

橡胶O形圈最大接触压力、IRHD硬度和压缩率之间的函数关系研究

邓向彬, 黄乐*, 向宇, 武建军

(广州机械科学研究院有限公司, 广东 广州 510535)

摘要:通过有限元软件ANSYS建立橡胶O形圈与安装沟槽的二维轴对称模型, 计算不同IRHD硬度和压缩率O形圈的最大接触压力, 借助数学软件拟合得到O形圈最大接触压力、IRHD硬度和压缩率之间的函数关系及等高线。该函数关系适用于大部分O形圈相关的设计和评估。

关键词:橡胶O形圈; IRHD硬度; 压缩率; 最大接触压力; 有限元分析; 函数关系

中图分类号: TQ336.4⁺2; TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 2095-5448(2019)00-0000-04

DOI: 10.12137/j.issn.2095-5448.2019.00.0000

橡胶O形圈(以下简称O形圈)具有良好的密封性能, 其结构简单、成本低廉, 广泛用于液压系统的静密封或速度、密封压力较小的动密封。作为常用密封件, O形圈的密封性能直接影响液压系统的性能。据统计, 全球每年因O形圈失效带来的直接和间接经济损失高达千万美元, 其中包括设备停机、产品召回、产品保修和环境污染等^[1-2]。

O形圈属于挤压弹性体密封件, 当O形圈安装在密封沟槽中时, 在初始预压缩量和被密封介质压力作用下, O形圈变形产生接触压力, 从而达到密封的目的。对于不同密封设备或工况, 无法确定O形圈的最佳压缩率, 这使得在实际安装时, 大多选择较大压缩率, 但较大压缩率会使O形圈的最大应力和压缩永久变形增大, 影响其使用寿命, 甚至会造成其结构破坏而导致密封失效。

本工作通过有限元软件ANSYS对O形圈建模, 计算不同IRHD硬度和压缩率O形圈的最大接触压力, 研究O形圈最大接触压力、IRHD硬度和压缩率之间的函数关系, 进而确定特定油液压力和IRHD硬度O形圈的压缩率合理设计方案。

基金项目: 广州市珠江科技新星专项(201610010161)

作者简介: 邓向彬(1986—), 男, 辽宁丹东人, 广州机械科学研究院有限公司助理工程师, 学士, 主要从事橡塑密封相关研究的工作。

*通信联系人(huangle27@163.com)

1 有限元建模

1.1 模型假设

由于O形圈分析具有高度非线性特点(即材料非线性、几何非线性和接触非线性), 因此前期需对模型做以下假设: ①材料是连续均匀的; ②蠕变不引起体积的变化; ③忽略材料溶胀对密封性能的影响; ④忽略温度变化对密封性能的影响。

1.2 材料模型

活塞和缸筒材料为金属, 定义其弹性模量(E)为200 GPa, 泊松比为0.3; O形圈的材料为橡胶, 属于超弹性材料, 具有材料非线性特性, 故采用两参数Mooney-Rivlin模型来定义其材料特性^[3]。Mooney-Rivlin模型的表达式为:

$$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) \quad (1)$$

式中, W 为应变能密度, C_1 和 C_2 为Rivlin系数, I_1 和 I_2 为第1和2 Green应变不变量。

C_1 和 C_2 与 E 之间的关系为^[4]:

$$E = 6C_1(1 + \frac{C_2}{C_1}) \quad (2)$$

$$\frac{C_2}{C_1} = 0.05 \quad (3)$$

橡胶材料IRHD硬度与 E 符合经验公式^[4], 即

$$\log E = 0.019 8 H_r - 0.543 2 \quad (4)$$

式中, H_r 为IRHD硬度。

1.3 几何模型及网格划分

由于O形圈的结构及其受力具有轴对称特点,

在有限元分析时,采用PLANE182单元建立O形圈与安装沟槽的二维轴对称模型,通过四面体网格进行网格划分,并通过Refine命令对O形圈外部网格进行细化,这样既可以兼顾求解速度,又能提取较为详细的接触信息。O形圈的有限元模型如图1所示,采用接触单元CONTA172单元和TARGE169单元分别设置了两个接触对(即O形圈与活塞,O形圈与缸筒,接触类型为刚柔接触)来反映密封结构各部件之间的接触关系。

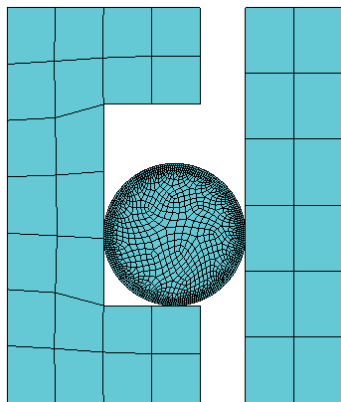


图1 O形圈的有限元模型示意

1.4 载荷及边界

通过一个载荷步进行分析并计算不同IRHD硬度和压缩率O形圈的接触压力。由于O形圈的内径拉伸或挤压安装时会影响其接触压力,因此在模拟压缩率时,采用对活塞和缸筒施加相同位移的方式进行位移加载,以忽略拉伸或挤压效应的影响。

2 结果与讨论

2.1 密封原理

O形圈属于自紧式挤压型密封件,其工作原理是依靠自身弹性变形,从而在密封接触面上产生接触压力。接触压力大于被密封介质的压力时才能实现密封,反之则发生泄漏,即^[5]

$$P_c > P \quad (5)$$

式中, P_c 为接触压力, P 为油液压力。 P_c 由两部分组成,一部分是O形圈的预紧接触压力(P_{c0}),由O形圈初始压缩安装时产生的;另一部分是油液压力经O形圈传递到接触面上的接触压力(P_p)^[6]。 P_p 的

计算公式如下:

$$P_p = kP \quad (6)$$

式中, k 为测压系数 $[k = \mu / (1 - \mu)]$, μ 为材料泊松比,对于橡胶密封件 μ 为0.480~0.496, k 约为0.900~0.985。

2.2 压缩率的确定

O形圈安装时允许存在一定程度的拉伸和挤压量,这种情况不会影响其密封效果,但会影响其断面直径,从而改变实际压缩率。根据体积不变原理,O形圈安装前后的体积相等,即

$$\frac{\pi}{4} d_0^2 (D_0 + d_0) = \frac{\pi}{4} d_1^2 (D_1 + d_1) \quad (7)$$

式中, d_0 为O形圈初始断面直径,mm; D_0 为O形圈内径,mm; d_1 为拉伸/挤压后O形圈的断面直径,mm; D_1 为安装沟槽内径。

为了简化计算,用 $D_1 + d_0$ 代替 $D_1 + d_1$,则公式(7)可简化为:

$$d_1 = \sqrt{\frac{d_0^2 (D_0 + d_0)}{D_1 + d_0}} \quad (8)$$

简化后计算出的 d_1 值存在一定误差,将 d_1 代回公式(8)计算,求出O形圈的断面直径 d_2 ,即

$$d_2 = \sqrt{\frac{d_0^2 (D_0 + d_0)}{D_1 + d_1}} \quad (9)$$

以此类推,可计算出O形圈的断面直径 $d_3, d_4, \dots$ 。一般情况下, d_2 值即可达到要求。

拉伸和挤压后O形圈的压缩率计算公式如下:

$$\varepsilon = \frac{d_2 - h_0}{d_2} \times 100\% \quad (10)$$

式中, ε 为压缩率, h_0 为O形圈的压缩量(为安装沟槽内外径之差的1/2)。

2.3 函数关系拟合

根据所建的O形圈有限元模型,分析IRHD硬度为60,70,80和90度、压缩率为10%,15%,20%,25%和30%时O形圈的接触压力,借助数学软件First Optimization对数据进行二元函数拟合,寻找最大接触压力与IRHD硬度和压缩率之间的函数关系。

不同硬度的Rivlin系数换算结果如表1所示。不同硬度和压缩率O形圈的最大接触压力如表2所示。

经拟合得到O形圈最大接触压力与IRHD硬度

表1 IRHD硬度的Rivlin系数换算结果

IRHD硬度	E/MPa	Rivlin系数	
		C_1	C_2
60	4.413 7	0.701	0.035
70	6.963 1	1.105	0.055
80	10.985 0	1.744	0.087
90	17.330 1	2.751	0.138

表2 不同硬度和压缩率O形圈的最大接触压力

IRHD硬度/度	压缩率/%	最大接触压力/MPa
60	10	0.831 8
60	15	1.200 4
60	20	1.592 2
60	25	2.035 7
60	30	2.568 3
70	10	1.311 1
70	15	1.891 9
70	20	2.509 4
70	25	3.208 4
70	30	4.047 8
80	10	2.069 4
80	15	2.986 0
80	20	3.960 9
80	25	5.064 5
80	30	6.389 1
90	10	3.265 1
90	15	4.711 3
90	20	6.249 5
90	25	7.990 6
90	30	10.080 5

和压缩率之间的经验公式,即

$$P_c = a_1 + a_2 \{0.5 + \text{atan}[(H_r - a_3)/a_4]/\pi\} + a_5 \{0.5 + \text{atan}[(\varepsilon - a_6)/a_7]/\pi\} + a_8 \{0.5 + \text{atan}[(H_r - a_3)/a_4]/\pi\} \{0.5 + \text{atan}[(\varepsilon - a_6)/a_7]/\pi\} \quad (11)$$

式中,各系数的取值为: $a_1 = -71.488$, $a_2 = 78.042$, $a_3 = 102.377$, $a_4 = -21.016$, $a_5 = 1013.982$, $a_6 = 0.921$, $a_7 = 0.218$, $a_8 = -1106.879$ 。

O形圈最大接触压力与IRHD硬度和压缩率关系的等高线如图2所示。

由图2可知,O形圈的最大接触压力随着压缩率和IRHD硬度增大而增大。

经拟合得到O形圈IRHD硬度与压缩率和最大接触压力之间的经验公式,即

$$H_r = b_1 + b_2 \varepsilon + b_3 \varepsilon^2 + b_4 \varepsilon^3 + b_5 \ln P_c \quad (12)$$

式中,各系数的取值为: $b_1 = 88.367$, $b_2 = -314.230$, $b_3 = 813.245$, $b_4 = -1036.301$, $b_5 = 21.936$ 。

O形圈IRHD硬度与压缩率和最大接触压力关系的等高线如图3所示。

由图3可知,对于接触压力较大的使用场合,需要适当增大O形圈的压缩率,而不能只增大IRHD硬度。

经拟合得到O形圈压缩率与IRHD硬度和最大接触压力之间的经验公式,即

$$\varepsilon = (c_1 + c_3 H_r + c_5 P_c + c_7 H_r^2 + c_9 P_c^2 + c_{11} H_r P_c) / (1 + c_2 H_r + c_4 P_c + c_6 H_r^2 + c_8 P_c^2 + c_{10} H_r P_c) \quad (13)$$

式中,各系数的取值为: $c_1 = 13.469$, $c_2 = 0.385$, $c_3 = -0.554$, $c_4 = 87.211$, $c_5 = 90.072$, $c_6 = 0.059$, $c_7 = 0.003$, $c_8 = 2.208$, $c_9 = 0.918$, $c_{10} = -0.801$, $c_{11} = -0.797$ 。

O形圈压缩率与IRHD硬度和最大接触压力关系的等高线如图4所示。

由图4可知,对于接触压力较大的使用场合,

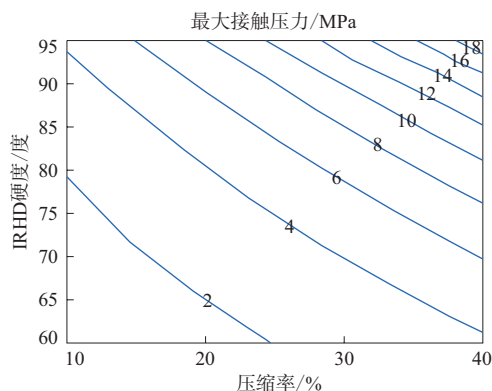


图2 O形圈最大接触压力与IRHD硬度和压缩率关系的等高线

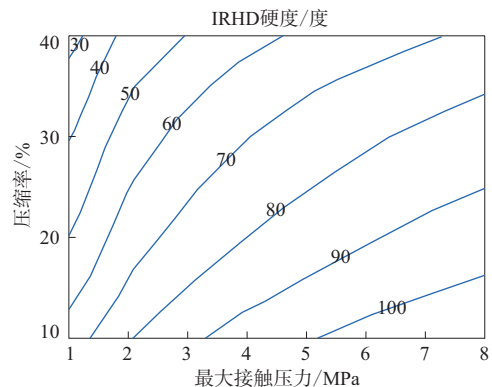


图3 O形圈IRHD硬度与压缩率和最大接触压力关系的等高线

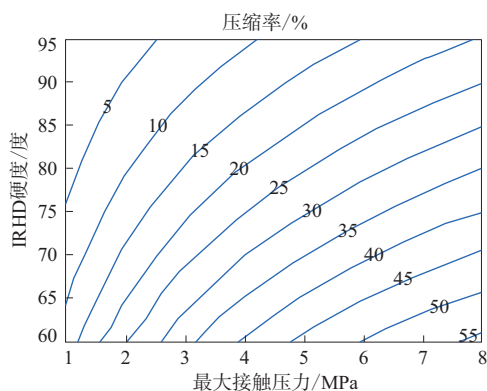


图4 O形圈压缩率与IRHD硬度和最大接触压力关系的等高线

需要适当增大IRHD硬度,否则会使O形圈的压缩率过大。

2.4 应用实例

现以内径为54.5 mm、截面直径为3.55 mm的O形圈为例,安装沟槽的轴径为56 mm,对其在5 MPa油液压力下的压缩率及安装沟槽外径进行选择。

假定已知O形圈IRHD硬度为80度, k 取0.9,则由公式(6)可得 $P_p=4.5$ MPa。考虑老化等因素的影响,安全系数取1.8,则由公式(5)可得 $P_{c0}=1.8P_c-P_p=4.5$ MPa。由公式(13)计算可得 $\varepsilon=22.45\%$ 。

由于O形圈内径小于安装沟槽轴径,属于拉伸安装,因此O形圈的实际截面直径小于3.55 mm,由公式(8)和(9)可得 $d_2 \approx 3.506$ mm,则 $h_0=d_2\varepsilon \approx 0.787$ mm,安装沟槽外径 $D_2=D_1+2(d_2-h_0) \approx 61.438$ mm。确定安装沟槽 $\Phi 61_{+0.5}^{+0.4}$ mm。

综上所述,通过O形圈最大接触压力、IRHD硬度和压缩率之间的函数关系,根据O形圈的材料属性和应用工况便可计算出O形圈所需压缩量及安装沟槽尺寸,避免过度压缩。

3 结论

(1)通过有限元分析得到不同IRHD硬度和压缩率O形圈的最大接触压力,借助数学软件拟合得到O形圈最大接触压力、IRHD硬度和压缩率之间的函数关系式及等高线。

(2)本文仅以O形圈安装沟槽设计为例对O形圈最大接触压力、IRHD硬度和压缩率之间的函数关系的应用进行说明,但其应用并不限于此,借助该函数关系可以指导大部分O形圈相关的设计及评估。

参考文献:

- [1] 王丹,韩磊,陈加鑫,等.基于Abaqus的O形橡胶密封圈热应力分析[J].橡胶科技,2013,11(6):18-21.
- [2] 张翠彬.橡胶O型圈的材料选择分析[J].中国设备工程,2017(21):155-157.
- [3] 刘少春,杨晓翔.快开阀芯橡胶密封垫密封结构的有限元分析[J].橡胶科技,2015,13(2):13-17.
- [4] 郑明军,王文静,陈政南,等.橡胶Mooney-Rivlin模型力学性能常数的确定[J].橡胶工业,2003,50(8):462-465.
- [5] 陆婷婷,王维民.橡胶O形密封圈研究发展综述[J].液压气动与密封,2014,34(10):6-11.
- [6] 闫晶.浅析O形密封圈和密封圈槽的选配及应用[J].机电产品开发与创新,2017,30(4):45-46.

收稿日期:2018-08-24

Function Relation among Maximum Contact Pressure, IRHD Hardness and Compression Rate of Rubber O-ring

DENG Xiangbin, HUANG Le, XIANG Yu, WU Jianjun

(Guangzhou Mechanical Engineering Research Institute Co., Ltd, Guangzhou 510535, China)

Abstract: The two-dimensional axisymmetric model of rubber O-ring and groove was established by finite element software ANSYS. The maximum contact pressure of O-ring with different IRHD hardness and compression rate was calculated. The function relation and contour line among the maximum contact pressure, IRHD hardness and compression rate of O-ring were obtained by fitting with mathematical software. This function relation was suitable for most design and evaluation of O-ring.

Key words: rubber O-ring; IRHD hardness; compression rate; maximum contact pressure; finite element analysis; function relation