

表面缺陷对硅橡胶密封性能的影响规律研究

吴健¹,董吉义¹,Bipin Kumar Gond²,王友善¹,栗本龙¹,崔志博¹

[1. 哈尔滨工业大学(威海) 橡胶复合材料与结构研究所, 山东 威海 264209; 2. 印度理工学院坎普尔校区, 印度 坎普尔 208016]

摘要:采用有限元方法研究金属表面凸起缺陷对硅橡胶密封性能的影响规律。基于ABAQUS软件,建立密封接触过程有限元模型。重点分析表面凸起的高度、半径和位置对密封性能的影响。结果表明,表面凸起缺陷对密封性能影响显著;高度和位置对接触压力和接触面积影响较大,凸起的高度越大、距离接触压力的峰值位置越近时,越容易发生泄漏;而凸起半径对密封性能的影响相对较小。

关键词:密封;硅橡胶;有限元方法;表面凸起

中图分类号:O241.82;TQ333.93;TQ336.4⁺2 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-890X(2018)05-0000-05

硅橡胶密封件是保证设备正常运转的关键零件,以其优异的物理和化学性能在航空航天领域应用广泛。由于加工精度、复杂工作环境及装配工艺等的影响,在长期使用过程中密封界面容易出现表面缺陷。而密封件上任一微小的表面缺陷都极易导致泄漏,进而致使整条密封带失效,造成严重损失。因此,研究表面缺陷对密封性能的影响尤为重要。

近年来,国内外学者针对表面形貌对密封性能的影响做了较多研究。Y. Matsuzaki等^[1]基于硬质球与软质锥形密封面的接触建立密封面接触模型,并通过试验研究了不同粗糙表面泄漏量的变化规律。P. Wagner等^[2]基于功率谱密度分解理论建立了橡胶接触模型的多尺度有限元分析方法,从宏观和微观角度研究了橡胶在粗糙表面的接触特性。陈国定等^[3]利用有限元分析软件MARC/MENTAT 320针对不同粗糙峰形貌对密封性能的影响进行了研究,得出了静态接触下密封件陷入粗糙谷中的位移量随粗糙峰结构和波长尺寸的变化规律。王国志等^[4]利用ANSYS软件分析了水压O形圈在不同粗糙表面下密封表面接触间隙的变化规律,并采用FLUENT软件进行微流场仿

真,得到了O形圈的最小接触宽度。蔡艳等^[5]通过实际测量漏油和不漏油的油泵零件各个表面粗糙度参数,揭示了轮廓的支承长度率对密封性能的影响。但是,现有文献主要侧重于研究表面粗糙度对密封性能的影响,对于密封界面表面缺陷的研究也只集中在表面缺陷的检测上^[6-8],而针对表面缺陷对密封性能影响的研究却鲜有报道。T. J. Park等^[9]采用有限元分析软件MARC研究了涂层钢板与橡胶密封件间的球形磨粒对接触特性的影响,揭示了任何微小磨粒的存在都可以导致非常大的接触压力和Mises应力,并造成严重磨损。但该文献并未针对磨粒的大小、形状等因素进行详细讨论。张峰等^[10]针对含有表面缺陷的O形密封圈进行有限元分析,研究了错模、分模扯缩以及分模飞边等表面缺陷对密封性能的影响。不过,该文献所研究的表面缺陷并非出现在密封界面,因而其有限元分析的结果均满足密封条件,这对密封界面出现表面缺陷的情况并不适用。

本工作将在已有研究的基础上,采用有限元方法深入研究金属表面缺陷对硅橡胶密封性能的影响规律。首先,采用ABAQUS软件建立含表面凸起的密封面接触模型;然后,开展表面凸起对硅橡胶密封性能影响的研究,揭示表面凸起的高度(h)、半径(r)、位置(l)对接触压力和接触面积的影响规律,为密封件的设计和使用提供参考和依据。

作者简介:吴健(1984—),男,浙江义乌人,哈尔滨工业大学(威海)橡胶复合材料与结构研究所讲师,博士,主要从事橡胶及其复合材料设计及测试装备技术、有限元分析技术研究工作。

E-mail:wu1234jian5678@163.com

1 有限元建模

1.1 表面缺陷形貌的表征

在加工或使用过程中,金属表面容易产生表面凸起缺陷。表面凸起分为点状缺陷和带状缺陷,两种缺陷发生泄漏的原理相同,都是由于凸起周围产生较低的接触压力区域造成。因此,本研究将两种表面凸起缺陷都简化为不同高度和半径的球体来表示,如图1所示。考虑到表面缺陷的位置对密封性能的重要影响,本文采用凸起与密封件对称轴之间的距离来定义其位置,具体参数见表1。其中,高度和半径为零表示无缺陷的理想表面。

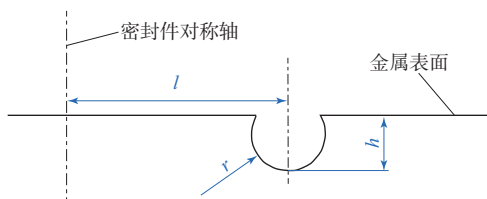


图1 表面缺陷的三维形貌

表1 表面凸起参数

项 目	h/mm					
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
r/mm	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
l/mm	0	2	4	6	8	10

1.2 橡胶材料的本构模型

本工作研究的密封材料为航空航天常用的硅橡胶密封材料。基于拉伸压缩试验数据,采用超弹性本构模型Ogden($N=3$)模型来描述其材料力学性能。Ogden应变能以3个主伸长率为变量,其应变能函数为^[11-13]:

$$W = \sum_n \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3)$$

式中, α_n 可取任意值, μ_n 为待定系数。

一般情况下,为表示3种常见的应变模式(单轴拉伸、单轴压缩以及纯剪切),常取 $N=3$,即 $n=1, 2, 3$,对应的单轴拉伸与压缩的应力应变关系如下:

$$\sigma = \sum_n \mu_n (\lambda^{\alpha_n-1} - \lambda^{\alpha_n/2-1}) \quad (n=1, 2, 3)$$

通过对硅橡胶密封材料进行单轴拉伸与压缩试验,将获得的数据输入ABAQUS软件中进行拟合,得到本构模型的各项系数。Ogden模型各项系

数的拟合结果为: $\alpha_1 = 2.82841, \mu_1 = -105.335, \alpha_2 = 3.71939, \mu_2 = 44.5371, \alpha_3 = 61.9295, \mu_3 = 1.92205$ 。

1.3 密封接触的有限元模型

含表面缺陷的密封接触有限元模型如图2所示。假设密封件表面光滑,忽略硅橡胶材料的表面粗糙度;不考虑金属的变形,将其简化为刚体。硅橡胶网格单元类型选取CPS4R。橡胶与金属之间的接触使用Penalty模型,摩擦因数取0.225。固定密封件,利用位移加载方式,使金属表面向下运动对密封件施加压缩载荷,最大压缩量设置为9 mm。

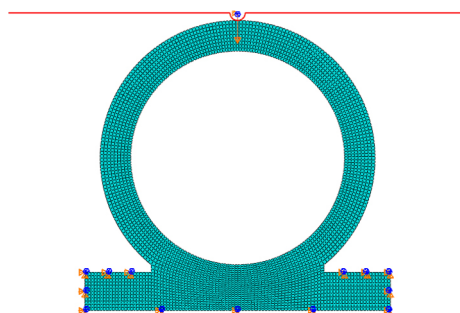
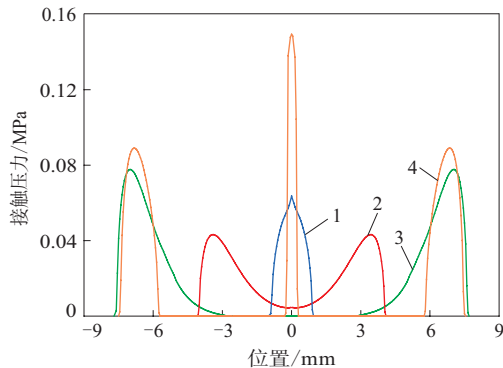


图2 含表面缺陷的密封接触有限元模型

2 结果与讨论

2.1 接触压力对密封性能的影响

图3示出了密封界面的接触压力分布。可以看出,对于理想的密封界面,随着压缩量的增大,最大接触压力的位置从中心向两侧过渡,呈对称分布,有助于实现双重密封的作用;而中心位置的



压缩量/mm: 1—2.0(无缺陷); 2—4.5(无缺陷); 3—9.0(无缺陷); 4—9.0(有凸起)。

图3 密封界面接触压力分布

接触压力为零。对于含表面缺陷的密封界面,最大接触压力出现在凸起位置,而凸起周围的接触压力均为零,密封界面两侧存在较大的接触压力区域。事实上,不论是点状凸起或者带状凸起,由于凸起周围接触压力为零,凸起所产生的最大接触压力并不能实现有效密封,密封介质仍可通过凸起周围的低接触压力区域发生泄漏。因此,密封界面两侧产生的接触压力区域为有效密封区域。本研究采用此区域的最大接触压力作为评价表面缺陷对密封性能影响的指标。

2.2 表面凸起对密封性能的影响

2.2.1 凸起高度

图4示出了表面凸起的高度对最大接触压力的影响规律。结果表明,对于理想密封界面,随压缩量的增大,最大接触压力并非单调增大,而是先增大后减小再增大。在压缩初始阶段,接触压力增长较快;随着压缩量的增大,由于接触面积增长较快,使得接触压力不断减小;在压缩量大于3 mm时,接触压力由一个峰值分解为两个对称的峰值(见图3),最大接触压力达到最低点;随后,接触压力不断增大。在密封件实际使用过程中,应尽量避免压缩过程中接触压力出现较大波动,以保证密封的稳定性。因此,密封件工作时的压缩量应大于3 mm,使接触压力处于单调上升的区间内。

另一方面,表面凸起的产生有助于改善接触压力不稳定的现象,使最大接触压力呈现单调上升的趋势。在压缩前期,凸起的高度越大,达到相同的接触压力所需要的压缩量越大,这是由于克服凸起的高度消耗了一部分压缩量;在压缩后期,

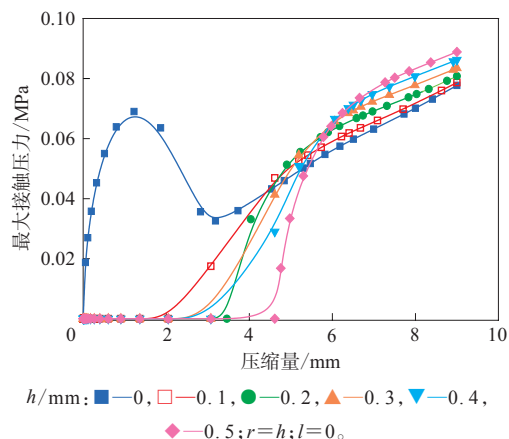


图4 凸起高度对最大接触压力的影响

当压缩量为9 mm时,随着凸起高度的增大,最大接触压力呈增大趋势,说明当凸起高度在较小范围时,有助于提高密封界面的接触压力。这是因为凸起的出现会减小接触面积,当凸起高度较小时,接触压力的变化主要受接触面积的影响。

图5示出了表面凸起高度对接触面积的影响规律。不难看出,对于理想密封界面,在压缩前期,接触面积随着压缩量的增大而增大,压缩量为6 mm时达到最大值;当压缩量大于6 mm时,密封界面中部出现间隙,接触面积开始减小。由图3也可以看出,当压缩量达到9 mm时,密封界面中部的接触压力为零,说明此区域并未真正接触。另一方面,表面缺陷对接触面积的影响较大。在压缩量为9 mm时,无缺陷的密封界面的接触面积是有缺陷的2倍左右;随着凸起高度的增大,接触面积逐渐减小。

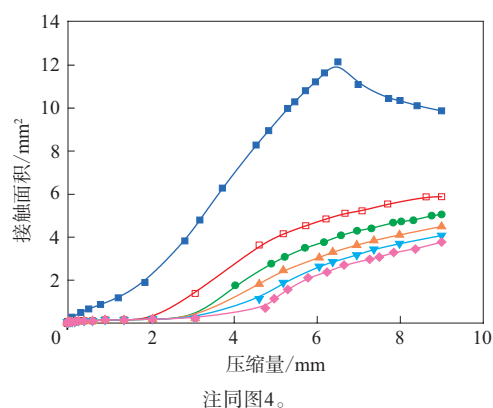


图5 凸起高度对接触面积的影响

2.2.2 凸起半径

图6示出了压缩量为9 mm时表面凸起半径对密封性能的影响规律。可以看出,当凸起缺陷存在时,最大接触压力增大了8%,接触面积却减小了55%,很难保证有效密封。另外,凸起的半径越大,最大接触压力越大,接触面积越小。但是,接触压力和接触面积的变化幅度均很小,因而凸起半径对密封性能几乎没有影响,可以忽略。

2.2.3 凸起位置

图7示出了表面凸起的位置对密封性能的影响规律,其中,原点为密封件对称轴所处位置。从图7可以看出,凸起出现的位置对密封性能的影响较大。当凸起靠近原点位置时,接触压力较大;随

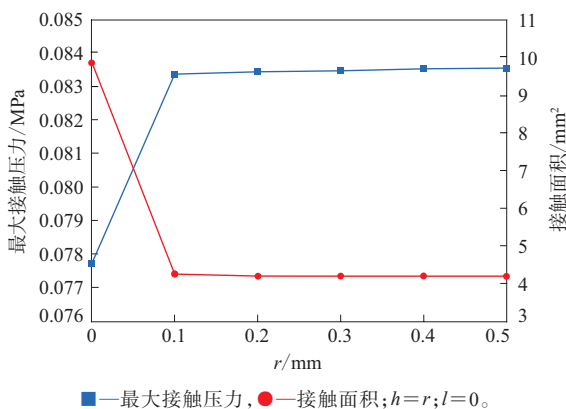


图6 凸起半径对密封性能的影响

着距离的增大,最大接触压力有增大趋势;当凸起出现的位置为8 mm左右时,最大接触压力急剧减小。由图3可知,理想密封界面的接触压力峰值出现在距离原点8 mm处左右。因此,当凸起位置距离接触压力峰值越近时,最大接触压力越小。另外,当凸起距离原点较近时(6 mm内),凸起的位置对接触面积的影响较小;当凸起超过接触压力峰值的位置时,接触面积急剧增大,但此时只能产生单侧的接触压力峰值,无法实现双重密封。

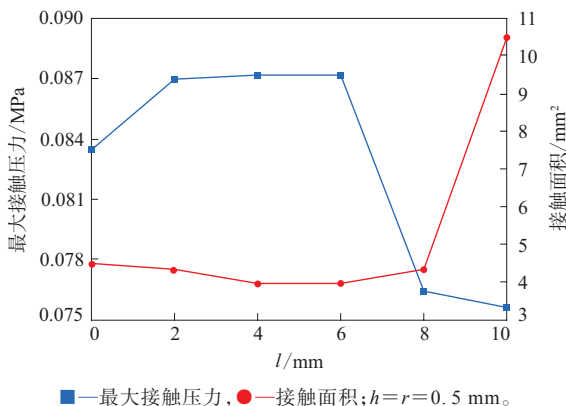


图7 凸起位置对密封性能的影响

3 结论

本研究基于ABAQUS软件,建立了含表面缺陷的密封接触模型,重点分析了表面凸起的高度、半径及位置对密封性能的影响规律,得到如下结论。

(1)在压缩过程中,理想密封界面的接触压力会出现波动,不利于密封;接触压力呈对称分布,最大接触压力出现在密封界面两侧。接触面积随

压缩量的增大呈现先增大后减小的趋势;在压缩后期,密封界面中部出现间隙。

(2)表面凸起缺陷对密封性能影响显著。密封界面的最大接触压力出现在凸起位置,但此接触压力并不能保证有效密封,凸起两侧产生的接触压力区域为有效密封区域。凸起缺陷的产生能消除接触压力的波动现象,在一定程度上有助于提高密封界面的接触压力,但会使接触面积急剧减小,导致泄漏。

(3)凸起的高度和位置对接触压力和接触面积影响较大,凸起高度越大、距离接触压力的峰值位置越近时,越易发生泄漏;而凸起半径对密封性能的影响相对较小。

参考文献:

- [1] Matsuzaki Y, Funabashi K, Hosokawa K. Effect of Surface Roughness on Contact Pressure of Static Seals: Effect of Tangential Force on Conical Inside-Seal Surface[J]. JSME International Journal. Series C, 1993, 36(1): 119-124.
- [2] Wagner P, Wriggers P, Klapproth C, et al. Multiscale FEM Approach for Hysteresis Friction of Rubber on Rough Surfaces[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2015, 296: 150-168.
- [3] 陈国定, Haiser H, Haas W, 等. 动力密封接触表面粗糙度效应的有限元分析——静态接触有限元模拟[J]. 西北工业大学学报, 2001, 19(1): 136-139.
- [4] 王国志, 刘恒龙, 刘晟昊, 等. 表面粗糙度对水压元件O形圈静密封性能的影响[J]. 润滑与密封, 2013, 38(5): 87-91.
- [5] 蔡艳, 汪哲能. 表面粗糙度参数对密封性能的影响分析[J]. 机械工业标准化与质量, 2009(6): 40-42.
- [6] 利新琴. 基于机器视觉的密封橡胶圈缺陷检测的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
- [7] 侯珂, 张璟. 橡胶密封件裂缝缺陷定位方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(27): 205-208.
- [8] 何博侠, 张毅, 童楷杰, 等. 航天密封圈的曲面成像理论及其缺陷检测[J]. 光学精密工程, 2015, 23(11): 3051-3060.
- [9] Park T J, Hwang Y G, Cho H D, et al. Contact Analysis of a Spherical Wear Particle between Elastomeric Seal and Coated Steel Surface[J]. Springer Berlin Heidelberg, 2009, 33(2): 718-719.
- [10] 张峰, 冀宏, 熊庆辉, 等. 表面粗糙度对多孔端面机械密封膜压的影响[J]. 液压气动与密封, 2015, 35(10): 14-19.
- [11] Beomkeun Kim, Seong Beom Lee, Jayone Lee, et al. A Comparison among Neo-Hookean Model, Mooney-Rivlin Model, and Ogden Model for Chloroprene Rubber[J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2012, 13(5): 759-764.
- [12] 韩国有, 董阳阳, 韩道权, 等. 螺杆泵定子橡胶力学试验及本构模

型研究[J]. 橡胶工业, 2017, 64(5): 295-299.

工业, 2017, 64(8): 462-465.

[13] 王若云, 贺建芸, 胡永康, 等. 轮胎胶料超弹性参数研究[J]. 橡胶

收稿日期: 2016-08-18

Effect of Surface Defects on Sealing Performance of Silicone Rubber

WU Jian¹, DONG Jiyi¹, Bipin Kumar Gond², WANG Youshan¹, SU Benlong¹, CUI Zhibo¹

(1. Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China; 2. Indian Institutes of Technology at Kanpur 208016, India)

Abstract: Finite element analysis method was used to study the effect of metal surface bulges on sealing performance of silicone rubber. The finite element model for seal contact was established, and the influence of the height, radius and the position of the convex surface on the sealing performance was analyzed by using ABAQUS. The results showed that the height and position of the surface convex had great influence on the sealing performance. The higher the height, more close to the maximum effective contact pressure, the more prone to leakage. However, the influence of convex radius on the sealing performance was relatively smaller.

Key words: seal; silicone rubber; finite element method; surface bulge