

基于 ANSYS 的防尘密封圈密封性能研究

张清奎¹, 高新陵¹, 杨帆²

(1. 河海大学机电工程学院, 南京 211100;

2. 瑞钛科技有限公司)

摘要: 借助于大型有限元分析软件 ANSYS, 针对 A 型密封防尘圈大变形和非线性特征, 建立了氟橡胶、丁腈橡胶、聚氨酯橡胶三种不同橡塑材料的 A 型防尘密封圈的非线性有限元分析模型, 对三种材料进行了最大接触应力、平均接触应力及应力分布的分析对比。其结果对提高不同材料 A 形防尘密封圈的研究设计水平, 改善密封圈的性能具有一定的理论意义和指导作用。

关键词: A 型防尘密封圈; 本构模型; 接触问题; 非线性有限元

中图分类号: TH12

Dustproof seal ring seal performance study on ANSYS

Zhang Qingkui¹, Gao Xinling¹, Yang Fan²

(1. School of Mechanical and Electrical engineering, Hohai University, NanJing 211100;

2. Reason technology Co., LTD)

Abstract: By using ANSYS software, according to type A seal dustproof circle and nonlinear characteristics of large deformation and established fluorine rubber, butyl rubber, polyurethane rubber three different xiangsu materials type A dustproof seals of nonlinear finite element analysis model, the three kinds of materials, the average maximum contact stress and the contact stress analysis of the stress distribution in contrast. To improve the results of different materials A form dustproof seals study design level, improve sealing performance has certain theoretical significance and guiding role.

Keywords: Type A dustproof sealing ring; Constitutive model; Contact problem; Nonlinear finite element

0 引言

A 型防尘密封圈应用于往复运动的动密封, 属于唇型密封圈。当 A 型防尘密封圈装入密封腔体后, 唇部被活塞杆压缩, 发生微小的扭转, 并在接触的表面产生一定的接触应力, 利用这个应力进行防尘密封。因此, 唇部的结构尺寸将直接影响密封圈的密封性能。到目前为止, 国内外对不同材料和非标准 A 形密封圈的研究较少。本文作者利用大型有限元分析软件 ANSYS, 建立了氟橡胶、丁腈橡胶、聚氨酯橡胶三种不同橡塑材料的 A 型防尘密封圈的非线性有限元分析模型, 对三种材料进行了最大接触应力、平均接触应力及应力分布的分析对比。

1 A 型密封圈有限元分析模型

由于其边界条件的复杂性, 对 A 型防尘密封圈进行有限元计算必须将 A 型圈及活塞杆、密封腔体作为整体进行分析。A 型密封圈与活塞杆、密封腔体之间存在挤压作用, 因此 A 型圈的有限元分析包含橡塑材料和金属材料的接触问题。

1.1 橡塑材料的本构模型

目前密封产品大多数的材料是橡塑共混材料, 在对密封件进行有限元分析时, 需要知道

作者简介: 张清奎, (1983-), 男, 硕士, 机械设计及理论. E-mail: sophi55@126.com

通信联系人: 高新陵, (1955-), 女, 教授, 机械设计及理论

其本构关系。由于橡塑共混材料防尘圈的基体仍然是橡胶材料,因此,橡胶材料的本构关系适用于橡塑材料^[1]。

为了得到橡胶材料性质的数学表达式,我们通常采用“唯象”的处理方法,即不涉及分子结构理论而通过数学推理的方法获得。这种方法的主要作用是找到描述橡胶性质的最简便的途径,而不用对分子级的物理意义进行解释。

如今已经出现了很多形式的唯象理论,它们从以数学方式描述的单向拉伸的应变应力关系发展到由一个或多个基本假设把各种应变形式联系起来。这些理论在其技巧性和一般性这两方面都应得到了充分的发展。本文只对一般性的唯象理论,即适用于一般应变问题的 Mooney 理论及 Rivlin 在此后的改进进行研究^[2]。

Mooney-Rivlin 模型来模拟橡胶材料模型,该理论可以较好地描述橡胶类不可压缩超弹性材料在大变形下的力学特征,其应变能密度函数为:

$$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) + \alpha(I_3 - 1)/2$$

式中: W 为应变能密度; C_1 、 C_2 为材料 Mooney-Rivlin 系数; I_1 , I_2 , I_3 为第一、二、三 Green 应变不变量, $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$, $I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2$, $I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2$, 其中 λ_i ($i=1, 2, 3$) 为主拉伸率; α 为体积弹性模量,对不可压缩的超弹性体,引入条件 $I_3=1$ 。

对于不可压缩超弹性材料,应力表征为应变能函数对应变的偏导数,其本构方程为:

$$S_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}}$$

式中: S_{ij} 为比奥雷-克西霍夫应力(Piola-Kirchhoff); W 为应变能密度; E_{ij} 为格林(Green)应变张量的分量^{[3][4]}。本文采用 Mooney-Rivlin 两项式应变能描述橡胶超弹性材料。

1.2 A 型防尘密封圈有限元模型的建立

本论文所研究的防尘圈的材料为氟橡胶、丁腈橡胶和聚氨酯三种材料(注意:这里氟橡胶、丁腈橡胶、聚氨酯表示其是以氟橡胶、丁腈橡胶和聚氨酯为基体的橡塑材料),其中氟橡胶的硬度为 HS85,丁腈橡胶的硬度为 HS90,聚氨酯橡胶的为 HS95,氟橡胶的 C_1 、 C_2 参数为: 2.2、0.057,丁腈橡胶的 C_1 、 C_2 参数为: 2.65、0.056,聚醚聚氨酯的 C_1 、 C_2 参数为: 3.2、0.055。轴径和开式沟槽尺寸按照相关标准取值。有限元分析采用国际上通用的大型有限元分析软件 ANSYS。A 型防尘密封圈平面轴对称有限元模型如图 1-1 所示。由于钢构成的密封腔体的弹性模量是橡胶的几万倍,所以把轴、密封腔体看做是刚性的,不考虑其变形,轴和密封腔体与密封圈的接触看做是刚性与柔性的接触。在模型网格划分中,由于研究的是密封圈于轴之间接触应力,所以对密封圈的唇部划分较细,模型中的接触单元由接触单元 CONTA172 和目标单元 TARGE169 配对组成。

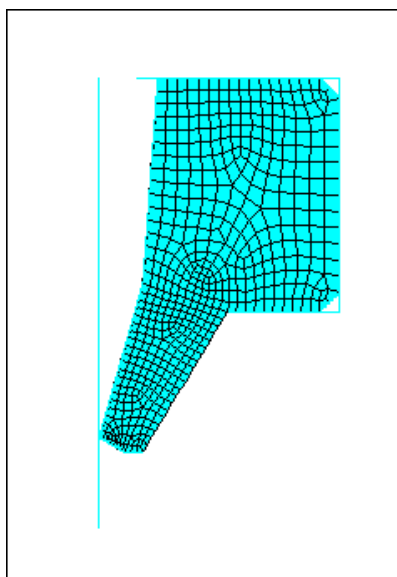


图 1-1 防尘圈的平面轴对称有限元模型

75 1.3 A 型防尘密封圈的有限元分析

根据机械设计手册 (GB/T 10708.3-1989) 标准^[5]对 A 型防尘圈建模分析, 该步骤主要是对防尘圈与轴及密封腔体的接触应力分析, 结合防尘圈内应力分析, 判定防尘圈容易发生破坏的位置。由于 A 型防尘圈系列标准公称尺寸很多, 不能将分析结果图片全部给出。为了说明分析结论具有的普遍性, 我们选取了全系防尘圈两端 (8mm、320mm) 及中部的轴径 (90mm)。

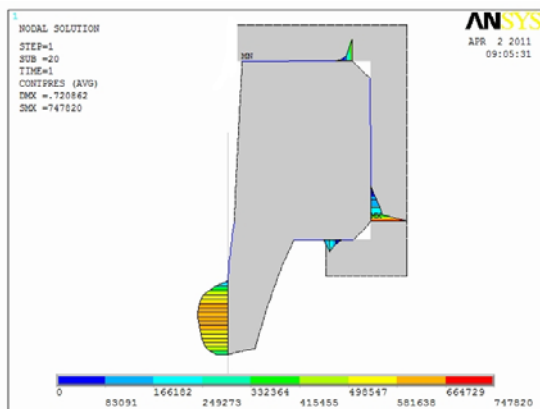


图 1-2 8mm 轴用防尘圈接触应力分析结果

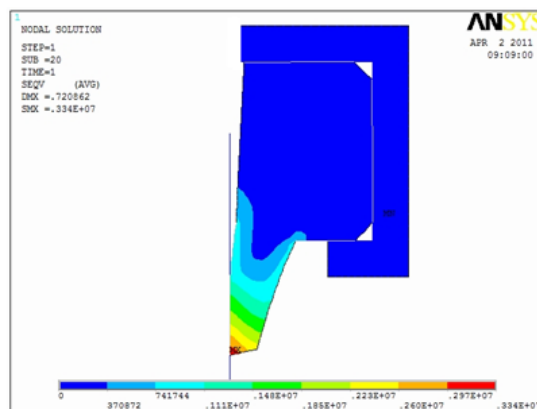


图 1-3 8mm 轴用防尘圈屈服应力分析结果

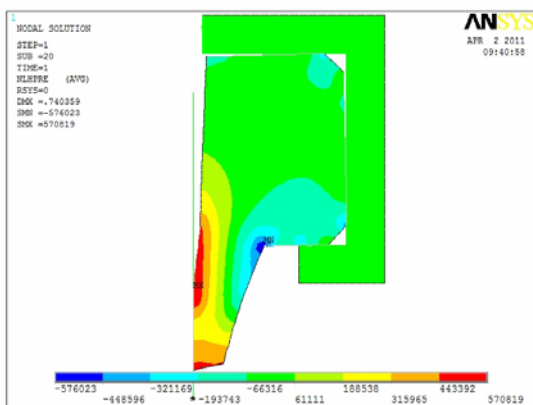


图 1-4 8mm 轴用防尘圈平均应力分布分析结果

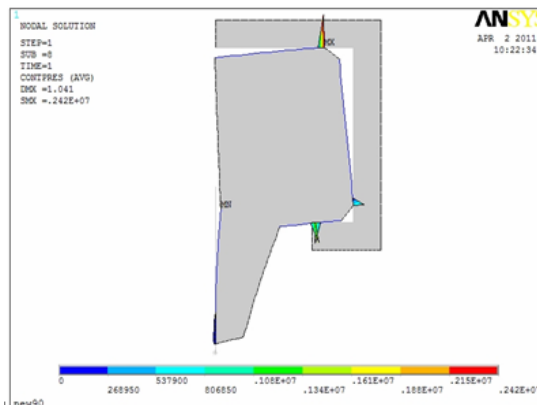


图 1-5 90mm 轴用防尘圈接触应力分析结果

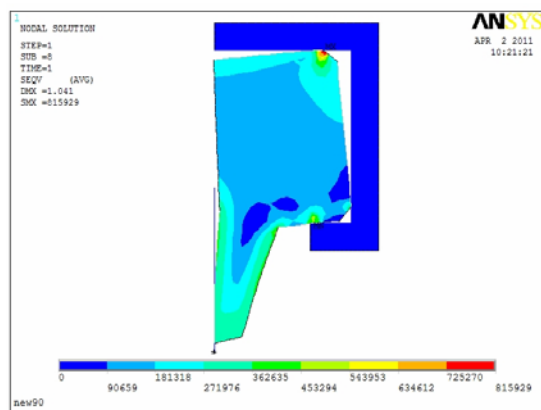


图 1-6 90mm 轴用防尘圈屈服应力分析结果

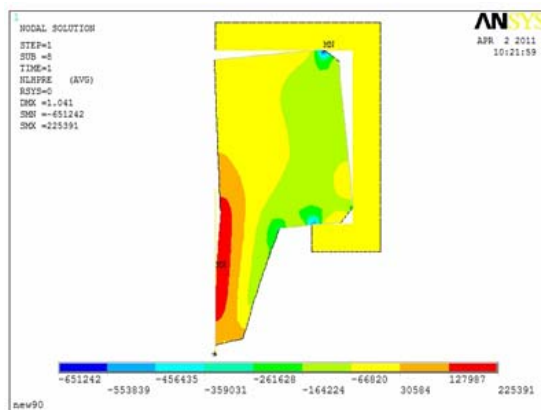


图 1-7 90mm 轴用防尘圈平均应力分布分析结果

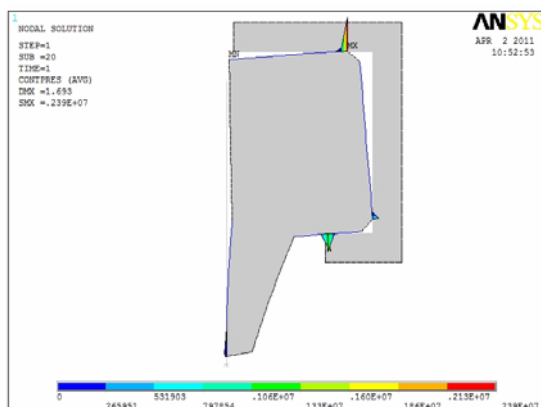


图 1-8 320mm 轴用防尘圈接触应力分析结果

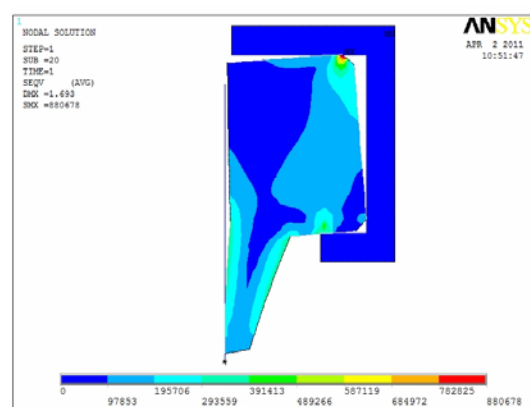


图 1-9 320mm 轴用防尘圈屈服应力分析结果

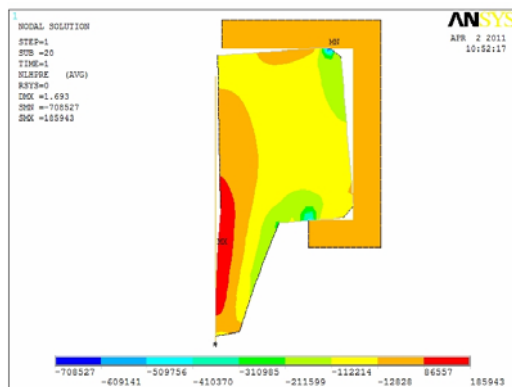


图 1-10 320mm 轴用防尘圈平均应力分布分析结果

95 由 8mm、90mm、320mm 轴用防尘圈的接触应力、屈服应力、平均应力可以看出，A 型防尘圈应力分布的规律有以下共性：

从接触应力看，唇部接触应力是保证 A 型防尘圈防尘的关键，接触应力过大会使摩擦磨损增加，降低防尘圈的使用寿命；接触应力过小会降低密封圈的防尘效果。理想的密封性能需要防尘圈唇部有适当的接触应力与合理的应力分布形式。

100 从屈服应力看，唇部是容易发生屈服破坏的部位，发生屈服破坏会使材料失去抵抗变形的能力，影响到防尘圈的接触应力。这也是在屈服发生时，即使增加唇部尺寸的过盈量，密封圈接触应力变化不大的主要原因。

从平均应力分布看，唇部靠近轴面部位受到的拉伸应力最大，在轴往复运动工作过程中最容易发生撕裂。

因此, A 型防尘圈唇部是承受各种应力最为集中的部位。在 A 型防尘圈实际使用的过程中, 唇部也是最容易发生破坏与失效的地方, 所以, A 型防尘圈唇部是其防尘效果与使用寿命的关键部位。

此外, 需要注意的是接触应力的分布形式对 A 型防尘圈也非常关键, 实践证明, 唇部接触应力矩形分布是最为理想的分布形式。

综上所述, 研究 A 型防尘圈唇部尺寸结构变化对应力及应力分布的影响尤为重要, 这也是以下研究内容的重点。

2 计算结果与分析

为比较丁腈、聚氨酯橡胶与氟橡胶防尘圈唇厚尺寸对接触应力的影响, 我们以 40mm 轴用防尘圈为例。唇部长度标准值为 3.6mm, 唇长变化值为 3.1mm、3.4mm、3.9mm 及 4.1mm。唇尖厚度标准值为 0.85mm, 唇尖厚度变化值为 0.55mm、0.65mm、0.75mm、0.95mm 及 1.05mm。

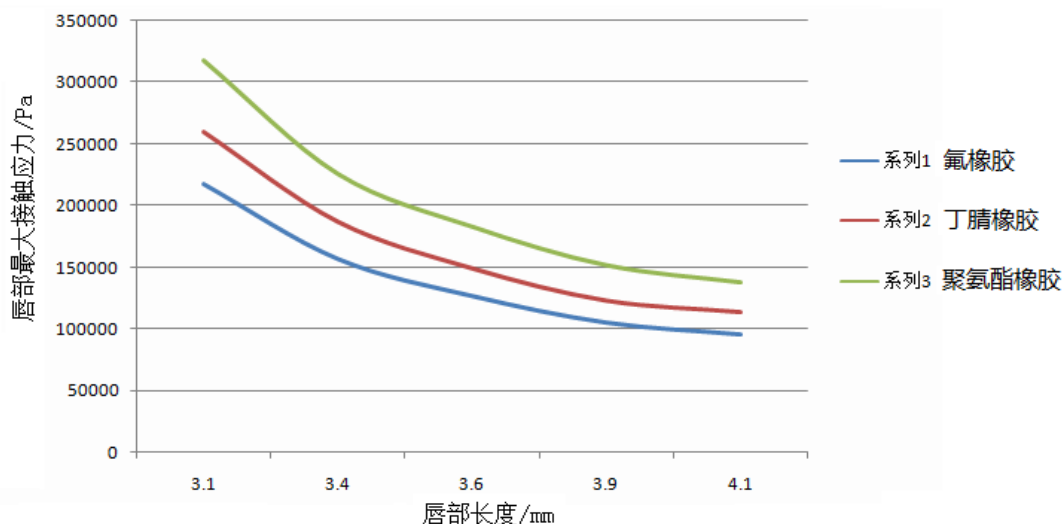


图 2-1 氟橡胶、丁腈、聚氨酯唇部最大接触应力随唇部长度的变化对比

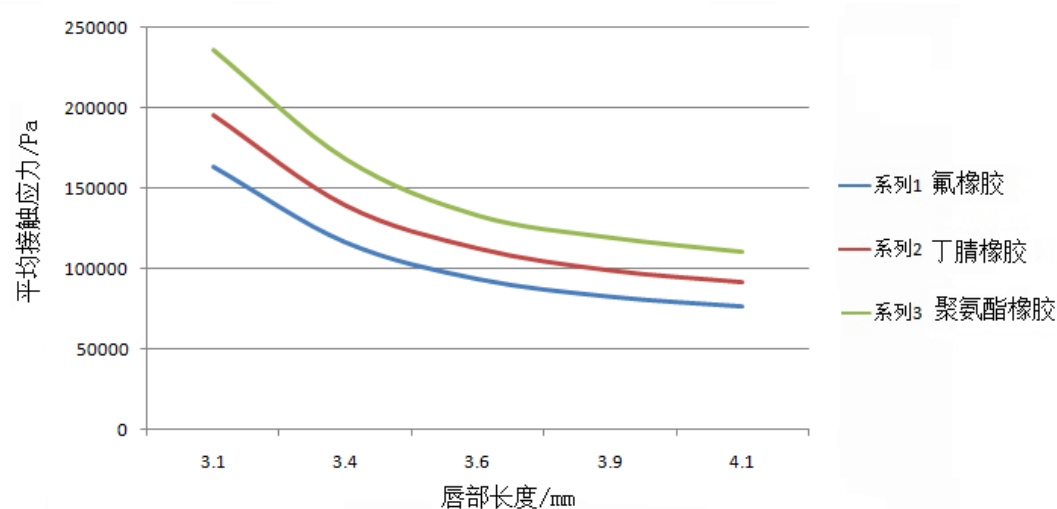


图 2-2 氟橡胶、丁腈、聚氨酯唇部平均接触应力随唇部长度的变化对比

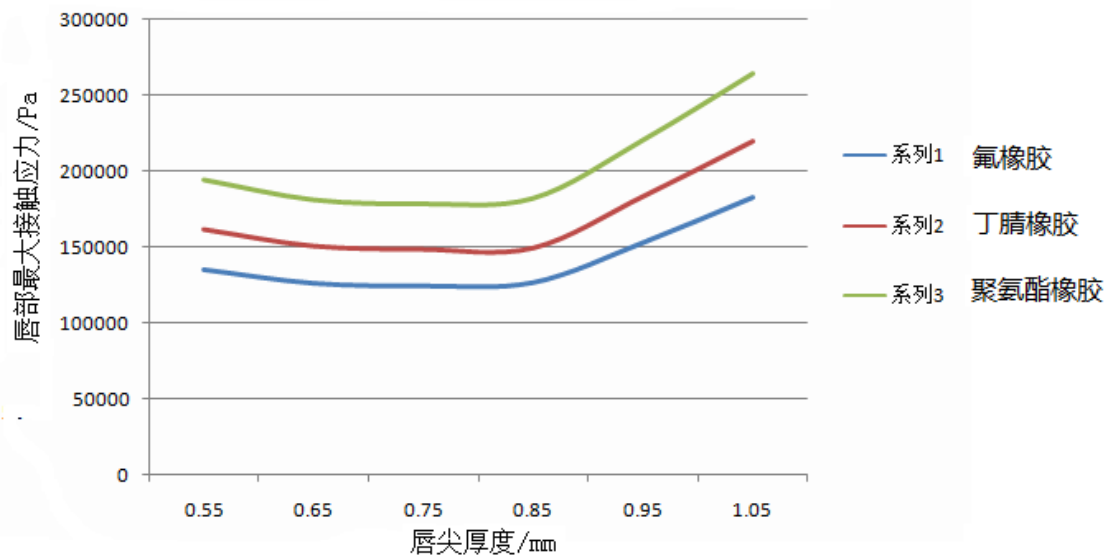


图 2-3 氟橡胶、丁腈、聚氨酯唇部平均接触应力随唇尖厚度的变化对比

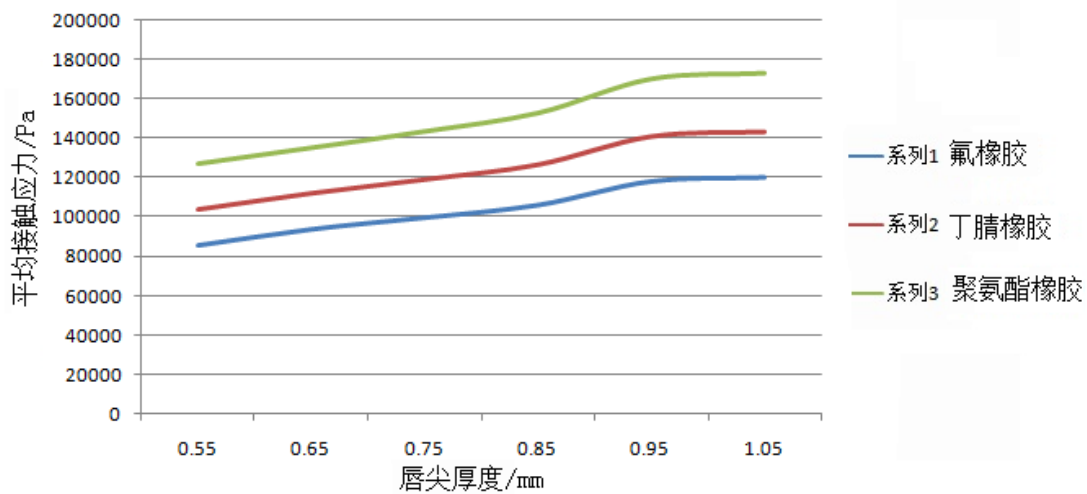


图 2-4 氟橡胶、丁腈、聚氨酯唇部平均接触应力随唇尖厚度的变化对比

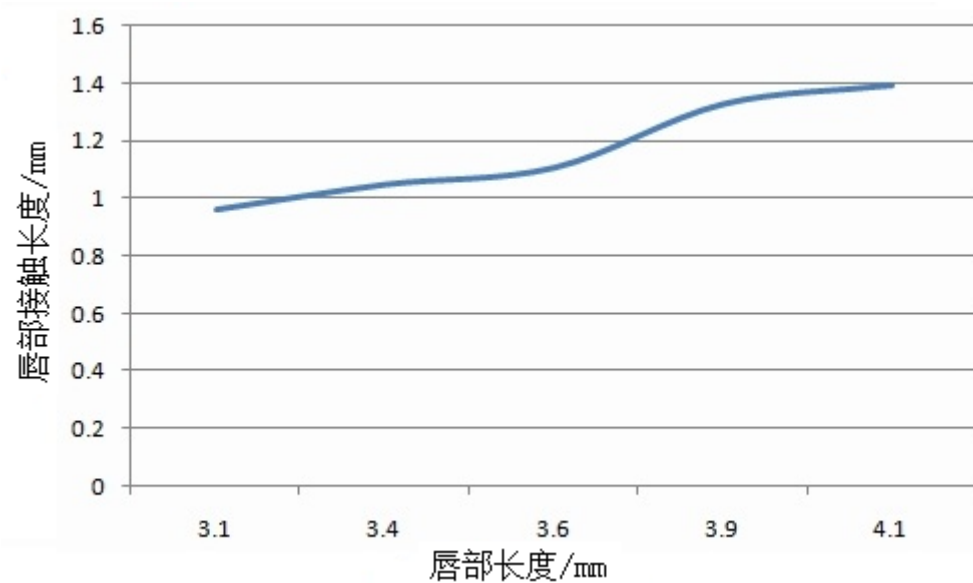


图 2-5 40mm 轴用 A 型防尘圈唇部接触长度随唇部长度的变化

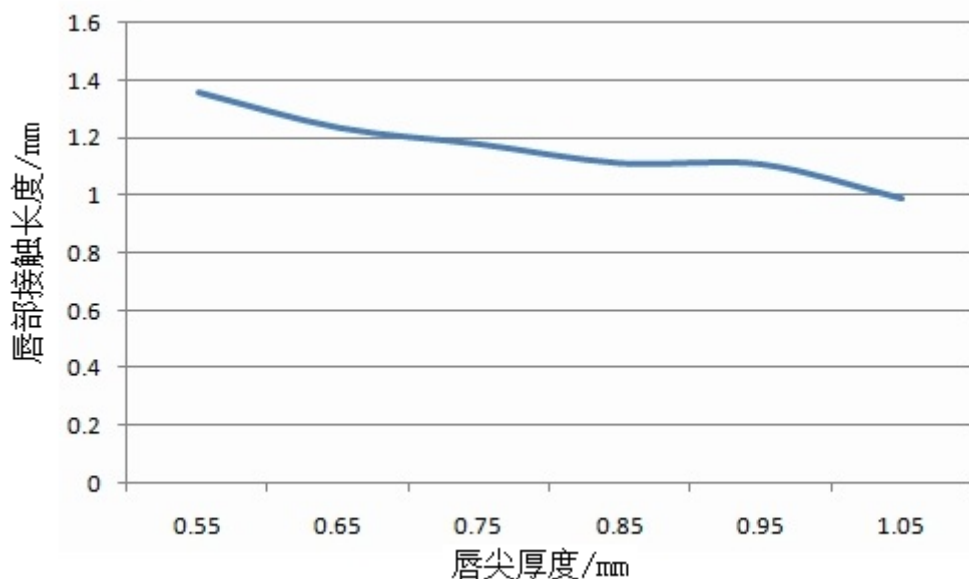


图 2-6 40mm A 型防尘圈唇部接触长度随唇尖厚度的变化

由图 2-1 和 2-3 可知，丁腈、聚氨酯橡胶 40mm 轴用防尘圈的唇部唇长与唇部厚度变化后的最大接触应力曲线与氟橡胶的形状相同，聚氨酯橡胶的唇长、唇厚变化后的最大接触应力对丁腈橡胶的增幅比丁腈橡胶的唇长、唇厚变化后的最大接触应力对氟橡胶的增幅要大。唇长变化对最大接触应力的影响比较稳定。从三种材料单个唇长唇厚变化分析图（图略）可以看出如果想要降低最大接触应力，减小唇长比减小唇尖厚度得到更为理想的接触应力分布（矩形分布），因为在唇尖厚度变小时唇尖接触应力值过小，防尘效果不佳。如果想要提高最大接触应力，增大唇尖厚度比减小唇长效果更为明显。需要注意的是当我们想要增大最大接触应力时，最大接触应力会向唇尖处移动，这样做的好处是可以增强防尘效果，坏处是增加摩擦磨损，降低防尘圈寿命。

对比图 2-2 和 2-4 可以看出，三种材料唇部长度变化比唇尖厚度变化对平均接触应力的影响大，因此在唇部结构设计的时候要考虑唇长及唇厚对平均接触应力的影响程度。

由最大接触应力与平均接触应力分析可以看出：当只考虑材料硬度不考虑材料其他物理性质的时候，唇部最大接触应力值随硬度的变化而变化（硬度每上升 5 度接触应力增加 20%）。三种材料的唇部平均接触应力与唇部最大接触应力类似，硬度每上升 5 度，平均接触应力增加 20% 左右。

从接触长度分析结果看，三种材料的唇部接触长度相同（数据如图 2-5、2-6）。

综上所述，我们在想得到预期接触应力及其分布时，应该结合唇长及唇尖厚度变化对接触应力及其分布形式的影响规律，合理设计唇部结构以得到最佳的结构尺寸达到最好的防尘效果和使用寿命。

3 结论

本文采用有限元方法分析了不同材料 A 形防尘密封圈的唇部尺寸改变对密封性能的影响，这使我们加深了对不同材料 A 形防尘密封圈性能的了解，其结果对提高不同材料 A 形防尘密封圈的研究设计水平，改善 A 型防尘密封圈的性能具有一定的理论意义和指导作用。通过分析总结得到以下两点结论：

1、唇部尺寸对接触应力大小及应力分布影响明显，通过分析对比，可以得到改善唇部

结构尺寸的方法,即降低最大接触应力,减小唇长比减小唇尖厚度得到更为理想的接触应力分布;提高最大接触应力,增大唇尖厚度比减小唇长效果更为明显。

2、. 当只考虑材料硬度不考虑材料其他物理性质的时候,唇部最大接触应力值随硬度的变化而变化(硬度每上升 5 度接触应力增加 20%)。三种材料的唇部平均接触应力与唇部最大接触应力类似,硬度每上升 5 度,平均接触应力增加 20%左右。

[参考文献] (References)

- [1] 李树虎,贾华敏等.橡塑往复密封有限元分析[EB/OL]. http://www.newmaker.com/art_20241.html,2007.
- [2] [英] L.R.G 橡胶弹性物理学[M].北京:化学工业出版社,1982.
- [3] 周志鸿,张康雷,李静,许同乐. O 形橡胶密封圈应力与接触压力的有限元分析.润滑与密封[J], 2006(4), 0254-0150 (2006) 4-086-4
- [4] 徐红波,喻九阳,常跃,熊智强. O 形密封圈的非线性有限元分析.武汉工程职业技术学院学报[J], 2006(12), 1671-3524(2006) 04-0021-04
- [5] 成大先等. 机械设计手册(单行本)——润滑与密封[M], 北京: 化学工业出版社, 2003