

# 高精度轴承套杯式缓冲垫性能试验研究

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2020.02.009

徐博易 于 蕾

田 野

哈尔滨商业大学

包装工程系

黑龙江 哈尔滨 150028

**摘 要:** 针对高精度轴承的缓冲包装问题, 采用 HL-1029 有机硅胶制作高精度轴承套杯式缓冲衬垫。先制得 HL-1029 有机硅胶材料试件, 并对其进行单轴拉伸试验; 对试验结果进行分析和计算, 得出 HL-1029 有机硅胶作为高精度轴承的缓冲包装衬垫的厚度至少为 12 mm。再对以 12 mm 和 17 mm 厚有机硅胶缓冲衬垫包装的高精度轴承, 进行跌落仿真试验, 得到跌落时轴承受到的应力、应变云图。由试验结果可知, HL-1029 有机硅胶缓冲衬垫能有效地保护高精度轴承。

**关键词:** 有机硅胶; 缓冲衬垫; 超弹性; 高精度轴承

**中图分类号:** TB482.2; TB485.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2020)02-0064-07

**引文格式:** 徐博易, 于 蕾, 田 野. 高精度轴承套杯式缓冲垫性能试验研究[J]. 包装学报, 2020, 12(2): 64-70.

## 1 研究背景

轴承是机械产品中不可缺少的基础零部件之一, 其精密程度决定了机械产品的工作运转精度。国内外专家学者对于轴承本身工作性能的研究很多<sup>[1-2]</sup>, 但对轴承从出厂到交付用户的过程中其自身质量受运输环境影响的研究较少。张振宇等<sup>[3]</sup>提出了一种通过预紧力定位的方法, 以此来减小轴承滚动体与内圈两者之间游隙, 进而对包装件进行防护。闫国斌等<sup>[4]</sup>通过试验的方法对比研究了发泡聚氨酯(AB料)、发泡聚乙烯(expandable polyethylene, EPE)和瓦楞纸板3种包装缓冲材料的缓冲性能。Tian Y. 等<sup>[5]</sup>对圆柱形缓冲衬垫的性能进行了研究, 并提出了最优的厚度。孙斌等<sup>[6]</sup>对大型圆锥滚子轴

承的包装进行了改进, 通过有限元方法验证了 EPE 材料作为隔离衬垫的有效性。由于聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)具有稳定性、回弹性好, 而且耐高温等特点, 因此文献[7]将其用作触觉传感器的封装材料。

目前轴承包装的通用方法是: 外包装采用瓦楞纸箱或钉板箱, 内包装采用聚乙烯薄膜, 并以瓦楞纸块、废纸屑等干燥物作为填充。这种包装方式简单粗暴, 无法提供缓冲防护, 不适用于精度要求较高的航空轴承包装。针对高精度轴承缓冲包装不合理的问题, 本文采用 HL-1029 有机硅胶制作高精度轴承缓冲包装垫, 并通过模拟产品在运输过程中的跌落试验来验证以有机硅胶材料制作缓冲衬垫的可行性。

**收稿日期:** 2020-01-25

**基金项目:** 黑龙江省大学生创新创业训练计划基金资助项目(201810240085), 哈尔滨商业大学青年创新人才基金资助项目(2016QN067), 哈尔滨商业大学博士科研启动基金资助项目(2016BS07)

**作者简介:** 徐博易(1998-), 男, 山西临汾人, 哈尔滨商业大学学生, 主要研究方向为机械设计制造,

E-mail: 2025725002@qq.com

**通信作者:** 田 野(1981-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨商业大学副教授, 博士, 主要从事工业产品运输防护技术方面的教学与研究, E-mail: tian8154@126.com

## 2 HL-1029 有机硅胶缓冲材料力学性能测试

### 2.1 HL-1029 有机硅胶试件的制备

HL-1029 有机硅胶为超弹性材料, 是一种低黏度、双组分、固态时无毒性, 能有效阻隔水分子且不易燃烧的高透明硅胶体。目前已广泛应用于精密电子元件的灌封或密封, 符合欧盟 ROHS (restriction of hazardous substances) 指令要求, 因此可将其应用于航空轴承的缓冲包装。

将质量比为 1:1 的双组分 HL-1029 材料 AB 液充分搅拌均匀, 在室温下静止放置 24 h, 并按表 1 的条件制得哑铃状试件, 如图 1 所示。

表 1 HL-1029 有机硅胶使用条件  
Table 1 Working conditions of HL-1029 silicone gel

| 参数            | 量值              |
|---------------|-----------------|
| AB 液混合比 (质量比) | 1:1             |
| 使用环境温度        | 25 °C           |
| 胶化时间          | 8~12 h          |
| 液态开封可使用时间     | 1 h (混合量 100 g) |
| 硬化条件          | 24 h            |

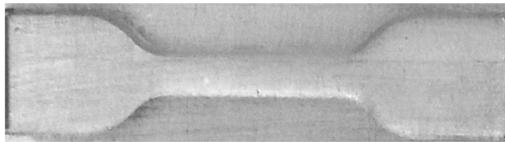


图 1 HL-1029 有机硅胶哑铃试件

Fig. 1 HL-1029 organic silica gel dumbbell test piece

### 2.2 试件的单轴拉伸试验

参照 ASTM D 3183—2002《用橡胶制品制备试验用的橡胶试片的标准实施规则》<sup>[8]</sup>、GB/T 528—2009 硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定<sup>[9]</sup>, 用 Zwick 电子万能试验机对试件进行拉伸试验。实验条件: 温度为 23 °C、速度为 5mm/min。共测试 6 个试件, 最终结果取平均值。拉断后的 HL-1029 有机硅胶哑铃状试件如图 2 所示, 各试件的应力-应变曲线如图 3 所示。

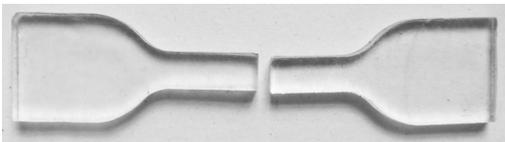


图 2 拉断后的 HL-1029 有机硅胶哑铃试件

Fig. 2 HL-1029 silicone dumbbell specimen after tensile fracture

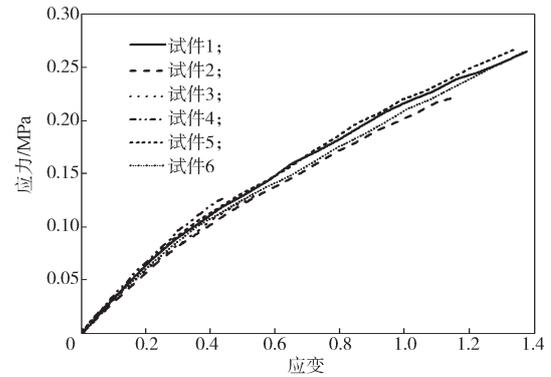


图 3 HL-1029 有机硅胶试件的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of HL-1029 silicone specimen

### 2.3 绘制 HL-1029 有机硅胶试件的缓冲系数-应力曲线

用近似解法求缓冲系数  $C$  的步骤如下:

1) 将应力-应变曲线下的面积分割为若干个小区域, 确定各分点的应力  $\sigma_i$  和应变  $\varepsilon_i$  的值 ( $i=1, 2, 3, \dots$ )。

2) 计算各区域的面积

$$\Delta e_i = \frac{1}{2}(\sigma_i + \sigma_{i-1})(\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}),$$

计算结果如表 2 所示。

表 2 各区域面积  $\Delta e_i$   
Table 2 Areas of each region  $\Delta e_i$

| $\Delta e_1$ | $\Delta e_2$ | $\Delta e_3$ | $\Delta e_4$ | $\Delta e_5$ | $\Delta e_6$ |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0.0067       | 0.0179       | 0.0262       | 0.0335       | 0.0405       | 0.0464       |

3) 计算各应力  $\sigma_i$  对应的变形成能

$$E_i = \sum_{j=1}^i \Delta e_j.$$

4) 计算各应力  $\sigma_i$  对应的缓冲系数

$$C_i = \frac{\sigma_i}{E_i}.$$

令  $\sigma_i = \sigma_m$ , 以  $\sigma_m$  为横坐标,  $C$  为纵坐标, 得到 HL-1029 有机硅胶材料试件的缓冲系数-应力曲线, 如图 4 所示。

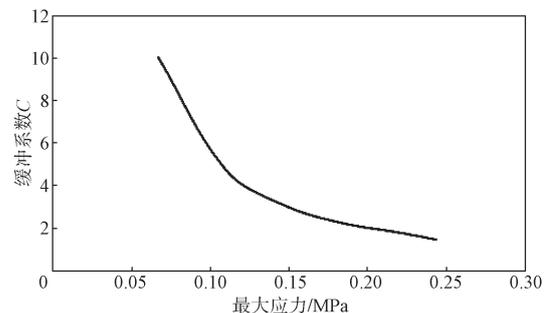


图 4 HL-1029 硅胶材料缓冲试件的缓冲系数-应力曲线

Fig. 4 Buffer coefficient stress curve of HL-1029 silica gel buffer specimen

## 2.4 HL-1029 有机硅胶缓冲衬垫厚度计算

试验用航空轴承的外圈直径为 180 mm, 内圈直径为 130 mm, 质量为 2.2 kg, 其脆值  $G_c$  选取为 120G<sup>[10]</sup>。根据 ISTA 1A—2001《国际包装产品性能试验标准》<sup>[11]</sup> 中产品跌落测试高度标准(如表 3 所示), 最终确定跌落高度为 760 mm。

表 3 产品跌落测试高度标准

Table 3 Product drop test height standard

| 产品质量/kg | 0~10 | 10~19 | 19~28 | 28~45 | 45~68 |
|---------|------|-------|-------|-------|-------|
| 跌落高度/mm | 760  | 610   | 460   | 310   | 200   |

因此, 产品跌落速度为

$$v = \sqrt{2gH} = 3.86 \text{ m/s}。$$

在 HL-1029 有机硅胶缓冲衬垫上平放试验航空轴承, 航空轴承受到的缓冲面积  $A$  是其外圈与内圈之间环状部分与缓冲衬垫的接触面积:

$$A = \pi(R^2 - r^2) = 0.0122 \text{ m}^2。$$

式中:  $r$ 、 $R$  分别为航空轴承内、外圈的半径。

由此可得缓冲衬垫受到的最大应力为

$$\sigma_m = \frac{WG_c}{A} = 0.212 \text{ MPa}，$$

式中  $W$  为轴承质量。

根据图 4 可得,  $\sigma_m = 0.212 \text{ MPa}$  对应的缓冲系数为 1.9, 从而计算得到缓冲衬垫的厚度

$$T = \frac{CH}{G_c} = 12 \text{ mm}。$$

因此, 确定 HL-1029 硅胶缓冲衬垫的厚度至少为 12 mm 才能达到缓冲要求。

## 3 轴承跌落仿真模拟试验

轴承跌落试验是在一个瞬间完成的动态事件, 所以使用 ABAQUS/Explicit 作为此次仿真实验的求解器。整个超弹性缓冲模型主要由试验轴承、有机硅胶缓冲衬垫及三维刚性地面三部分构成, 如图 5 所示。在 Property 模块中指定试验轴承和有机硅胶衬垫的初始速度, 将试验轴承的网格划分为 5000 个单元, 单元类型为 C3D10M, C3D10M 采用 deformable body。套杯式缓冲衬垫的网格划分为 3000 个单元, 单元类型为 C3D8R, 如图 6 所示。

跌落试验参数: 接触时的摩擦系数为 0.3; 轴承钢的密度为 7800 kg/m<sup>3</sup>, 轴承钢的杨氏模量为 210 GPa, 轴承钢的泊松比为 0.3, HL-1029 有机硅

胶的密度为 970 kg/m<sup>3</sup>, 时间长度为 0.005 s, 初始速度为 3.86 m/s。

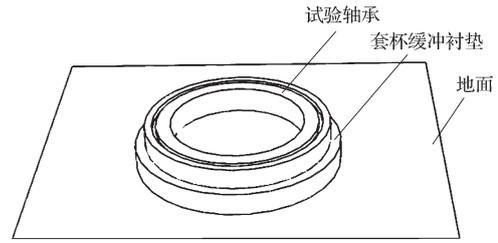


图 5 超弹性缓冲模型

Fig. 5 Hyperelastic buffer model

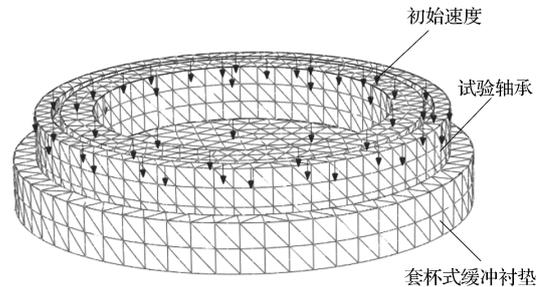


图 6 有限元模型加载和网格划分

Fig. 6 Finite element model loading and meshing

### 3.1 确立缓冲衬垫材料本构模型

缓冲衬垫材料选用硬度小、密度低、性能稳定、制备简单的 HL-1029 有机硅胶。大多数连续介质力学处理硅橡胶弹性时, 将其材料的变形看成是各向同性的超弹性体的均匀变形, 即以应变的基本不变量来表示应变能密度函数<sup>[12]</sup>。

对于各向同性材料, 应变能密度分解成应变偏量能和体积应变能两部分, 其形式为

$$U = f(\bar{I}_1 - 3, \bar{I}_2 - 3) + g(J - 1)，$$

式中:  $U$  为应变能密度;

$\bar{I}_1$ 、 $\bar{I}_2$  分别为 Cauchy-Green 变形张量的第一、第二基本不变量;

$J$  为变形后与变形前的体积比。

令  $g = \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J-1)^{2i}$ , 其中  $D_i$  为淬透值, 其取值

大小决定材料是否可压。再将上式进行泰勒展开, 得

$$U = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J-1)^{2i}，$$

式中  $C_{ij}$  为 Rivlin 系数。

Yeoh 形式是  $N=3$  时缩减多项式的特殊形式, 取

$i=1, j=0$  则  $C_{ij}=C_{i0}$ , 此时

$$U = \sum_{i=1}^3 C_{i0} (\bar{l}_1 - 3)^i + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{D_i} (J-1)^{2i}。$$

对 HL-1029 有机硅胶哑铃状试件进行单轴拉伸测试, 将得出的标准变形  $\Delta L$  和标准载荷  $F$  的试验数据进行数据处理, 得到拉伸应力及应变数据并导入 ABAQUS 中, 拟合出应力-应变曲线, 如图 7 所示。

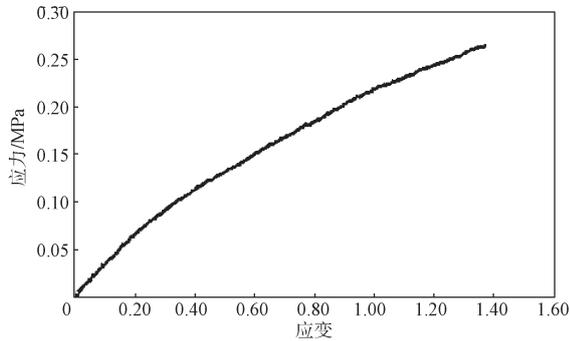


图 7 HL-1029 有机硅胶应力-应变曲线

Fig. 7 The stress-strain curve of HL-1029 organic silica gel

### 3.2 跌落仿真结果分析

由于 HL-1029 硅胶材料缓冲衬垫厚度至少为 12 mm, 因此取  $T=12$  mm 和  $T=17$  mm 两种厚度的 HL-1029 有机硅胶圆柱形缓冲衬垫进行跌落仿真实验。在 ABAQUS 环境下, 航空轴承在有机硅胶衬垫保护下跌落时的状态示意图如图 8 所示。

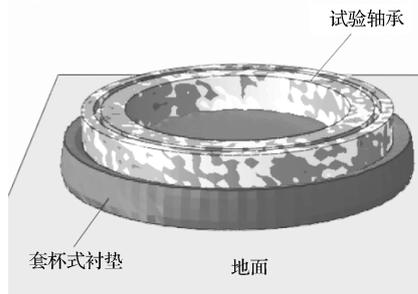
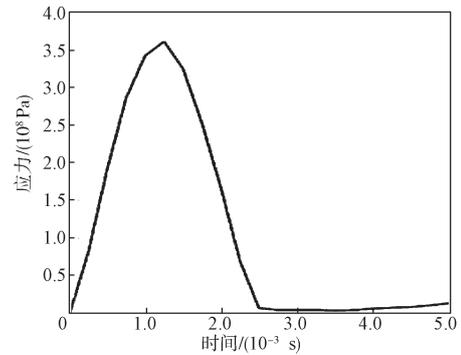


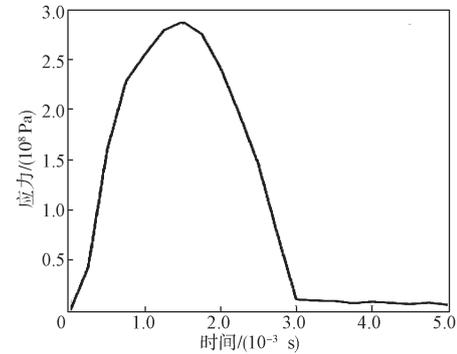
图 8 轴承跌落过程状态示意图

Fig. 8 Schematic diagram of bearing dropping process

轴承跌落时的等效应力历程曲线如图 9 所示。当缓冲衬垫厚度为 12 mm 时, 在  $1.25 \times 10^{-3}$  s 出现最大等效应力 358.5 MPa; 当缓冲衬垫厚度为 17 mm 时, 在  $1.25 \times 10^{-3}$  s 出现最大等效应力 290.0 MPa。由此可得, 随着缓冲衬垫厚度的增加, 试验轴承受到的应力减小, HL-1029 有机硅胶圆柱形缓冲衬垫对航空轴承的保护性能增强。



a) 缓冲衬垫厚度为 12 mm

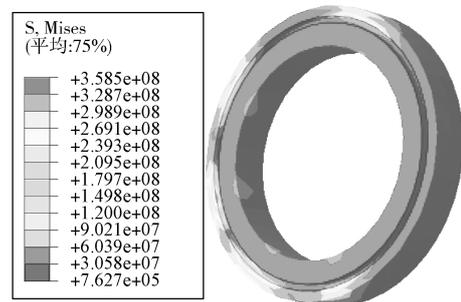


b) 缓冲衬垫厚度为 17 mm

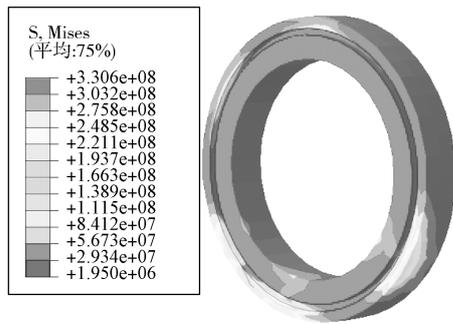
图 9 轴承跌落时的等效应力历程曲线

Fig. 9 Equivalent stress history curve of bearing at falling

跌落的等效应力分布云图如图 10 所示。由图可知, 轴承底部内侧环状区域是受力最大的部位, 该部位出现了较少的应力集中, 将应力集中部位放大显示如图 11 所示。当缓冲衬垫厚度为 12 mm 时的等效应力最大, 为 358.5 MPa; 当缓冲衬垫厚度为 17 mm 时的等效应力次之, 为 290.0 MPa。由于轴承钢退火态屈服强度极限许用范围为 353~382 MPa, 淬火加回火屈服强度极限许用范围为 1667~1814 MPa, 所以, 不同缓冲衬垫厚度的两次跌落都没有超过轴承钢的屈服极限, 而且越远离地面的部位受到的应力越小。轴承没有产生塑性变形或损坏。



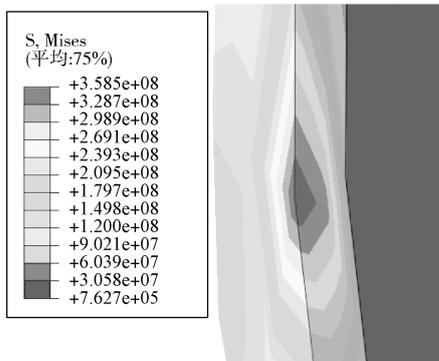
a) 缓冲衬垫厚度为 12 mm



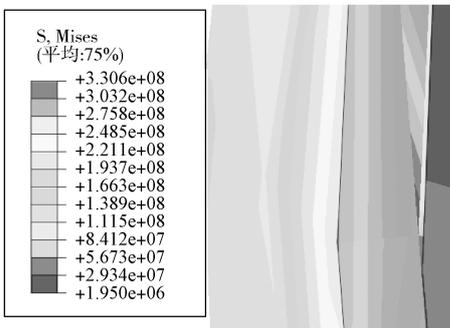
b) 缓冲衬垫厚度为 17 mm

图 10 轴承跌落时的等效应力分布云图

Fig. 10 Cloud chart of equivalent stress distribution of bearing at falling



a) 缓冲衬垫厚度为 12 mm



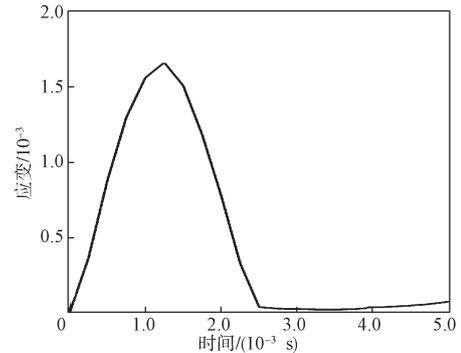
b) 缓冲衬垫厚度为 17 mm

图 11 轴承底部内侧应力集中放大云图

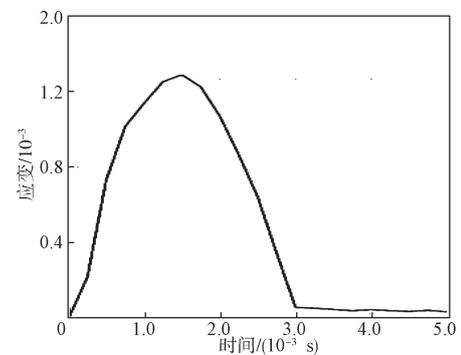
Fig. 11 Enlarged cloud chart of stress concentration inside bearing bottom

轴承跌落时的等效应变历程曲线如图 12 所示。由图 12 可知, 应变的分布与图 9 中的应力的分布类似, 都是从 0 开始增加, 在相同的时间达到峰值后下降, 最终趋于平缓。当缓冲衬垫厚度为 12 mm 时, 在  $1.25 \times 10^{-3}$  s 时出现最大等效应变  $1.660 \times 10^{-3}$ ; 当缓冲衬垫厚度为 17 mm 时, 在  $1.25 \times 10^{-3}$  s 时出现最大等效应变  $1.288 \times 10^{-3}$ 。由此可得, 随着缓冲衬垫厚度的增加, 试验轴承的应变变形减小, HL-1029 有机

硅胶圆柱形缓冲衬垫对航空轴承的保护性能也增强。



a) 缓冲衬垫厚度为 12 mm



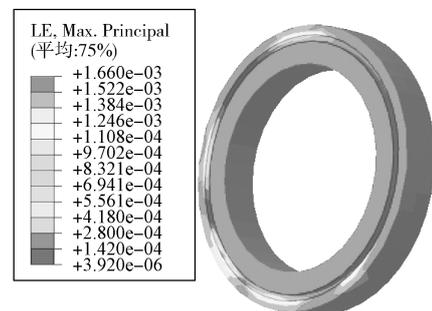
b) 缓冲衬垫厚度为 17 mm

图 12 轴承跌落时的等效应变历程曲线

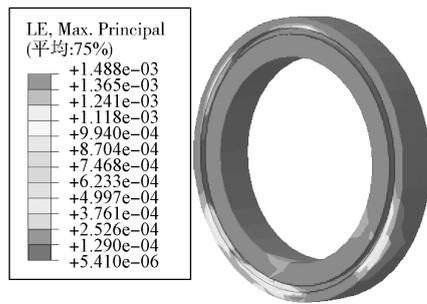
Fig. 12 Equivalent strain history curve of bearing at falling

轴承跌落时的等效应变分布云图如图 13 所示。

由图可知, 轴承底部内侧环状区域是应变最大的部位, 该部位出现了较少的应变集中, 将应变集中部位放大显示如图 14 所示。当缓冲衬垫厚度为 12 mm 时, 轴承的最大应变为  $1.660 \times 10^{-3}$ ; 当缓冲衬垫厚度为 17 mm 时, 轴承的最大应变为  $1.288 \times 10^{-3}$ 。这 2 种情形下的应变值都较小, 不会导致试验轴承产生塑性变形或损坏, 这说明 HL-1029 有机硅胶圆柱形衬垫的缓冲性能良好, 完全可以满足对精密轴承的保护需求。



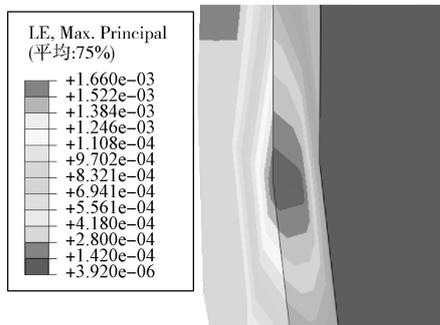
a) 缓冲衬垫厚度为 12 mm



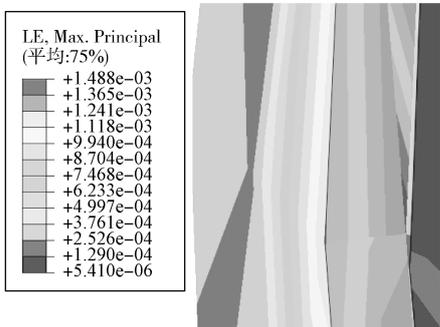
b) 缓冲衬垫厚度为 17 mm

图 13 轴承跌落时的等效应变分布云图

Fig. 13 Equivalent strain distribution nephogram of bearing at falling



a) 缓冲衬垫厚度为 12 mm



b) 缓冲衬垫厚度为 17 mm

图 14 轴承底部内侧应变集中放大云图

Fig. 14 Concentrated enlarged cloud image of strain on inner side of bearing bottom

## 4 结论

本文对 HL-1029 有机硅胶试件和缓冲衬垫进行了理论和试验分析, 可得如下结论:

1) 通过试验和计算得出, 以 HL-1029 有机硅胶作为原材料制备的用来包装高精精密轴承的缓冲衬垫的最小厚度为 12 mm。

2) 利用有限元软件, 对用 HL-1029 有机硅胶缓冲衬垫包装的高精密轴承进行跌落模拟, 得到轴承的

应力和应变云图。结果表明, 跌落时高精精密轴承受到的应力未超过许用值, 且应变量较小, 缓冲衬垫的缓冲性能良好, 可以满足高精精密轴承的防护需求。

3) HL-1029 有机硅胶套杯型缓冲垫可用作包装高精精密轴承。

## 参考文献:

- [1] YAO B B, ZHEN P, WU L F, et al. Rolling Element Bearing Fault Diagnosis Using Improved Manifold Learning[J]. IEEE Access, 2017, 5: 6027-6035.
- [2] HAN Q K, LI X L, CHU F L. Skidding Behavior of Cylindrical Roller Bearings Under Time-Variable Load Conditions[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 135: 203-214.
- [3] 张振宇, 田野, 刘伟, 等. 航空轴承 PDMS 缓冲包装垫的缓冲性能研究[J]. 包装工程, 2019, 40(1): 75-79.  
ZHANG Zhenyu, TIAN Ye, LIU Wei, et al. Cushioning Property of Aviation Bearing PDMS Cushion Package Pad[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(1): 75-79.
- [4] 闫国斌, 张振宇, 田野. 航空精密轴承的包装缓冲性能研究[J]. 轴承, 2017(3): 39-41, 44.  
YAN Guobin, ZHANG Zhenyu, TIAN Ye. Research on Cushion Performance of Special Bearing Package[J]. Bearing, 2017(3): 39-41, 44.
- [5] TIAN Y, CUI J G, YANG F, et al. Protection Performance of New Polydimethylsiloxane Packaging Method for Aero-Engine Precision Bearings[J]. IEEE Access, 2019, 7: 163003-163012.
- [6] 孙斌, 孟艳艳, 王清, 等. 大型圆锥滚子轴承成品包装改进[J]. 安阳工学院学报, 2018, 17(6): 16-19.  
SUN Bin, MENG Yanyan, WANG Qing, et al. Improvements on Finished Products Packing of Large Taper Roller Bearing[J]. Journal of Anyang Institute of Technology, 2018, 17(6): 16-19.
- [7] KEDAMBAIMOOLE V, SHIRHATTI V, NEELLA N, et al. PDMS Encapsulated Graphene-Nickel Composite Film as Flexible Tactile Sensor[C]//2017 IEEE SenSORS. Glasgow: IEEE, 2017: 214-221.
- [8] 美国材料与试验协会. 用橡胶制品制备试验用的橡胶试片的标准实施规则: ASTM D 3183—2002[S]. [出版地不详]: 美国材料与试验协会, 2002: 1-2.  
American Society for Testing and Materials. Standard Practice for Rubber-Preparation of Pieces for Test

- Purposes from Products: ASTM D 3183—2002[S]. [S. 1.]: American Society for Testing and Materials, 2002: 1-2.
- [9] 中橡集团沈阳橡胶研究设计院. 硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定: GB/T 528—2009/ISO 37[S]. [出版地不详]: 中橡集团沈阳橡胶研究设计院, 2009: 4-7.
- Shenyang Rubber Research and Design Institute of China Rubber Group. Rubber, Vulcanized or Thermoplastic-Determination of Tensile Stress-Strain Properties: GB/T 528—2009/ISO 37[S]. [S. 1.]: Shenyang Rubber Research and Design Institute of China Rubber Group, 2009: 4-7.
- [10] 高德, 计宏伟. 包装动力学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2010: 211-245.
- GAO De, JI Hongwei. Packaging Dynamics[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2010: 211-245.
- [11] 国际安全运输协会. 国际包装产品性能试验标准: ISTA 1A—2001[S]. [出版地不详]: 国际安全运输协会, 2001: 6-7.
- International Safe Transit Association. International Packaging Product Performance Test Standard: ISTA 1A—2001[S]. [S. 1.]: International Safe Transit Association, 2001: 6-7.
- [12] 赵鑫, 黄翔, 江一帆, 等. 超弹性材料缓冲均匀性的有限元仿真与优化[J]. 航空制造技术, 2018(1/2): 82-87, 97.
- ZHAO Xin, HUANG Xiang, JIANG Yifan, et al. Finite Element Simulation and Optimization of Cushioning Uniformity of Hyperelastic Materials[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018(1/2): 82-87, 97.

(责任编辑: 邓光辉)

## Experimental Study on the Performance of High Precision Bearing Cup Cushion

XU Boyi, YU Lei, TIAN Ye

(Department of Packaging Engineering, Harbin Commercial University, Harbin 150028, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of cushion packaging of high precision bearing, HL-1029 organic silica gel was used to make the cup cushion of the high precision bearing. First, the HL-1029 organic silica gel material test piece was made, and its uniaxial tensile test was carried out. The test results were analyzed and calculated, and it was found that the least thickness of HL-1029 organic silica gel used as cushion packing liner of the high precision bearing should be 12 mm. Then, the drop simulation test was carried out with the high-precision bearing packed with 12 mm and 17 mm thick organic silica gel cushion, and the stress and strain nephogram of the shaft during the drop was obtained. According to the test results, the HL-1029 organic silica gel cushion could effectively protect the high-precision bearing.

**Keywords:** organic silica gel; cushion pad; hyperelasticity; high precision bearing