

## 航空航天装备

## G105 硅橡胶老化性能试验研究

戴超<sup>1</sup>, 郑健<sup>1\*</sup>, 许进升<sup>1</sup>, 黄薇<sup>1</sup>, 贺宏博<sup>2</sup>

(1.南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2.内蒙动力机械研究所, 呼和浩特 010000)

**摘要:** **目的** 建立橡胶老化特性指标与老化时间的动力学方程, 对不同预压缩量下硅橡胶密封组件的贮存寿命进行预估, 探究不同预压缩量和温度对硅橡胶密封组件老化性能的影响。**方法** 以不同预压缩量和温度为变量, 选取压缩永久变形为老化指标, 对硅橡胶试样进行热氧老化试验。依据试验数据, 建立老化反应速率常数与温度的回归方程, 研究不同温度和不同预压缩量对橡胶老化反应速率的影响, 建立压缩永久变形和老化时间的动力学方程, 对不同预压缩量下的橡胶贮存寿命进行预估。**结果** 建立了硅橡胶贮存寿命预测的老化动力学方程, 对硅橡胶在不同预压缩量下的贮存寿命进行了预估。预压缩量由 12% 增加到 45% 时, 硅橡胶密封组件贮存寿命由 24.8 a 下降到 14.2 a。**结论** 预压缩量对橡胶老化性能具有显著影响作用, 在实际使用时应选择合理的预压缩量。

**关键词:** 固体火箭发动机; 硅橡胶; 热氧老化; 预压缩量; 寿命预估

中图分类号: TQ330.7

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)10-0046-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.10.006

## Experimental Study on Aging Performance of G105 Silicone Rubber

DAI Chao<sup>1</sup>, ZHENG Jian<sup>1\*</sup>, XU Jinsheng<sup>1</sup>, HUANG Wei<sup>1</sup>, HE Hongbo<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Inner Mongolia Institute of Mechanical Power, Hohhot 010000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to establish a regression equation between aging characteristic index and aging time of rubber to predict the storage life of silicone rubber sealing components under different pre-compression amounts and investigate the effects of different pre-compression amounts and temperatures on the aging performance of silicone rubber sealing components. With different pre-compression amounts and temperatures as variables, and permanent compression deformation as the aging characteristic index, the thermal oxygen aging test was carried out to silicone rubber specimens. According to the test data, a regression equation between aging reaction rate and temperature was established. The effect of different temperatures and pre-compression amounts on the aging reaction rate of the rubber was studied. The aging kinetics equations of permanent compression deformation and aging time were established, and the storage life of rubber under different test temperatures and pre-compression amounts was estimated. The aging dynamic equation for predicting the storage life of silicone rubber was established, and the storage life of silicone rubber under different pre-compression amounts was predicted. The pre-compression

收稿日期: 2024-05-11; 修订日期: 2024-07-09

Received: 2024-05-11; Revised: 2024-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(52105107); 北强基金(BQJJ202308)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (52105107); Beiqiang Funding (BQJJ202308)

引文格式: 戴超, 郑健, 许进升, 等. G105 硅橡胶老化性能试验研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(10): 46-52.

DAI Chao, ZHENG Jian, XU Jinsheng, et al. Experimental Study on Aging Performance of Silicone Rubber[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(10): 46-52.

\*通信作者 (Corresponding author)

amount increased from 12% to 45%, and the storage life of silicone rubber sealing components decreased from 24.8 a to 14.2 a. The pre-compression amount has a significant impact on the aging performance of rubber. Therefore, a reasonable amount of pre-compression should be selected in practical use.

**KEY WORDS:** solid rocket motor; silicone rubber; thermal oxygen aging; pre-compression amount; life prediction

橡胶产品因其良好的密封性能、回弹性能、耐磨性能等, 被广泛地应用于航空航天、汽车制造、土木工程等领域。随着材料科学发展, 橡胶产品的种类和品质有了越来越大的进步, 探究橡胶的老化机理, 准确地预估橡胶产品寿命成了关键的问题<sup>[1]</sup>。固体火箭发动机喷管硅橡胶密封组件需要在预压缩状态经历长期贮存, 工作时暴露在数千度的高温环境下, 对其抗老化性能要求较高, 因此探究其老化机理及贮存寿命, 是研究固体发动机可靠性的关键问题。

目前, 基于阿伦尼乌兹理论的热空气加速老化法是研究橡胶制品老化寿命的主要手段<sup>[2]</sup>。肖坤等<sup>[3]</sup>以压缩永久变形为老化指标, 对密封圈在一定压缩量下的贮存寿命进行了预估。周城等<sup>[4]</sup>对辐照后三元乙丙橡胶进行了热氧老化, 并对其寿命进行了预估。柳荣等<sup>[5]</sup>研究了民用飞机硅橡胶拉伸强度、撕裂强度、压缩永久变形随老化时间和温度的变化规律, 并对其寿命进行了预估。Zhang 等<sup>[6]</sup>以拉伸强度和断裂伸长率作为老化指标, 对丁苯橡胶进行了海水加速老化试验, 使用数学模型法和时温叠加法预测了橡胶的老化寿命。为了获得不同老化温度及老化时间对硅橡胶力学性能的影响规律, Zheng 等<sup>[7]</sup>对硅橡胶进行了加速老化, 并以拉伸强度和断裂伸长率为指标, 预测了硅橡胶的使用寿命。李秀杰等<sup>[8]</sup>对航天用丁腈橡胶进行了湿热老化, 并对其贮存寿命进行了预估。原有的阿伦尼乌兹方程仅在一定温度范围内适用, 它假设活化能是一个不随温度变化的常数, 但实际中环境温度变化会引起活化能的变化, 从而产生误差<sup>[9]</sup>。针对阿伦尼乌兹方程的非线性, 刘巧斌等<sup>[10]</sup>引入幂指数  $n$ , 提出了一种改进的阿伦尼乌兹公式, 并进行了步进应力试验。易军等<sup>[11]</sup>采用修正的阿伦尼乌兹公式, 对天然橡胶和三元乙丙橡胶的贮存寿命进行了预估。

然而, 橡胶在实际工作中不仅受到温度这一单一因素的加速老化, 还受到机械应力的影响<sup>[12-13]</sup>。国内外学者为探究温度和机械应力共同作用下橡胶的老化行为, 设计并开展了相应的老化试验。钱艺华等<sup>[14]</sup>设计了丁腈橡胶热油压缩工况下的老化试验, 对老化后的橡胶性能进行了分析。魏驰原等<sup>[15]</sup>对密封用发泡硅橡胶进行了压缩热氧老化试验, 对老化后的硅橡胶进行了老化机理分析和寿命预估。Liu 等<sup>[16]</sup>对三元乙丙橡胶进行了不同预压缩应变、温度、老化时间的老化试验, 并根据橡胶材料性能退化规律, 建立了盾构隧道管片挤压环境下三元乙丙橡胶的本构模型。但目前为止, 大多橡胶热-力复合老化多停留在定性分析

的角度上<sup>[17-18]</sup>, 或者是提出了橡胶复合老化反应速率模型, 但未对不同预压缩量橡胶老化寿命做出具体分析<sup>[19-20]</sup>。

为此, 本文以不同预压缩量下测得的压缩永久变形率为依据, 利用阿伦尼乌兹方程及密封装置试样性能退化与时间的关系, 建立该密封圈试样的老化动力学方程, 预估该密封装置在不同预压缩量下的贮存寿命并进行老化机理分析。

## 1 试样制备及试验设计

橡胶试样选取 G105 橡胶为研究对象, 材料试件由西北橡胶塑料研究设计院有限公司提供。试样为直径 $(10\pm 0.2)$ mm、高度 $(10\pm 0.2)$  mm 的圆柱(如图 1 所示), 采用轴向压缩的试验方法。



图 1 硅橡胶试样

Fig.1 Silicone rubber specimen

根据实际需求, 选取 4 种不同的预压缩量: 0.12、0.23、0.34、0.45, 根据 HG/T 3087—2001, 选取 4 种老化温度: 363、383、403、423 K, 试验时间选择为 1、4、9、37、57、84、92 d。

选取压缩永久变形为老化特性指标, 其测量按照 GB/T 7759.1—2015 进行, 以  $\varepsilon$  表示压缩永久变形率, 其计算公式为:

$$\varepsilon = \frac{H_0 - H}{H_0 - H_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $H_0$  为试件变形前高度;  $H$  为试件变形后高度;  $H_1$  为限制器高度。

采用电子游标卡尺测定初始高度, 将试件放入夹具内, 以不同预压缩量压缩 1 d, 从夹具中取出放置 1 d 后, 测量其高度, 精确到 0.01 mm。在每个时间点, 从每个温度的保温箱中取出预压缩量分别为 0.12、0.23、0.34、0.45 的 4 套夹具及试样。等待夹具冷却至室温, 从夹具中取出试样, 放置 1 d 后测量其高度, 精确到 0.01 mm。

## 2 老化模型及参数预估

老化模型选取为指数模型,老化特性指标  $y$  与老化时间  $\tau$  之间的关系可用式(1)描述:

$$y = Be^{-K\tau^\alpha} \quad (2)$$

式中:  $y$  为 1 减任意老化时间  $\tau$  时的压缩永久变形率  $\varepsilon$ ;  $B$  为试验常数;  $K$  为速度常数;  $\tau$  为老化时间;  $\alpha$  为经验常数。

速度常数  $K$  与老化温度  $T$  之间符合阿伦尼乌兹公式:

$$K(T) = Ae^{-E/RT} \quad (3)$$

式中:  $E$  为表观活化能, J/mol;  $R$  为气体常数, J/(K·mol);  $T$  为老化温度, K;  $A$  为频率因子,  $d^{-1}$ 。

在  $\alpha$  为某一参考值时,对老化模型进行对数化处理,可得到如下直线形式:

$$Y = a + bX \quad (4)$$

式中:  $Y = \ln y$ ;  $a = \ln B$ ;  $b = -K$ ;  $X = \tau^\alpha$ 。

根据老化试验结果,使用最小二乘法可推断出  $p$  个温度下的模型试验常数  $B$  和速度常数  $K$ ,则式(1)中的未知参数  $B$  的估计值为:

$$\hat{B} = \frac{\sum B_i}{p} \quad (5)$$

利用同样的办法,将阿伦尼乌兹公式进行对数化处理,得到其直线形式为  $W = C + DZ$ ,利用最小二乘法拟合得到阿伦尼乌兹公式的频率因子  $A$  和表观活化能  $E$ 。参数  $\alpha$  的选取原则为使得式(6)中的  $I$  最小。

$$I = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \hat{y}_{ij})^2 \quad (6)$$

式中:  $y_{ij}$  为第  $i$  个老化温度下,第  $j$  个测试点特性指标的试验值;  $\hat{y}_{ij}$  为第  $i$  个老化温度下,第  $j$  个测试点特性指标的预估值。本文选择遗传算法作为随机搜索算法,在区间(0,1)内寻找  $\alpha$  的最适值。

## 3 结果分析

### 3.1 预压缩量对反应速率的影响

基于橡胶试样热氧老化实验数据,利用随机搜索对不同预压缩量  $S$  下的  $\alpha$  进行评估,每进行 1 次迭代,都会得出 1 组  $\alpha$  与老化模型和加速方程未知参数,不断进行优化,得到一个最优  $\alpha$  使得  $I$  最小,得出的结果见表 1。

表 1 老化参数预估结果

Tab.1 Estimated results of aging parameters

$S$	$\alpha$	$B$	$A$	$-E/R$
0.12	0.516 0	1.067 1	860.23	-3 497.6
0.23	0.505 6	1.064 9	465.12	-3 245.7
0.34	0.452 7	1.043 2	406.87	-3 069.3
0.45	0.429 6	1.177 0	516.93	-3 003.2

由表 1 可知,老化模型中的参数  $\alpha$  随预压缩量的增加而减小,阿伦尼乌兹方程中的频率因子  $A$  随预压缩量的增加而呈现出先减小、后增加的趋势,反应的表观活化能随预压缩量的增加而减小。 $Y = \ln y$  与  $X = \tau^\alpha$  呈线性关系,直线斜率的绝对值代表了反应速率  $K$ ,直线的截距代表了试验常数  $B$  的对数值。由于  $\tau^\alpha$  为 0 时,对应未老化状态,  $\ln y$  的值约等于 0,因此  $Y = a + bX$  应是一条过原点的直线,所以试验常数  $B$  应在 1 左右。

预压缩量为 0.12、0.23、0.34、0.45 时,  $\ln y$  随  $\tau^\alpha$  变化的曲线如图 2 所示。由图 2 可知,随着老化温度的增加,直线斜率的绝对值也增加,符合反应速率随温度的增加而增加的规律。

$W = \ln K$  与  $Z = 1/T$  所构成的曲线,其斜率代表了不同压缩量下的反应表观活化能  $-E/R$ ,其截距代表了阿伦尼乌兹公式的频率因子  $A$ ,因此有必要对  $\ln K$  与  $1/T$  所构成的曲线进行分析。将得到的参数代入式(2),即可得到不同预压缩量  $S$  (0.12、0.23、0.34、0.45) 下的反应速率与反应温度关系方程:

$$\ln K_{0.12} = 6.757 2 - 3 497.6/T \quad (7)$$

$$\ln K_{0.23} = 6.232 5 - 3 245.7/T \quad (8)$$

$$\ln K_{0.34} = 6.418 2 - 3 069.3/T \quad (9)$$

$$\ln K_{0.45} = 6.247 9 - 3 003.2/T \quad (10)$$

利用式(11)对方程  $W = C + DZ$  的相关性进行检验。

$$r = \frac{\sum WZ - \frac{\sum W - \sum Z}{p}}{\sqrt{\left[ \sum W^2 - \frac{(\sum W)^2}{p} \right] \left[ \sum Z^2 - \frac{(\sum Z)^2}{p} \right]}} \quad (11)$$

由式(11)计算得出  $S$  为 0.12、0.23、0.34、0.45 时,  $r$  分别为 -0.967、-0.971、-0.980、-0.963,方程  $W = C + DZ$  的相关性计算值  $r$  的数值均大于 0.96,证明数据拟合相关性良好。

不同预压缩量下,反应速率常数与温度的关系如图 3 所示。由图 3 可知,当预压缩量由 0.12 增加到 0.45 时,  $\ln K$  与  $1/T$  所构成曲线斜率绝对值分别为 3 497.6、3 245.7、3 069.3、3 003.2,表明随着预压缩量的增加,表观活化能不断减小,反应所需能量减小,反应速率加快。

### 3.2 硅橡胶密封装置贮存寿命预估

#### 3.2.1 温度与硅橡胶密封装置寿命关系

热氧老化是一种自由基链式自催化氧化反应<sup>[21]</sup>。硅橡胶寿命降低的主要原因是其不饱和双键与氧气等发生化学反应,导致其分子链的断裂和交联,分子结构被破坏,宏观性能如压缩永久变形率、断裂伸长率等降低。活化分子是具有发生化学反应所需的最低能量状态的分子。在化学反应中,并非所有分子的碰

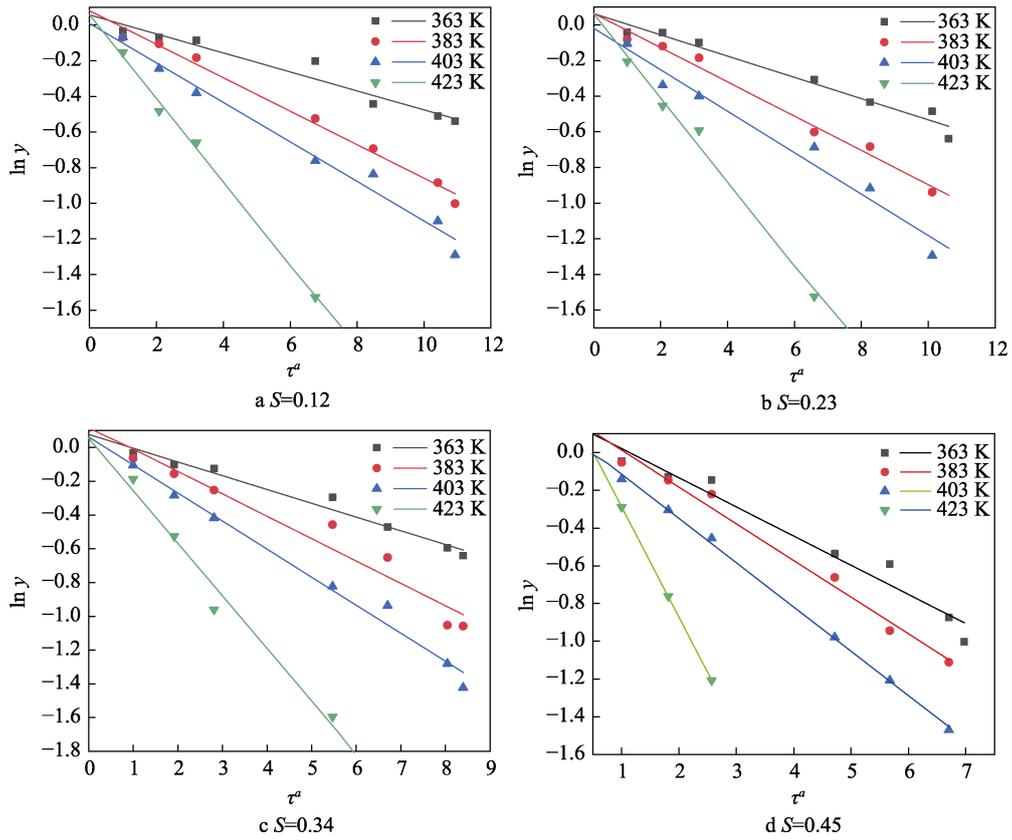


图 2 不同预压缩量下性能保持率与时间的关系

Fig.2 Relationship between performance retention and time under different pre-compression amounts

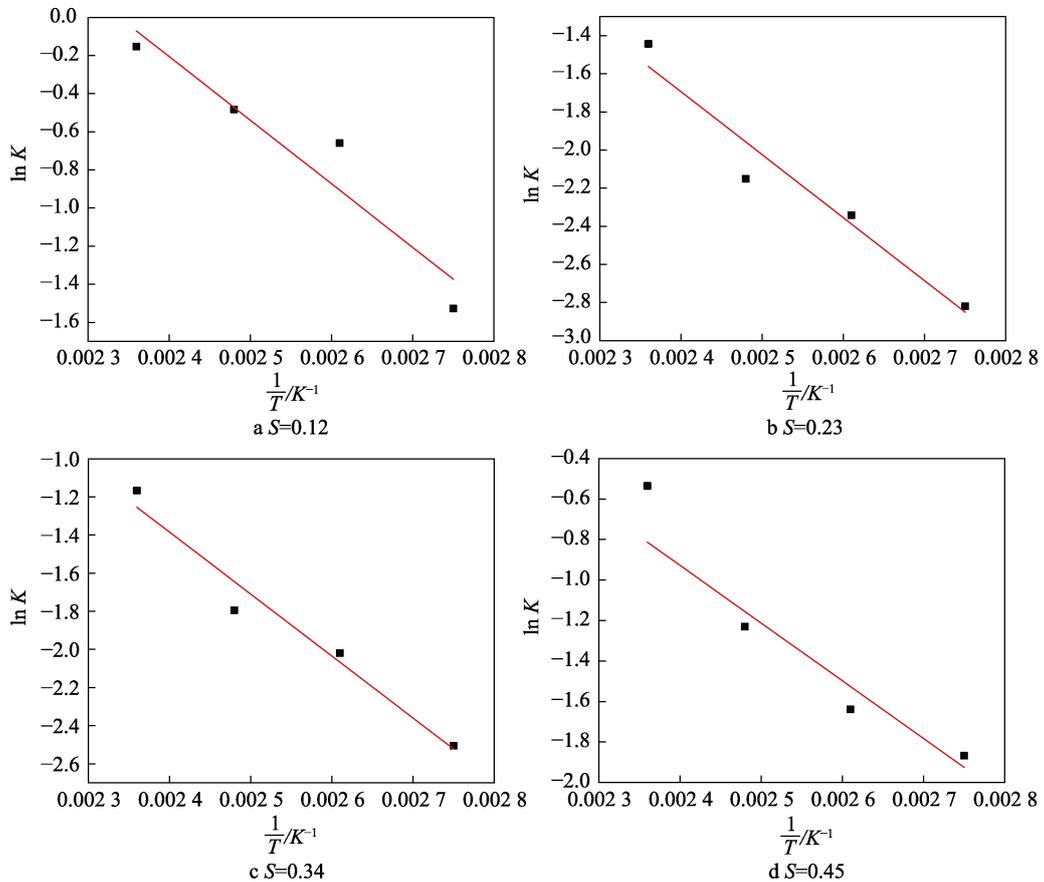


图 3 不同预压缩量下反应速率常数与温度的关系

Fig.3 Relationship between reaction rate constant and temperature under different pre-compression amounts

撞都会导致反应发生,只有那些能量足够高的分子互相碰撞时才能引发反应。试验温度越高,橡胶材料内部的活化分子越多,有效碰撞的概率越大,橡胶老化反应速率越快。根据式(9)计算了压缩量为34%时,不同试验温度对硅橡胶老化寿命的影响情况,结果见表2。由表2可知,在预压缩量为0.34的情况下,随着试验温度的升高,G105橡胶的寿命大幅降低。试验温度范围内,温度每升高10 K,老化时间大约变为原来的0.6倍。

表2 不同温度对老化寿命的影响  
Tab.2 Effect of different temperatures on aging life

试验温度/K	老化时间/d	老化时间减小率
363	376.88	
373	222.35	0.59
383	137.60	0.61
393	86.32	0.62
403	55.39	0.64

### 3.2.2 预压缩量与硅橡胶密封装置贮存寿命关系

在机械应力场的作用下,橡胶试样处于压缩状态,内部卷曲的分子链沿着机械应力的方向压缩,分子链之间的相互作用力和交联网络更容易受到损伤<sup>[22]</sup>。式(2)代表了老化反应速率常数与温度的关系,当贮存温度为298 K时,利用式(7)~(10),可外推出常温下的老化反应速率常数。当为预压缩量0.12、0.23、0.34、0.45时,反应速率常数分别为0.006 89、0.008 49、0.013 7、0.021 7。由此可知,常温下的反应速率随着预压缩量的增大而增大,表明预压缩量的增大对反应起到加速作用。在得出常温下的反应速率后,结合表1,即可得到该密封圈在25℃下不同预压缩量*S*的老化动力学方程:

$$\ln y_{0.12} = 0.064 9 - 0.006 89 \tau^{0.516 0} \quad (12)$$

$$\ln y_{0.23} = 0.058 8 - 0.008 49 \tau^{0.505 6} \quad (13)$$

$$\ln y_{0.34} = 0.091 2 - 0.013 7 \tau^{0.452 7} \quad (14)$$

$$\ln y_{0.45} = 0.163 - 0.027 \tau^{0.429 6} \quad (15)$$

老化模型反映了压缩永久变形与贮存时间和温度的关系,通过将老化模型进行变形,可得到贮存时间与指定压缩永久变形和温度的关系,见式(16)。

$$\tau = \exp \left[ \frac{1}{\alpha} \left( \ln \ln \frac{\hat{B}}{y_0} - \ln \hat{K} \right) \right] \quad (16)$$

橡胶临界值是指橡胶性能退化到不可接受前的性能保持率。查阅有关资料<sup>[23-24]</sup>,当压缩永久变形达到50%时,可认为橡胶密封装置达到损坏标准,因此以 $y_0=0.5$ 为指标计算贮存寿命。经计算,当为预压缩量0.12、0.23、0.34、0.45时,硅橡胶的贮存寿命分别为24.8、19.7、18.2、14.2 a。可以看出,随着压缩量的增大,橡胶试样的寿命呈下降趋势。这是由于在

应力作用下,橡胶中的分子链可能会发生断裂,尤其是在不饱和双键处。因为这些部位的化学键相对较弱,更容易断裂。同时,应力还会导致橡胶分子链的重新排列,形成新的交联结构。当高分子材料受到应力应变作用时,高分子链将沿应力方向重新排列,增加了与氧气接触的机会,从而加速了氧化反应的进程。与此同时,当高分子材料受到应力应变作用时,其分子链将沿应力方向发生弯折,其分子键长和键角受到约束,在氧气的作用下更易断裂,产生更多的自由基,加快反应进程<sup>[25-26]</sup>。

## 4 结论

本文通过对G105橡胶进行热氧老化试验,研究了不同预压缩量及不同温度对硅橡胶密封装置反应速率及贮存寿命的影响,总结如下:

1)温度和预压缩量对硅橡胶反应影响速率较大,在预压缩量一定的情况下,温度越高,橡胶反应速率越快。随着预压缩量(0.12、0.23、0.34、0.45)的增大,橡胶反应活化能分别为29 079、27 000、25 518、24 967 J/mol,证明了随着预压缩量的增大,反应速率加快,材料性能退化加快。

2)在预压缩量为0.34时,试验温度从90℃增加到130℃,橡胶老化时间依次减小。温度每升高10℃,压缩永久变形率达到临界值所需时间大约变为原来的0.6倍。

3)可根据时温等效模型,利用硅橡胶短期高温老化试验数据,模拟其在长期低温状态下的性能退化情况。在贮存温度下,橡胶所受预压缩量越大,橡胶的反应速率越快。当压缩量由0.12增加到0.45时,橡胶贮存寿命依次为24.8、19.7、18.2、14.2 a,橡胶的贮存寿命随着所受预压缩量的增大而减小。

### 参考文献:

- [1] 焦建英,王昊,黄运华,等.橡胶热氧老化研究综述[J].合成橡胶工业,2021,44(4):330-334.  
JIAO J Y, WANG H, HUANG Y H, et al. A Review on Thermal-Oxidative Aging of Rubber[J]. China Synthetic Rubber Industry, 2021, 44(4): 330-334.
- [2] 张春华,温熙森,陈循.加速寿命试验技术综述[J].兵工学报,2004,25(4):485-490.  
ZHANG C H, WEN X S, CHEN X. Overview of Accelerated Life Test Technology[J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(4): 485-490.
- [3] 张春华,温熙森,陈循.加速寿命试验技术综述[J].兵工学报,2004,25(4):485-490.  
ZHANG C H, WEN X S, CHEN X. A Comprehensive Review of Accelerated Life Testing[J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(4): 485-490.

- [4] 肖坤, 顾晓辉. 某弹用 O 型密封圈热氧老化试验与寿命评估[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(6): 59-61.  
XIAO K, GU X H. Thermal Oxidation Aging Test and Life Assessment of Bullet O-Ring[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(6): 59-61.
- [5] 周城, 陈夏, 樊亚勤, 等. 热氧老化对辐照三元乙丙橡胶密封材料性能影响及寿命评估[J]. 绝缘材料, 2023, 56(1): 23-28.  
ZHOU C, CHEN X, FAN Y Q, et al. Effects of Thermal Oxygen Ageing on Properties of Irradiated EPDM Sealing Materials and Life Assessment[J]. Insulating Materials, 2023, 56(1): 23-28.
- [6] 柳荣, 牟广宇, 尹文华, 等. 民用飞机硅橡胶老化性能研究及储存寿命预测[J]. 合成材料老化与应用, 2018, 47(4): 9-12.  
LIU R, MU G Y, YIN W H, et al. The Aging Property and Life Forecast of the Silicone Rubber for Civil Aircraft[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2018, 47(4): 9-12.
- [7] Zhang Y, Weng Q Z. Naval. Forecast of life expectancy of SBR[J]. Chemical Research and Application, 2017, 29(2): 278-282.
- [8] ZHENG Y J, HUANG Z A, LIU L R. The Aging Property and Life Forecast of the Silicone Rubber[J]. China Plastics Industry, 2015, 43(8): 61-64.
- [9] 李秀杰, 孙书, 刘丽霞, 等. 基于湿热老化试验的航天器用丁腈橡胶贮存寿命预测[J]. 航天器环境工程, 2022, 39(5): 539-544.  
LI X J, SUN S, LIU L X, et al. Prediction of Storage Life of Nitrile Butadiene Rubber for Spacecraft Based on Hydrothermal Aging Test[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2022, 39(5): 539-544.
- [10] LE SAUX V, LE GAC P Y, MARCO Y, et al. Limits in the Validity of Arrhenius Predictions for Field Ageing of a Silica Filled Polychloroprene in a Marine Environment[J]. Polymer Degradation and Stability, 2014, 99: 254-261.
- [11] 刘巧斌, 史文库, 刘鹤龙, 等. 基于步进应力加速老化和改进 Arrhenius 模型的橡胶贮存寿命预测[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(5): 56-61.  
LIU Q B, SHI W K, LIU H L, et al. Rubber Storage Life Prediction Based on Step Stress Accelerated Test and a Modified Arrhenius Model[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(5): 56-61.
- [12] 易军, 刘海露, 吴丝竹, 等. 基于 Arrhenius 修正公式的橡胶老化寿命预测[C]// 第八届全国橡胶工业新材料技术论坛暨 2008 年橡胶助剂专业委员会会员大会论文集. 北京: 中国橡胶工业协会, 2008.  
YI J, LIU H L, WU S Z, et al. Prediction of Rubber Aging Life Based on Arrhenius Correction Formula[C]// The 8th National Rubber Industry New Material Technology Forum and the 2008 Rubber Additives Professional Committee Member Conference. Beijing: China Rubber Industry Association, 2008.
- [13] 周远翔, 张征辉, 张云霄, 等. 热-力联合老化对硅橡胶交联网络及力学和耐电特性的影响[J]. 电工技术学报, 2022, 37(17): 4474-4486.  
ZHOU Y X, ZHANG Z H, ZHANG Y X, et al. The Effect of Combined Thermal-Mechanical Aging on the Cross-Linking Network and Mechanical and Electrical Properties of Silicone Rubber[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(17): 4474-4486.
- [14] 朱忠猛, 蒋成凯, 蒋晗. 温度和应变作用下氢化丁腈橡胶的加速老化行为研究[C]// 四川省力学学会 2014 年学术交流年会论文集. 绵阳: 四川省力学学会, 2014.  
ZHU Z M, JIANG C K, JIANG H. Accelerated Aging Behavior of Hydrogenated Nitrile Rubber under Temperature and Strain Effects[C]// Proceedings of 2014 Academic Exchange Annual Meeting of Sichuan Society of Mechanics, Mianyang: Society of Theoretical and Applied Mechanics of Sichuan Province, 2014: 213-216.
- [15] 钱艺华, 聂明浩, 赵耀洪, 等. 热油压缩下丁腈橡胶老化性能研究[J]. 应用化工, 2016, 45(11): 2043-2046.  
QIAN Y H, NIE M H, ZHAO Y H, et al. Ageing Study on Nitrile Rubber under Hot Oil Compression[J]. Applied Chemical Industry, 2016, 45(11): 2043-2046.
- [16] 魏驰原, 解静静, 史培鑫, 等. 密封用发泡硅橡胶的压缩老化及寿命评估[J]. 中国塑料, 2023, 37(12): 54-59.  
WEI C Y, XIE J J, SHI P X, et al. Compression Aging and Lifetime Assessment of Foamed Silicone Rubber for Sealing[J]. China Plastics, 2023, 37(12): 54-59.
- [17] LIU Y K, ZHANG Q S, LIU R T, et al. Compressive Stress-Hydrothermal Aging Behavior and Constitutive Model of Shield Tunnel EPDM Rubber Material[J]. Construction and Building Materials, 2022, 320: 126298.
- [18] 许坚, 叶德县. 应变对橡胶老化性能变化的影响研究[J]. 专用汽车, 2023(6): 74-77.  
XU J, YE D X. Effect of Strain on Aging Properties of Rubber[J]. Special Purpose Vehicle, 2023(6): 74-77.
- [19] 窦鹏, 杨瑞宁, 惠鑫. 应用环境下耐高温硅橡胶老化性能研究[J]. 化学研究, 2022, 33(2): 152-157.  
DOU P, YANG R N, HUI X. Study on Aging Properties of High Temperature Resistant Silicone Rubber under Application Environment[J]. Chemical Research, 2022, 33(2): 152-157.
- [20] 朱余忠. 预应力下橡胶老化特性的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.  
ZHU Y Z. Study on Aging Characteristics of Rubber under Prestress[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [21] JIANG C, WANG H Y, MA X B. Study on the Aging Behaviors of Rubber Materials in Tension and Compression Loads[C]// Mechanical Engineering and Control Systems. Wuhan: IEEE, 2016.
- [22] 王韵然, 罗廷纲, 夏志伟, 等. 硅橡胶老化性能的研究进展[J]. 有机硅材料, 2011, 25(1): 58-61.  
WANG Y R, LUO T G, XIA Z W, et al. Research Progress of Aging Properties of Silicone Rubber[J]. Silicone Material, 2011, 25(1): 58-61.

- [23] WU C, MIAO Z, WANG X, et al. The Effect of High-Low Temperature Cycle Ageing on Mechanical Properties of Silicone Rubber under Tensile IEEE 4th State[C]// 2023 Equipment (ICEMPE). Power and Materials Electrical on Conference International Shanghai, China. IEEE, 2023: 1-4.
- [24] 时兴波, 陈学永, 江浪, 等. 基于加速热老化试验的橡胶活化能及寿命分析[J]. 中国新技术新产品, 2021(21): 18-20.  
SHI X B, CHEN X Y, JIANG L, et al. Activation Energy and Life Analysis of Rubber Based on Accelerated Thermal Aging Test[J]. New Technology & New Products of China, 2021(21): 18-20.
- [25] QIAN Y H, XIAO H Z, NIE M H, et al. Lifetime Prediction and Aging Behaviors of Nitrile Butadiene Rubber under Operating Environment of Transformer[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2018, 13(2): 918-927.
- [26] 熊英, 付宝强, 郭少云, 等. 丁腈橡胶应力加速老化行为的研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(3): 52-55.  
XIONG Y, FU B Q, GUO S Y, et al. Study of Stress Accelerated Aging Behavior of Sulfured Nitrile-Butadiene Rubber[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(3): 52-55.
- [27] 焦剑, 雷渭媛. 高聚物结构、性能与测试[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.  
JIAO J, LEI W Y. Structure, Properties and Testing of Polymers[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.