

# O形三元乙丙橡胶密封圈的使用寿命预测

张凯,马艳,衣志勇,吴菊英

(中国工程物理研究院 总体工程研究所,四川 绵阳 621900)

**摘要:**根据包装箱结构设计典型密封结构,在模拟使用状态下对O形三元乙丙橡胶(EPDM)密封圈进行加速老化试验研究,获得在65,85和105℃下不同老化时间(5,10,15,20,25和30 d)的压缩永久变形变化规律,在此基础上,推导O形EPDM密封圈的失效时间与使用温度的数学关系式,预测出O形EPDM密封圈在25℃下的使用寿命为17.8 a。同时,将预测曲线与实测曲线进行对比分析得出预测曲线与实测曲线吻合良好,相关性参数 $R>0.95$ 。

**关键词:**三元乙丙橡胶;O形密封圈;寿命预测

**中图分类号:**TQ333.4;TQ336.4<sup>+</sup>2 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-890X(2014)12-0746-04

橡胶密封制品是各种机械的精密基础元件,其品种繁多、形态各异、使用条件非常复杂。密封件性能的好坏对机械精度、使用安全性、使用性能、使用寿命及经济效益影响极大。O形密封圈是最常用的密封元件,其结构简单、价格低廉,往往能取得良好的密封效果,是影响产品性能的关键零部件之一。

橡胶密封圈的密封性能主要来源于其高弹性和体积不可压缩性。在受压缩或扩张的时候,橡胶密封圈会对其工作面产生强大的弹性应力,从而使密闭空间中的气体或液体不致泄漏。但是橡胶密封圈的这种密封能力不是恒定不变的,它会由于长时间受力而产生应力松弛、在高温和介质中长期工作而产生材料老化、在低温环境下变硬发脆而失去弹性等,从而丧失密封性能。因此,如何在短期内评估橡胶密封圈的老化性能,预测其使用寿命,对于机械产品密封设计及工程应用中产品密封性能的控制具有非常重要的意义。

近年来,有关O形密封圈的老化性能研究报道主要集中在分析影响因素方面。谭品等<sup>[1]</sup>利用有限元分析软件Ansys建立了液压系统中液压缸用O形密封圈的二维轴对称模型,分析计算了O形密封圈缸筒和轴套的间隙、密封轴套槽口倒角半径、O形密封圈的截面尺寸、橡胶材料参数、初始压缩率对密封面最大接触压力和剪切应力的

影响。陈占清等<sup>[2]</sup>利用Ansys对O形密封圈在不同压缩率下的接触压力分布进行了分析,结果表明提高压缩率对密封圈密封性能有显著影响。王建军等<sup>[3]</sup>分析了O形密封圈的尺寸公差对密封性能的影响以及密封圈的內径伸长率和压缩变形率改变时接触面上最大接触应力的变化情况。郑之盛<sup>[4]</sup>基于O形密封圈密封原理,定性分析了各种主要因素(接触应力、自锁密封、压缩率、拉伸率、永久变形)对密封性能的影响,并进一步提出了一些相应的解决办法。

本工作根据包装箱结构设计了典型密封结构,在模拟使用状态下对O形三元乙丙橡胶(EPDM)密封圈进行了加速老化试验,推导出O形EPDM密封圈的失效时间与使用温度的数学关系式,并进行了寿命验证试验。

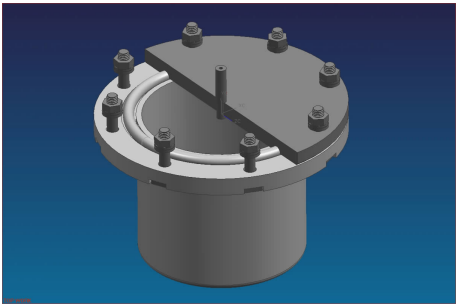
## 1 典型密封结构设计

根据包装箱的结构特点,并考虑测试及老化试验的可行性,设计了小型密封结构试验件,模拟考察断面直径为5.9 mm、中径为100 mm的EPDM密封圈的老化性能。典型密封结构试验件设计见图1(a),典型密封结构试验件及O形密封圈实物见图1(b)。

## 2 加速老化试验

### 2.1 试验状态

O形密封圈在使用过程中通常处于受压状



(a) 设计示意



(b) 实物示意

**图 1 典型密封结构试验件及 O 形密封圈**  
态,会受到机械应力、温度、湿度、介质及空气中氧的共同作用,从而导致橡胶发生老化,产生累积永久变形,丧失其密封性能。其中温度和应力对橡胶的化学反应速度有显著影响。由于橡胶结构及其应力分布的不均匀性,在经受变形疲劳过程中,温度和应力会严重破坏橡胶的分子结构,使大分子断裂,生成自由基,引发橡胶大分子的氧化降解反应。因此,在压应力作用下 O 形密封圈的热氧老化过程决定了其使用寿命。本研究选择将 O 形 EPDM 密封圈按使用条件装配到模拟密封

结构试验件中,在受压状态下进行热氧加速老化试验<sup>[5]</sup>。

2.2 试验条件

- (1)试样状态:O 形 EPDM 密封圈,断面直径为 5.9 mm,中径为 100 mm。
- (2)试验数量:每个试验状态的试样数量不少于 3 件。
- (3)老化温度:分别选取 65,85 和 105 ℃ 进行热氧加速老化试验。
- (4)老化时间:分别进行为期 5,10,15,20,25 和 30 d 的热氧加速老化试验。
- (5)试验设备:LR-01 型热老化试验箱,重庆四达试验设备有限公司产品。

2.3 性能测试

将装配有 O 形 EPDM 密封圈的密封结构试验件放入热老化试验箱内,待达到试验条件后,取出进行密封圈相关尺寸测试,从而计算出密封圈的压缩永久变形( $\epsilon$ ),计算公式为

$$\epsilon = \frac{h_0 - h_2}{h_0 - h_1} \cdot 100\% \tag{1}$$

式中  $h_0$ ——O 形密封圈的原始断面直径,mm;  
 $h_1$ ——限制器高度(槽深),mm;  
 $h_2$ ——O 形密封圈变形后的径向断面直径,mm。

3 使用寿命预测

O 形 EPDM 密封圈压缩永久变形及保留率( $1-\epsilon$ )见表 1。

对表 1 数据进行回归处理,可得不同老化温度下压缩永久变形保留率随老化时间( $t$ )变化的数学模型,变化规律符合幂函数 $1-\epsilon=At^B$ 分布,

表 1 O 形 EPDM 密封圈压缩永久变形及保留率

| 项 目          | 老化时间/d |      |      |      |      |      |      |
|--------------|--------|------|------|------|------|------|------|
|              | 0      | 5    | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   |
| $\epsilon$   |        |      |      |      |      |      |      |
| 65 ℃         | 0.00   | 0.09 | 0.16 | 0.18 | 0.20 | 0.22 | 0.23 |
| 85 ℃         | 0.00   | 0.14 | 0.21 | 0.22 | 0.23 | 0.25 | 0.27 |
| 105 ℃        | 0.00   | 0.17 | 0.27 | 0.32 | 0.33 | 0.35 | 0.36 |
| $1-\epsilon$ |        |      |      |      |      |      |      |
| 65 ℃         | 1.00   | 0.91 | 0.84 | 0.82 | 0.80 | 0.78 | 0.77 |
| 85 ℃         | 1.00   | 0.86 | 0.79 | 0.78 | 0.77 | 0.75 | 0.73 |
| 105 ℃        | 1.00   | 0.83 | 0.73 | 0.68 | 0.67 | 0.65 | 0.64 |

计算结果见表 2。取显著水平为 0.05,经相关性检验,函数模型成立。取 O 形 EPDM 密封圈的压缩永久变形临界值  $\epsilon_c=40\%$ ,代入函数模型,可求出各试验温度下临界失效时间  $t_c$ ,结果如表 2 所示。

| 项 目     | 试验温度/℃   |          |          |
|---------|----------|----------|----------|
|         | 65       | 85       | 105      |
| A       | 1.048    | 0.975    | 1.030    |
| B       | -0.091 3 | -0.083 0 | -0.144 3 |
| $R^2$   | 0.990 4  | 0.957 4  | 0.973 3  |
| $t_c/d$ | 449.68   | 347.06   | 42.30    |

注: $R$  为相关性参数。

根据表 2 试验温度和临界失效时间数据,可得 O 形 EPDM 密封圈的失效时间  $t_c(a)$  与使用温度  $T(^\circ C)$  的关系式如下:

$$t_c=78.03e^{-0.059\ 1T}$$

(2)

由式(2)可以计算出在 25℃条件下,O 形 EPDM 密封圈的使用寿命为 17.80 a,同时可以得出 O 形 EPDM 密封圈使用过程中的时温等效曲线,如图 2 所示。

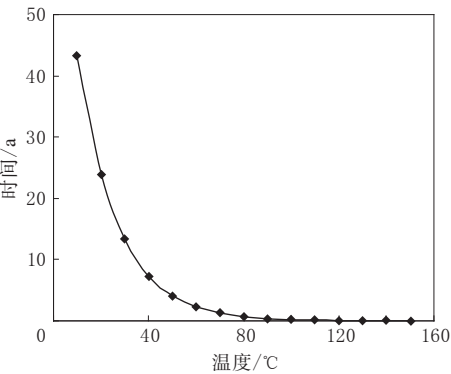


图 2 O 形 EPDM 密封圈使用过程中的时温等效曲线

4 寿命验证试验

O 形 EPDM 密封圈的时温等效曲线是在实验室加速老化试验的数据基础上推导出来的。为了进一步验证时温等效关系式的可靠性,通常需对其模拟真实情况的一致性进行判断。同时,需结合室温条件下的长期试验结果,对其预测结果的准确性进行验证评估。

本研究将加速老化温度(65,85 和 105℃)下

实测密封圈压缩永久变形曲线与由建立的数学模型推导出的密封圈压缩永久变形曲线进行对比,结果见图 3。

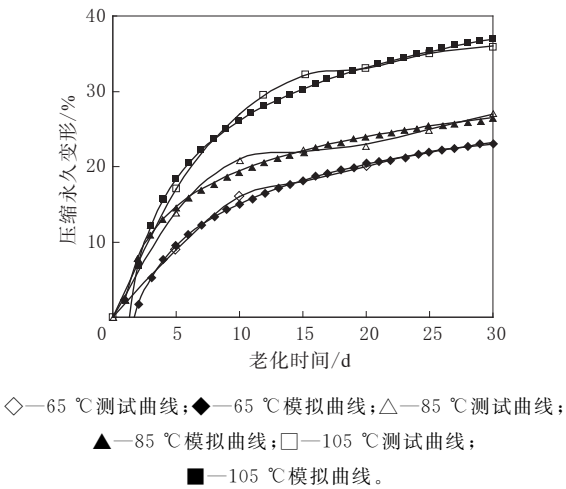


图 3 不同试验温度下密封圈压缩永久变形测试曲线与模拟曲线对比

从图 3 可以看出,测试曲线与模拟曲线一致性很好,除起始段有一定偏差外,其余部分都比较吻合,相关性参数  $R>0.95$ ,表明通过数学推导得到的加速老化数学模型符合实际样品的老化情况。

根据 O 形 EPDM 密封圈使用过程中的时温等效曲线(见图 2),推导出 25℃使用条件下密封圈的压缩永久变形随使用时间的变化曲线,如图 4 所示。该曲线反映出了在 25℃使用温度下 O 形 EPDM 密封圈的压缩永久变形随使用时间的变化情况,不仅可以作为性能预测的依据,也可以作为长时间自然条件下使用试验对比验证的

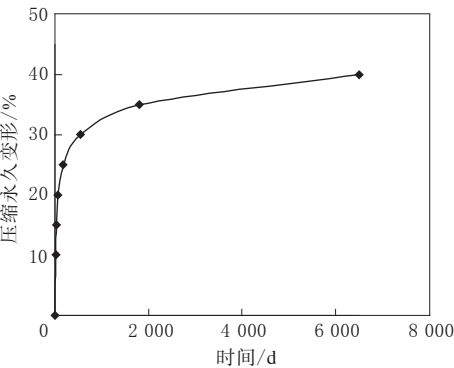


图 4 25℃下密封圈的压缩永久变形预测曲线

基础。

密封圈压缩永久变形实测数据与预测数据对比见表 3。

| 表 3 密封圈压缩永久变形实测数据与预测数据对比 |      |      |        |
|--------------------------|------|------|--------|
| 试验条件                     | 实测值  | 预测值  | 相对偏差/% |
| 25 ℃                     |      |      |        |
| 90 d                     | 0.17 | 0.22 | 29.4   |
| 180 d                    | 0.19 | 0.25 | 31.6   |
| 270 d                    | 0.22 | 0.27 | 22.7   |
| 360 d                    | 0.26 | 0.28 | 7.7    |
| 65 ℃                     |      |      |        |
| 90 d                     | 0.27 | 0.31 | 14.8   |
| 180 d                    | 0.34 | 0.35 | 2.9    |

从表 3 可以看出,试验实测值与预测值之间存在一定偏差,表明老化数学模型还有需要进一步修正的地方。同时,也可以看出,预测值普遍高于实测值,因此,用预测值来进行使用状态的判断已经附加了一定的安全系数,这在工程上是可以接受的。另外,还可以发现,随着使用时间的延长,预测值与实测值之间的相对偏差有下降趋势,因此,老化数学模型对于长时间使用试样的性能预测具有一定可信度。

5 结论

(1)根据 O 形 EPDM 密封圈失效时间与温度的关系式,计算出 25 ℃下 O 形 EPDM 密封圈的使用寿命为 17.80 a。

(2)不同试验温度下密封圈压缩永久变形测试曲线与模拟曲线一致性良好,除起始段存在一定偏差外,其余部分比较吻合,相关性参数  $R>0.95$ 。

(3)密封圈压缩永久变形预测值普遍高于实测值,随着使用时间的延长,预测值与实测值之间的相对偏差存在下降趋势。

参考文献:

[1] 谭晶,杨卫民,丁玉梅.O 形橡胶密封圈密封性能的有限元分析[J]. 润滑与密封,2006,31(9):65-69.

[2] 陈占清,詹永麒,朱昌明.压缩率对 O 形橡胶密封圈密封性能的影响[J]. 流体传动与控制,2007(2):46-48.

[3] 王建军,高新陵.O 形橡胶密封圈尺寸公差对密封性能的影响[J]. 机电产品开发与创新,2008,21(5):79-81.

[4] 郑之盛.O 形密封圈密封性能影响因素分析[J]. 现代商贸工业,2010(22):426-427.

[5] 茆诗松,王玲玲.加速寿命试验[M]. 北京:科学出版社,2000.

收稿日期:2014-06-03

Lifetime Prediction of EPDM O-ring

ZHANG Kai,MA Yan,YI Zhi-yong,WU Ju-ying

(Institute of System Engineering,China Academy of Engineering Physics,Mianyang 621900,China)

**Abstract:**In this study,the accelerated ageing test of EPDM O-ring was carried out using typical sealing fixture based on actual packaging structure. The change trends of compression set of O-ring at different ageing temperature (65,85 and 105 ℃) and different ageing time (5,10,15,20,25 and 30 d) were investigated. Through mathematical regression,the relationship between the time to failure and application temperature were obtained,and the predicated lifetime of EPDM O-ring was 17.8 years. Moreover,the predicted curve was in good accordance with the experimental curve and the correlation coefficient was greater than 0.95.

**Key words:**EPDM;O-ring;lifetime prediction

欢迎在《橡胶工业》《轮胎工业》《橡胶科技》杂志上刊登广告