触压应力的大小及分布主要与 O 形圈所受的压缩量  $\epsilon_0$  及内压  $p$  有关。本文计算出的接触压应力随  $\epsilon_0$  及  $p$  的分布及变化情况如图 3 所示。

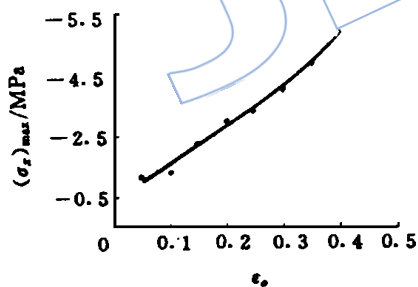


图 3  $(\sigma_x)_{\max}$  与  $\epsilon_0$  的关系 ( $p = 0$ )

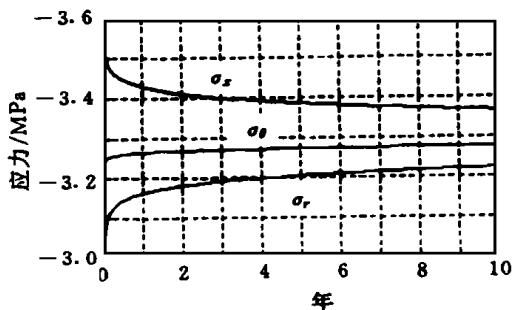


图 4 最大接触应力的松弛过程

密封界面上的接触压应力  $\sigma_x$  的分布并不是均匀的, 存在着  $(\sigma_x)_{\max}$ 。另外,  $\sigma_x$  分布的不均匀性随内压  $p$  的增大而有所减小, 这是由于受到材料的不可压缩性的影响, 随着内压的增加, 仅由初始压缩量引起的接触压应力在总应力中所占的比重逐渐减小的缘故。

在图 2 中, 仅由初始压缩量  $\epsilon_0$  引起的最大接触压应力  $(\sigma_x)_{\max}$  与  $\epsilon_0$  的关系是非线性的, 而在一定的压缩量  $\epsilon_0$  下,  $(\sigma_x)_{\max}$  与内压  $p$  的关系则是线性的。这样, 最大接触压应力可以表示为

$$(\sigma_x)_{\max} = \sigma_0 + \lambda p \quad (4)$$

计算表明, 式中  $\sigma_0$  仅与  $\mu_1$ 、 $\mu_2$  及  $\epsilon_0$  有关,  $\lambda$  为介于 0 与 1 之间的常数, 且仅与泊松比  $\nu$  有关。此式与文献[1]中的经验公式有着完全相同的形式。由密封保证的充分必要条件  $(\sigma_x)_{\max} \geq$

$p$ , 可得

$$\sigma_0 \geq (1 - \lambda)p \quad (5)$$

此式可作为验证密封可靠与否的依据。

### 2.3 应力松弛

根据所建立的应力模型, 假定  $a = 0.0024$ ,  $b = 0.90$ , 在  $\epsilon_0 = 0.2$  的情况下计算了安装后的 O 形圈在 8 年期间的最大接触应力松弛情况, 其结果示于图 4 中。可以看出, 在开始阶段应力的变化比较大, 随着时间的继续增长, 应力的变化趋于缓慢。另外, 还可以看到应力松弛并没有导致 3 个坐标轴方向的正应力都下降, 而是对其进行重新分配后使它们都逐渐趋于它们的平均值。这样, 在式(4)中可以用它们的平均值  $\sigma_m$  代替  $\sigma_0$  来计算考虑了贮存时间后的最大接触压应力, 故  $\sigma_m$  应作为预测 O 形圈随发动机贮存后的密封性能的一个重要参数。

## 3 结 论

- (1) 采用的大应变问题有限元法可较准确地计算 O 形圈在大应变状态的变形及应力。
- (2) 根据 O 形圈接触问题的具体特点所提出的解法, 能够较真实地反映在摩擦作用下的 O 形圈和密封槽壁的接触状态。
- (3) 由计算得出的  $B$  和  $b$  值有助于合理地设计密封槽结构。
- (4) 式(5)是验证密封可靠与否的依据。
- (5) O 形圈密封界面上最大压应力处沿 3 个坐标轴方向正应力的平均值  $\sigma_m$  应该作为预测 O 形圈随发动机贮存后密封性能的一个重要参数。

## 参 考 文 献

- 1 稽醒, 殷家驹. 弹塑性大应变问题的等参数有限元分析. 西安交通大学学报, 1979, 13(3)
- 2 陈汝训. 固体发动机的密封问题. 四院界面技术研讨会论文集, 1992
- 3 蒋友谅. 非线性有限元法. 北京工业学院出版社, 1986
- 4 穆霞英. 蠕变力学. 西安交通大学出版社, 1990
- 5 吕和详. 橡皮环大变形接触问题. 应用数学和力学, 1986, 7(3)
- 6 Molari P G. Stress in O-Ring Gaskets. 6th Intl Conf on Fluid Sealing, Munich 2/27/73

(责任编辑 魏星禄)

**Key words** Composite material Load calculation Crack propagation

## DEFORMATION AND STRESS ANALYSIS OF RUBBER O- RING

**Ren Quanbin, Chen Ruxun, Yang Weiguo**

(Shaanxi Power Machinery Institute, Xi'an 710000)

### ABSTRACT

A model of multilateral frictional contact problem of two objects with far different stiffness was established. In addition, a stress relax model of rubber-like material was developed according to the poly-dimension stress creep theory. On the basis of the above models, the deformation and contact stress of the rubber O-ring was calculated by using a finite element method approaching large strain in ref. [1]. Some useful conclusions can serve as trustworthy principles for rubber O-ring design.

**Key words** Contact problems Stress relaxation Seal elements

## APPLICATION OF ULTRASONIC FATIGUE TESTING TECHNIQUE

**Ni Jingang**

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

### ABSTRACT

This paper deals with the application of ultrasonic fatigue testing technique to the study of fatigue life and fatigue crack growth behavior of metals and alloys under vibrational excitation at high frequency (20kHz). The mechanical damage and fracture mechanism of materials were investigated in the case of ultrasonic fatigue cycles. This testing technique has remarkable advantages in time-saving, economy and noiselessness and capability for investigating mechanical damage models of aeroengine and rocket structures in real service.

**Key words** Ultrasonic vibration systems Mechanism of fracture Fatigue strength

## DYNAMIC PROCESS MODELLING IN ROCKET ENGINE WITH NEURAL NETWORKS

**Cui Dingjun, Yang Erfu, Zhang Zhengpeng, Liu Guoqiu**

(College of Space Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

### ABSTRACT

According to principles of neural networks and BP algorithm, the relationship between the neural networks and nonlinear modelling is analyzed. A general idea and a basic method for modelling with neural networks are put forward on the basis of the study of dynamic process in liquid rocket engine was formulated. Then a new modelling approach to researching the parameters of the engine was formulated. An example given in this paper shows that the application of the neural networks to the investigation of the dynamic process in the liquid rocket engine is a great success.

**Key words** Neural networks Nonlinear Liquid rocket engines