

# 橡胶密封圈径向力分析方法

李树虎, 庞明磊, 贾华敏, 李茂东

(中国兵器工业集团第五三研究所, 山东 济南 250031)

**摘要:**系统介绍试验测试法、工程计算法和数值模拟法3种密封圈径向力分析方法。根据工程计算法推导O形橡胶密封圈径向力计算公式,明确给出旋转油封的径向力计算公式和各参数含义,并采用3种方法对典型O形橡胶密封圈和旋转油封径向力进行测试和分析。工程计算和数值模拟结果与试验结果一致性较好,误差小于5%。

**关键词:**密封圈;旋转油封;径向力;分析方法

**中图分类号:**TQ336.4<sup>+</sup>2;Q241.82 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-890X(2012)04-0232-05

无论是O形橡胶密封圈还是旋转油封,其内径一般都小于轴的直径(存在一定过盈量),装配到轴上后会与轴之间形成径向接触力。径向接触力是实现密封性能的关键因素,因此人们进行了大量研究<sup>[1-3]</sup>。目前主要有试验测试法、工程计算法和数值模拟法3种径向接触力分析方法。试验测试法直观可靠、数据准确,需要专用试验设备和多规格芯轴配件;工程计算法简单有效、应用面广,对复杂密封结构存在局限性;数值模拟法技术先进、信息量大,需要分析人员具备较高的专业知识和经验。技术人员可以根据具体情况,选取适宜的分析方法。

本工作重点根据工程计算法推导O形橡胶密封圈径向力计算公式,明确给出旋转油封的径向力计算公式和各参数含义,并采用3种方法对典型O形橡胶密封圈和旋转油封径向力进行测试和分析,以期对密封制品研发提供参考。

## 1 径向力分析方法

### 1.1 试验测试法

试验测定密封制品的径向力是最为直观可靠的方法,目前所用的径向力测试仪有半轴式和气压推开唇口式两种。半轴式径向力测试仪一般包括高精度传感器、数据采集和单片机处理系统,通过液晶显示屏实时显示机械结构产生的力,可以

记录力值变化曲线,比较直观和快捷。值得注意的是,采用半轴式径向力测试仪时,一般把油封装在给定轴径的两个分离的半圆柱体上,并测量这两个半圆柱体上的张紧力( $F$ )(见图1)<sup>[4]</sup>,从而间接测得密封制品的径向力。应用径向力测试仪测得的典型曲线如图2所示,初始阶段有轻微的应力松弛现象,但很快趋于稳定。

国内有行业标准HG/T 2069—2004《旋转轴唇形密封圈两半轴式径向力测定仪技术条件》,国

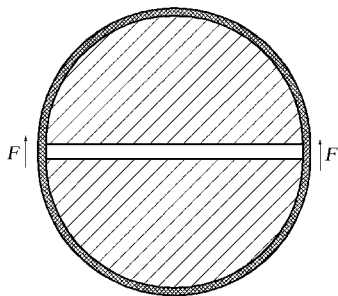


图1 径向力测试仪工作原理

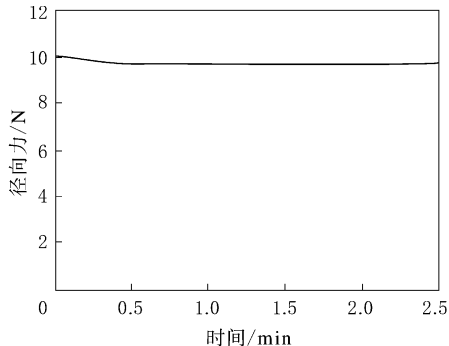


图2 典型径向力试验曲线

**作者简介:**李树虎(1974—),男,辽宁北票人,中国兵器工业集团第五三研究所高级工程师,硕士,主要从事橡胶类非金属材料测试和仿真分析工作。

外也有类似仪器设备(如参照标准 DIN 3761 定制),但目前尚未发现用于工程实践的气压推开唇口式径向力测试仪器的报道。由于实际密封制品的规格型号很多,因此径向力测试仪往往无法提供足够与密封制品相匹配的芯轴,已经成为试验测定密封制品径向力的瓶颈。

## 1.2 工程计算法

### 1.2.1 O形密封圈

工程计算法是处理工程实际问题最为简单有效的方法之一,应用也最为广泛。橡胶密封圈工程算法需要3个假设:①假设在小变形条件下橡胶材料是完全弹性的;②在小变形条件下忽略密封圈的截面面积变化;③假设轴的刚性足够大,在工作过程中不发生形状改变。

密封圈内径一般小于轴的直径(存在过盈量 $\delta$ ),O形密封圈装配到轴上后由于伸长(用于旋转密封的O形圈除外,伸长率一般小于5%)而产生周向张力 $P$ ,进而在轴上形成径向力,O形密封圈装配受力状态如图3所示。

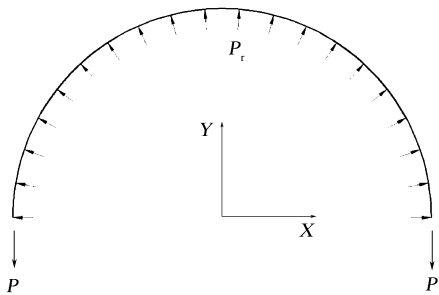


图3 O形密封圈装配受力状态示意

$$\sum F_x = \int_0^\pi P_r r \cos \theta d\theta = 0 \quad (1)$$

$$\sum F_y = \int_0^\pi P_r r \sin \theta d\theta = 2P \Rightarrow P_r = P/r \quad (2)$$

式中  $P_r$ ——单位周长径向力;

$r$ ——轴半径。

$$P = E\epsilon S \quad (3)$$

$$\epsilon = \frac{\delta}{2r} \quad (4)$$

式中  $E$ ——橡胶材料弹性模量;

$\epsilon$ ——密封圈周向伸长率;

$S$ ——密封圈截面积。

将式(3)和(4)代入式(2),得O形密封圈单位周长径向力计算公式:

$$P_r = \frac{E\delta S}{2r^2} \quad (5)$$

假设橡胶在小变形条件下(伸长率小于5%)是完全弹性的,则橡胶弹性模量可以通过测试橡胶邵尔A型硬度( $H_A$ )的方法得到,计算公式为

$$E = \frac{15.75 + 2.15H_A}{100 - H_A} \quad (6)$$

### 1.2.2 旋转油封

旋转油封的密封唇口直径应小于轴径,唇口与轴的接触产生一定的抱紧力;金属弹簧对轴产生径向紧箍力;腰部对轴产生一定的弹力。这3个力叠加合成油封对轴的接触压力。

$$P_r = P_e + P_w + P_s \quad (7)$$

式中  $P_e$ ——单位周长预伸径向力;

$P_w$ ——单位周长腰部弹力;

$P_s$ ——单位周长弹簧紧箍力。

$$P_e = \frac{\delta EF}{2r^2} \quad (8)$$

$$P_w = \frac{\delta ES_m^3}{8L^3} \quad (9)$$

$$P_s = \frac{2P_c}{D} \quad (10)$$

式中  $F$ ——唇口部分截面积;

$L$ ——腰部长度;

$S_m$ ——腰部厚度;

$P_c$ ——弹簧张力;

$D$ ——弹簧工作状态下内直径。

将式(8)~(10)代入式(7),得旋转油封单位周长径向力计算公式:

$$P_r = \frac{\delta EF}{2r^2} + \frac{\delta ES_m^3}{8L^3} + \frac{2P_c}{D} \quad (11)$$

旋转油封单位周长径向力计算也可以采用史密斯公式:

$$P_r = \delta E \left[ \frac{3S_m}{4h_1} \left( \frac{h_1}{D_s} \right)^2 + \frac{S_m}{h_1} \right] + \frac{2P_c}{D} \quad (12)$$

式中  $h_1$ ——唇口高度;

$D_s$ ——轴直径。

油封在使用过程中,由于旋转轴线速度不同,油封径向力的大小是不同的,一般为100~200 N·m<sup>-1</sup>。在高速使用条件下,可选取偏低值(95~130 N·m<sup>-1</sup>);在低速使用条件下,可选取偏高值(150~220 N·m<sup>-1</sup>)。

径向力选取过小,密封性能不可靠;径向力选取过大,由于轴高速旋转,油封唇口摩擦加剧,摩擦扭矩和温升很高,会加速油封损坏,大大降低油封的使用寿命。

1.3 数值模拟法

有限元数值模拟法已经广泛用于橡胶制品的分析设计中,通用的非线性有限元分析软件如 ANSYS, MARC 和 ABAQUS 等可以处理较为复杂的材料非线性、几何非线性和接触非线性等高度非线性问题。如果不考虑特殊工作状态(如偏振等),O 形密封圈和旋转油封均可以简化为二维轴对称问题。采用二维轴对称模型模拟实际三维问题不会影响分析结果,但将大大缩短建模及分析时间<sup>[5]</sup>。下面以旋转油封为例,说明采用 ANSYS 有限元分析软件进行径向力数值模拟的方法。

计算过程中,以油封截面为基准建立二维参数化模型,如图 4 所示,主要包括油封、弹簧和轴面三部分,其中弹簧截面以实心圆面作简化处理。为了得到利于分析的四边形网格以提高计算效率,同时重点关注接触区域,对油封唇口与轴面接触部分进行网格加密控制,整体网格划分如图 5 所示。

在有限元分析中确定弹性体材料的非线性特性是很困难的,但基于应变能密度用于大弹性变形的几种本构理论已经发展起来,并已用于超弹性材料<sup>[6]</sup>,因此采用二参数的 Mooney-Rivlin 应变能函数(W)模型:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (13)$$

式中,  $I_1$  和  $I_2$  为应变不变量,  $C_{10}$  和  $C_{01}$  为 Rivlin 系数,均为正正常数。假设橡胶材料为不可压缩的(泊松比接近 0.5),而且在小变形范围内,其初

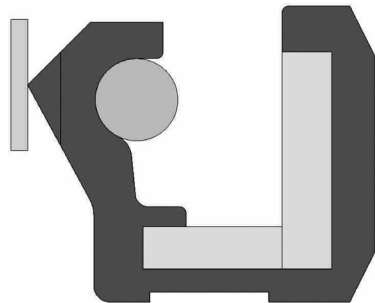


图 4 油封计算模型

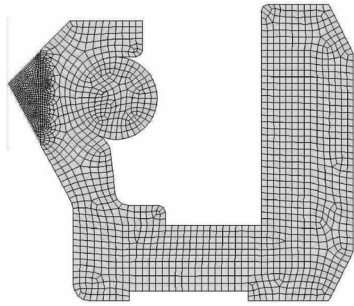


图 5 油封网格划分

始拉伸模量为

$$E = 6(C_{10} + C_{01}) \quad (14)$$

对模型整体作轴对称位移约束,同时在轴与唇口的接触面上施加位移载荷(变形量为过盈量即  $\delta$ ),最后以轴接触面约束反力的方式得到油封径向力。采用数值模拟法可以形象直观地观察应力、变形和接触状态变化,如图 6~9 所示。

2 径向力分析实例

本次实例分析选用的典型 O 形密封圈和油封的结构如图 10 和 11 所示,分析条件如下所述。

(1) 试验测试法。采用 SF1 型径向力测试仪。

(2) 工程计算法。对于 O 形密封圈:轴半径

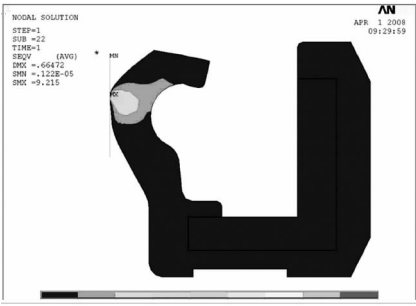


图 6 油封应力状态

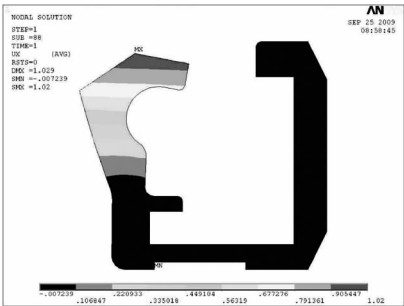


图 7 油封变形状态

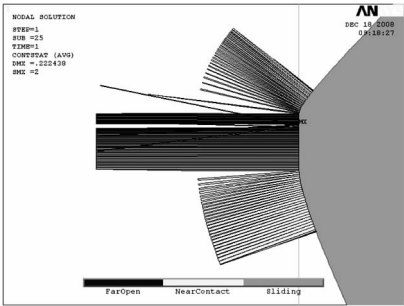


图 8 油封唇口接触状态

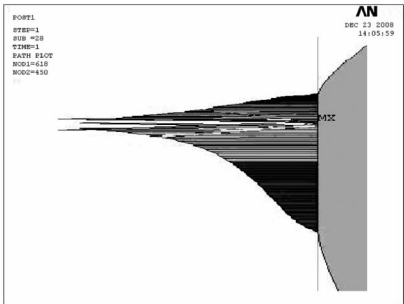


图 9 油封唇口接触压力分布

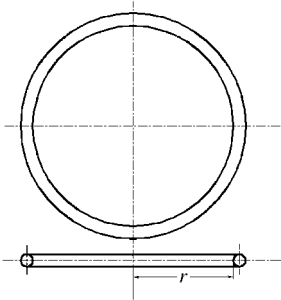


图 10 典型 O 形密封圈结构

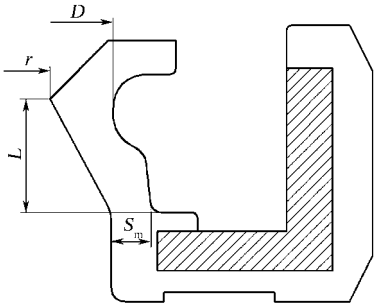


图 11 典型油封结构

为 40 mm;过盈量为 1 mm;O 形圈截面直径为 2 mm,截面面积为 3.14 mm<sup>2</sup>;橡胶邵尔 A 型硬度为 76 度,通过式(6)计算得到  $E=6.3\text{ MPa}$ ;通过式(5)计算 O 形圈单位周长径向力。对于油封:轴半径为 40 mm;过盈量为 1 mm;橡胶邵尔 A 型

硬度为 76 度,通过式(6)计算得到  $E=6.3\text{ MPa}$ ;唇口截面积为 17 mm<sup>2</sup>;腰部厚度为 1.5 mm;腰部长度为 3.6 mm;弹簧工作状态下内径为 84.2 mm; $P_c=1.7\text{ N}$ (弹簧伸长约 5%实测张力);通过式(11)计算油封单位周向径向力。

(3)数值模拟法。使用 ANSYS 有限元分析软件建立二维轴对称计算模型。橡胶材料采用 Mooney-Rivlin 模型,进行橡胶单轴拉伸试验,拟合出系数  $C_{01}=-0.44$ ;  $C_{02}=1.49$ ;此时  $E=6$  ( $C_{10}+C_{01}$ )= $6.3\text{ MPa}$ ,理论与实际相符,O 形密封圈可以直接采用施加位移载荷的方法,油封需要采用接触算法进行非线性静态计算,求取单位周长径向力。

采用 3 种分析方法获得的单位周长径向力结果对比如表 1 所示。

表 1 采用 3 种分析方法获得的单位  
周长径向力结果对比

| 分 类       | N · m <sup>-1</sup> |       |       |
|-----------|---------------------|-------|-------|
|           | 试验测试法               | 工程计算法 | 数值模拟法 |
| 典型 O 形密封圈 |                     |       |       |
| 结果        | 6.02                | 6.18  | 6.09  |
| 误差/%      |                     | 2.6   | 1.2   |
| 典型旋转油封    |                     |       |       |
| 结果        | 125                 | 130   | 131   |
| 误差/%      |                     | 4.0   | 4.8   |

从表 1 可以看出,工程计算法与数值模拟法的分析结果与试验结果误差均小于 5%,具有较高的实用性和可靠性。

3 结论

根据上述分析可得如下结论。

(1)试验测试法、工程计算法和数值模拟法均可用于对密封圈径向力进行分析。本研究对 O 形密封圈和旋转油封径向力进行实例分析,工程计算法和数值模拟法的分析结果与试验结果的误差均小于 5%,具有较高的实用性和可靠性。

(2)密封圈径向力的 3 种分析方法各有优点和局限性,可以根据具体情况,选取适宜的分析方法。一般而言,工程计算法简单有效、应用面广,尤其对 O 形密封圈和旋转油封等典型结构具有较为明显的优势。数值模拟法技术先进、信息量大,需要分析人员具备较高的专业知识和经验,但

是随着计算机软硬件技术的飞速发展,数值模拟法正在迅速普及应用。

### 参考文献:

- [1] 贺杰,杨敏嘉.有关唇型密封的密封机理研究[J].特种橡胶制品,1991,12(3):50-55.
- [2] 王伟,赵树高.橡胶O形密封圈的非线性有限元分析[J].润滑与密封,2005,70(4):108-110.

- [3] 邹德广,杜华太,张斌.影响油封密封性能的材料结构因素分析[J].特种橡胶制品,2001,21(1):41-44.
- [4] Sakai S.油封局部径向载荷测量装置[J].王枫,张青智,译.国外轴承技术,2004(1):18-21.
- [5] 王保森,何红,杨伟民.油封唇口压力大小及分布的有限元分析[J].特种橡胶制品,2007,28(2):39-43.
- [6] 王伟,邓涛,赵树高.橡胶Mooney-Rivlin模型中材料常数的确定[J].固体火箭技术,2004,25(4):8-10.

收稿日期:2011-10-08

## Analysis Methods of Radial Force on Rubber Seal Ring

LI Shu-hu, PANG Ming-lei, JIA Hua-min, LI Mao-dong

(CNGC Institute 53, Jinan 250031, China)

**Abstract:** Three analysis methods of radial force were systemically introduced, including the testing method, engineering computational method and numerical simulation method. The radial force computation formulations of O-ring and rotary oil seal were deducted according to engineering computational method, and the meaning of different parameters was clearly defined. The radial forces of O-ring and rotary oil seal were tested and analyzed, and the results of engineering computation and numerical simulation were consistent with testing results, having less than 5% error.

**Key words:** seal ring; rotary oil seal; radial force; analysis method

### 创新的技术 发展的产品

中国分类号: TQ336.4 文献标志码: D

江西金利隆橡胶履带有限公司是一家以出口为主的新兴民营企业。该公司生产的橡胶履带占全国总产量的30%,达到20万条,销售额4亿元以上。产品远销欧洲、美洲、澳洲、日本、韩国等地。2012年2月7日,中央电视台《创新无限》栏目组在现场进行了拍摄和采访。

橡胶履带在履带式车辆中有着十分广泛的用途,目前在军工、工程机械、农业、园林等方面逐步推广应用。据称,橡胶履带在履带式机械中应用的比例越高,标志着交通文明程度越高。

橡胶履带主要具有以下优异性能:(1)对路面的不损伤性。橡胶履带机械作业,不受路面限制,且避免了钢式履带对路面的严重破坏。(2)接地比压小,湿地通过性能好,农业机械橡胶履带更利于农作物根部扎根、生长以及吸收水分和营养。

(3)油耗低,有资料表明橡胶履带比钢履带减少油耗5%~10%,有利于节能减排。(4)震动小,噪声低,减轻对环境的影响。(5)机械时速提高,在行走机构相同情况下,橡胶履带时速可提高15%左右。(6)减小机械质量,提高牵引力。(7)耐腐蚀性好,更适合于盐田和沙漠中使用,寿命较长。(8)更换方便。橡胶履带在我国使用刚起步,必将引起重视,是我国橡胶行业新兴的一个产业,具有广阔的发展前景。

橡胶履带的生产一般采用搭接式工艺。由于其骨架材料是钢丝,这种搭接式工艺生产的产品存在许多弊端。该公司经过自己的艰苦创新,研发成功了无接头环形缠绕式工艺及其相关装备,现已生产上千个品种规格,产品质量受到国外用户的青睐。选择适销对路的产品,不断技术创新,是该公司得以迅速发展的根本。

(北京橡胶工业研究设计院 陈志宏)