

固体火箭发动机硅橡胶密封圈贮存寿命分析

杨喜军^{1,2} 王 谨¹ 程 慧¹ 张 涛¹ 朱 涛¹

(1 西安航天动力技术研究所,燃烧、流动和热结构国家级重点实验室,西安 710025)

(2 西北工业大学航天学院,西安 710072)

文 摘 利用某硅橡胶密封圈加速老化性能数据,采用逐次逼近以及数据拟合方法,推导出幂指数老化模型参数,获得该硅橡胶老化反应速率以及老化性能规律,该硅橡胶材料 100℃ 下老化约 30 d 相当于常温 (25℃) 下贮存 15 a;开展了压缩永久变形状态下密封圈应力分析,获得密封圈老化后应力分布,密封圈有压缩永久变形时最大接触应力小于无压缩永久变形时,30% 压缩量、30% 压缩永久变形率时最大接触应力水平与 25% 压缩量、无压缩永久变形时基本一致;建立不同老化状态与应力状态相关性,以 30% 压缩永久变形率为老化指标,该硅橡胶密封圈的贮存寿命约为 12.4 a。

关键词 固体火箭发动机,硅橡胶,密封圈,贮存寿命

Storage Life of Silicone Rubber Sealing Ring Used in Solid Rocket Motor

Yang Xijun^{1,2} Wang Jin¹ Cheng Hui¹ Zhang Tao¹ Zhu Tao¹

(1 Institute of Aerospace Solid Propulsion Technology, National Key Laboratory of Combustion, Flow and Thermo-structure, Xi'an 710025)

(2 College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract Based on the ageing behavioral data of a certain silicone rubber sealing ring used in solid rocket motor, the power-exponent ageing model parameters and the regularity of ageing behaviour have been received using approximation and fit methods. The result of these tests reveals that storage of such type of silicone rubber for one month at the temperature of 100℃ equals to 15 years storage at 25℃. Simultaneously, numerical calculations about stress distribution at the state of permanent compression deformation have been processed, and the state of stress distribution of silicone rubber sealing ring after ageing is obtained, according to which the view that the maximum stress of permanent deformation with compression is smaller than that without compression is put forward. At the end of this paper, relativity of stress distribution and permanent deformation is established. Taking thirty percent permanent compression deformation as a rule, the storage life of silicone rubber sealing ring is about 12.4 years.

Key words SRM, Silicone rubber, Rubber ring, Storage life

0 引言

固体火箭发动机的密封结构广泛采用 O 形硅橡胶密封圈,由于硅橡胶材料自身分子结构上的弱点,在贮存和使用过程中性能退化,从而影响产品的使用寿命。密封圈使用过程中均处于应力状态,由于应力分布不均匀,在经受变形疲劳过程中,应力就会严重破坏橡胶的分子结构,导致橡胶老化。固体发动机中硅橡胶密封圈在压应力作用下的热氧老化过程就决定了其贮存寿命。

通过热空气加速老化可以有效加速硅橡胶材料交联、降解等化学变化,形成橡胶材料加速老化试验方法及其寿命预测方法^[1-5]。而硅橡胶密封圈老化后密封性能的下降主要是由于应力状态的变化造成,密封圈应力状态影响密封结构密封性及可靠性,以此

建立了接触应力与剪切应力失效模式与失效判据^[6-7]。密封圈的应力分析^[8-9]大多采用 Mooney-Rivlin 模型,利用硅橡胶单轴拉伸性能得到 Mooney-Rivlin 模型参数,获得密封圈内应力分布状态。

一般密封结构应力分析只考虑初始压缩状态,并未考虑密封圈老化变形的影响,同时硅橡胶密封圈材料老化模型参数缺乏,密封圈老化后变形状态与应力状态无法关联,从而难以准确评估硅橡胶密封圈贮存寿命。

本文根据固体发动机硅橡胶密封圈使用特性以及某硅橡胶密封圈材料加速老化试验数据,以压缩永久变形率为性能表征参数,采用逐次逼近以及数据拟合方法,推导硅橡胶幂指数老化模型参数,获得硅橡胶老化反应速率以及老化性能随贮存时间的变化规律。针对密封圈长期压缩贮存后状态,探索性开展压

缩永久变形状态下密封圈应力分析,获得密封圈老化后应力分布,建立老化状态与应力状态相关性。综合密封圈材料老化性能规律以及应力分布状态,判定密封性能,提出该硅橡胶密封圈的贮存寿命。

1 硅橡胶老化性能分析

1.1 硅橡胶老化数据

利用硅橡胶试件开展高温加速老化试验,试验温度为 100、110、120、130、140℃,试件经过老化后呈微鼓形态,产生了一定的永久变形。五种不同温度下的压缩老化性能(1-压缩永久变形率 η) 随老化时间的变化曲线见图 1,随着贮存时间的增加,压缩永久变形率增大,且老化温度越高,压缩永久变形率增幅越大,符合材料老化性能变化规律。由于试件本体性能以及测试误差造成部分测试数据有偏差,但数据整体规律性较好,确保了数据分析的准确性。

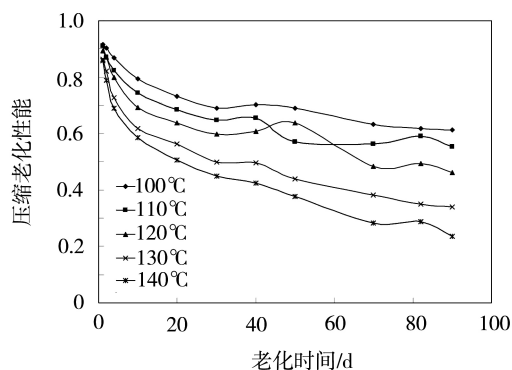


图 1 硅橡胶压缩老化性能曲线

Fig. 1 Ageing behaviour curve of silicone rubber in compression

1.2 硅橡胶老化模型

根据硅橡胶老化趋势,选取幂指数老化模型

$$f(P) = B \exp(-Kt^\alpha) \quad (1)$$

式中,老化性能表征 $f(P)$ 代表各时间节点上的压缩老化性能。 B 和 α 为老化模型参数,老化反应速率 K 与热力学温度符合 Arrhenius 公式

$$K = Z \exp(-E/RT) \quad (2)$$

根据硅橡胶老化测试数据,对模型参数进行拟合,推导各温度条件下的 K 以及 B 和 α ,进而确定常温老化模型,即得到常温下贮存老化性能规律。

1.3 老化数据分析

首先通过逐次逼近法确定参数 α ,即通过逐次尝试不同 α 取值,使总偏差 I 达到最小。

$$I = \sum_i^p \sum_j^n (f_{ij} - \hat{f}_{ij})^2 \quad (3)$$

通过数据处理,按逼近准则得到模型参数 $\alpha = 0.4$ 。

(1)式变换得到

$$\ln f = \ln B - Kt^\alpha \quad (4)$$

各温度下 $\ln f$ 随 t^α 的变化曲线见图 2。

通过数据拟合方法得到各温度下的 K 、 B ,见表 1。通过各温度下 K 值,作出 $\ln K$ 随 $1/T$ 的变化曲线,见图 4

3,可以看出线性相关性较好,符合 Arrhenius 老化规律。

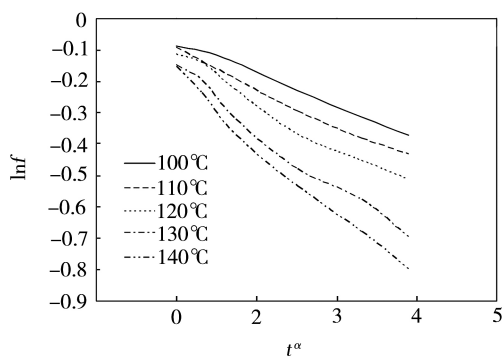


图 2 $\ln f$ 与 t^α 曲线

Fig. 2 The $\ln f-t^\alpha$ curves

表 1 硅橡胶老化模型参数

Tab. 1 Ageing model parameter of silicone rubber

老化温度/℃	K	B
100	0.10	1.03
110	0.12	1.02
120	0.14	1.03
130	0.19	1.03
140	0.22	1.04

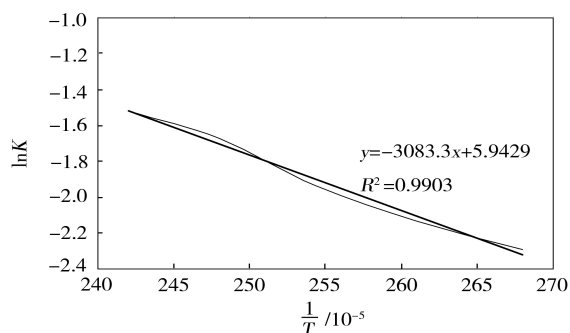


图 3 $\ln K$ 与 $1/T$ 曲线

Fig. 3 The $\ln K-1/T$ curves

拟合曲线方程为

$$\ln K = 5.943 - 3083.3 \frac{1}{T} \quad (5)$$

进而得到老化反应速率 K 的 Arrhenius 模型

$$K = 381 \exp(-3083.3/T) \quad (6)$$

老化反应速率 $K-T$ 曲线见图 4。

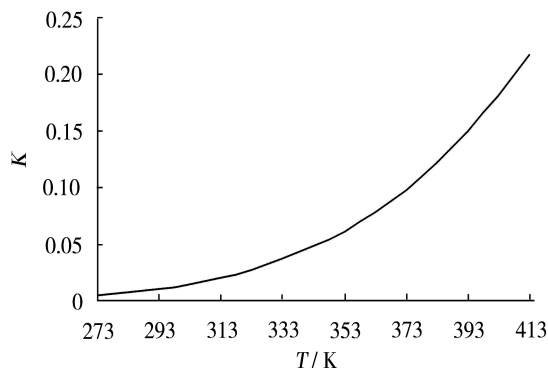


图 4 硅橡胶 $K-T$ 曲线

Fig. 4 The $K-T$ curve of silicone rubber

根据(6)式可以获得常温下的老化反应速率 $K = 0.0123$, 试验常数 B 取近似值为 1, 从而得到硅橡胶常温下的老化性能模型为

$$f(P) = \exp(-0.0123t^{0.4}) \quad (7)$$

该硅橡胶常温下的老化性能曲线见图 5。

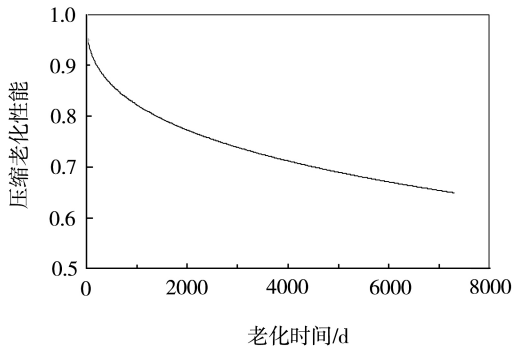


图 5 硅橡胶常温下压缩老化性能曲线

Fig. 5 Ageing behaviour curve of silicone rubber in compression at normal temperature

1.4 老化等效关系

对比常温与高温老化性能曲线, 可以得到常温与各加速老化温度等效关系, 见表 2。可以看出, 该硅橡胶材料 100°C 下老化约 30 d, 相当于常温下贮存 15 a。

表 2 硅橡胶老化等效关系

Tab. 2 Ageing equivalent relation of silicone rubber

老化温度/ $^\circ\text{C}$	老化时间/d		
25	10 a	15 a	20 a
100	18.8	28.1	37.5
110	12.7	19.0	25.3
120	7.7	11.6	15.4
130	4.0	6.0	8.0
140	2.7	4.1	5.4

2 密封圈应力分析

2.1 应力计算模型

O 形硅橡胶密封圈在长期压缩状态下, 产生压缩永久变形, 将减小密封结构的实际有效压缩量, 降低密封结构可靠性。通过密封圈压缩永久变形时的应力状态

分析, 掌握压缩变形后密封圈应力分布情况。

利用有限元软件进行密封结构的模拟计算。针对硅橡胶材料非线性、密封圈大变形带来几何非线性以及密封结构非线性接触边界条件, 计算模型简化采用轴对称结构计算模型。密封圈截面直径 $\Phi 4 \text{ mm}$, 初始压缩量 30%。压缩永久变形状态模型的建立采用预设密封圈截面形状的方式。

密封圈采用二阶四参数 Mooney-Rivlin 超弹性本构模型。材料应变能函数

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) \quad (8)$$

式中, C_{10} 、 C_{01} 、 C_{20} 、 C_{11} 选取依据硅橡胶单轴拉伸拟合数据。

2.2 应力计算结果分析

密封圈压缩永久变形率为 30% 时, 装配状态(无内压)下计算结果如图 6 所示。密封圈压缩变形后, 接触面的形状发生变化, 导致接触应力分布规律与无压缩永久变形时不同。无压缩永久变形的密封圈接触应力分布为从中间向两侧逐渐减小, 而有压缩永久变形的密封圈接触应力从中间向两侧先增大后减小。此外, 由于压缩永久变形使密封圈实际压缩量小于设计压缩量, 有压缩永久变形的密封圈最大接触应力、最大等效应力和最大剪切应力均小于无压缩永久变形的密封圈。

发动机承受 15 MPa 工作内压时, 计算结果见图 7。虽然装配状态下有无压缩永久变形的密封圈应力分布规律不同, 但在工作内压作用下其分布规律基本一致。接触应力沿各个接触面基本相同, 密封圈等效应力最大点出现在密封槽顶圆角处。同样, 有压缩永久变形的密封圈最大接触应力、最大等效应力和最大剪切应力均小于无压缩永久变形的密封圈。当密封圈设计压缩量为 30%, 有 30% 压缩永久变形率时计算得到的最大接触应力水平与没有压缩永久变形时 25% 的设计压缩量基本一致。

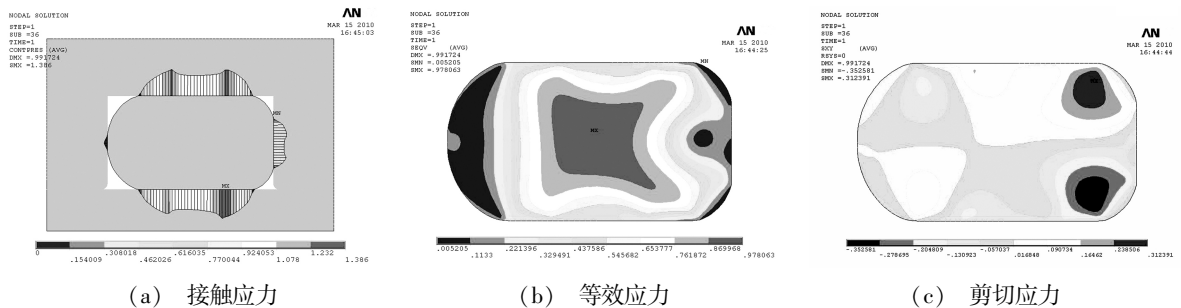


图 6 密封圈装配状态下的应力

Fig. 6 Stress distribution of sealing ring in the condition of assembly

计算结果表明, 有 30% 压缩永久变形率的密封圈在工作状态下接触应力仍大于工作内压, 等效应力和剪切

应力小于强度极限(7 MPa), 密封圈可以满足密封要求。如果压缩永久变形率过大, 长期贮存后密封圈材料性能

会降低,密封结构可能失效。

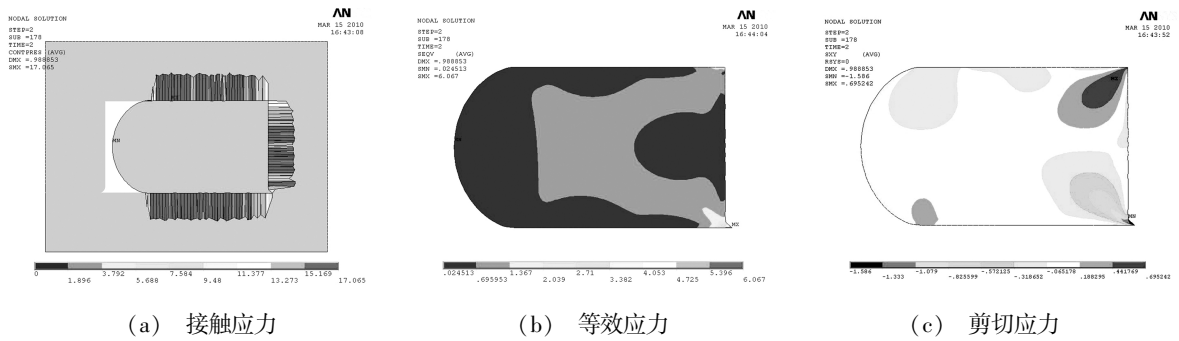


图7 密封圈内压作用下的应力

Fig.7 Stress distribution of sealing ring in the condition of internal press

2.3 老化状态与应力状态相关性

通过分别计算不同压缩永久变形率状态下密封圈应力,可建立老化状态与应力状态相关性。

压缩永久变形率 η 与最大接触应力 σ (15 MPa 内压下) 近似对应关系见图 8。

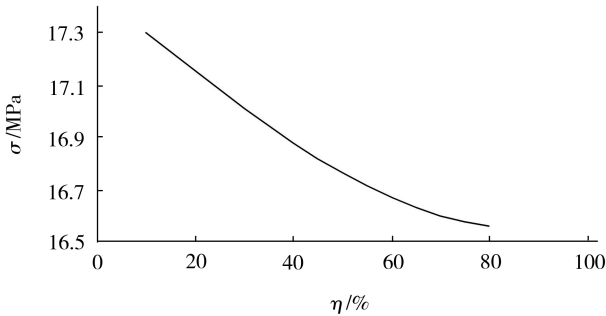


图8 η 与 σ 对应关系

Fig. 8 Relation between η and σ

根据该对应关系,压缩永久变形率为 30% 时,密封圈最大接触应力约为 17 MPa,密封裕度 2 MPa,该状态与一般初始压缩量设计下偏差 25% 应力水平基本一致,作为密封容限。

3 密封圈贮存寿命分析

通过硅橡胶密封圈材料老化性能分析掌握了材料性能退化规律,即压缩永久变形随贮存时间的关系,通过理论模拟计算,建立压缩永久变形与应力分布的相关性,从而通过压缩永久变形将密封应力状态与贮存时间关联。

老化模型变换得到

$$\tau = \exp \left[\frac{1}{\alpha} \left(\ln \ln \frac{B}{1 - [\eta]} - \ln K \right) \right] \quad (9)$$

$[\eta]$ 选取 30% 压缩永久变形率为老化指标,代入相关模型参数,推出硅橡胶密封圈的贮存寿命 τ 为 12.4 a。

a。

4 结论

(1) 对于硅橡胶密封圈,随着贮存时间的增加,压缩永久变形率增大,且温度越高,压缩永久变形率增幅越大。

(2) 该硅橡胶材料 100°C 下老化约 30 d,相当于常温下贮存 15 a。

(3) 硅橡胶密封圈有压缩永久变形时最大接触应力、等效应力小于无压缩永久变形时;30% 压缩量、30% 压缩永久变形率时最大接触应力水平与 25% 压缩量、无压缩永久变形时基本一致。

(4) 以 30% 压缩永久变形率为老化指标,该硅橡胶密封圈的贮存寿命约为 12.4 a。

参考文献

- [1] 张凯,黄渝鸿,马艳,等. 橡胶材料加速老化试验及其寿命预测方法[J]. 化学推进剂与高分子材料,2002,2(6):44-48
- [2] 肖鑫,赵云峰,许文,等. 橡胶材料加速老化实验及寿命评估模型的研究进展[J]. 宇航材料工艺,2007,37(1):6
- [3] 荣先成. 固体火箭发动机用橡胶制品加速老化试验研究[J]. 推进技术,1992(1):90
- [4] 李咏今. 橡胶热老化定量和定性评定方法研究的进展[J]. 特种橡胶制品,1996,17(6):40-46
- [5] Hu H. The equivalence of moisture and temperature in physical aging of polymeric composite[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2003,76(4):785
- [6] 常新龙,艾春安. 法兰连接密封结构的贮存可靠性分析[J]. 固体火箭技术,1999,22(3):20-23
- [7] 任全彬,蔡体敏,王荣桥,等. 橡胶 O 形密封圈结构参数和失效准则研究[J]. 固体火箭技术,2006,29(1):9-14
- [8] 任全彬,蔡体敏,安春利,等. 硅橡胶 O 形密封圈 Mooney-Rivlin 模型常数的确定[J]. 固体火箭技术,2006,29(2):130-134
- [9] 胡殿印,王荣桥,等. 橡胶 O 型圈密封结构的有限元分析[J]. 北京航空航天大学学报,2005,31(2):255-260

(编辑 李洪泉)