

航空轴承 PDMS 缓冲包装垫的缓冲性能研究

张振宇¹, 田野², 刘伟³, 智慧², 孙智慧², 陈萌萌², 苑攀攀²

(1.中国航发哈尔滨轴承有限公司, 哈尔滨 150025; 2.哈尔滨商业大学, 哈尔滨 150028;
3.黑龙江八一农垦大学, 大庆 163319)

摘要: **目的** 针对目前航空发动机主轴轴承无缓冲包装的问题, 提出基于聚二甲基硅氧烷(PDMS)制作航空发动机轴承缓冲包装的方法。**方法** 依据参考文献对双组份的PDMS进行配比, 通过静态压缩试验得到数据, 并绘制PDMS缓冲衬垫的缓冲系数-应力曲线, 再经计算得到缓冲垫的最小厚度值, 并依此为依据对航空轴承进行浇筑包装, 通过模拟产品在运输过程中的跌落试验, 验证以PDMS材料制作缓冲衬垫的可行性。**结果** 当PDMS垫层厚度为30 mm时, 轴承受到的冲击加速度均小于 1.1 km/s^2 。**结论** 该方法能够为航空轴承提供保护作用。

关键词: 缓冲包装; PDMS; 航空轴承; 跌落试验

中图分类号: TB485.3; TB482.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)01-0075-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.01.011

Cushioning Property of Aviation Bearing PDMS Cushion Package Pad

ZHANG Zhen-yu¹, TIAN Ye², LIU Wei³, ZHI hui², SUN Zhi-hui², CHEN Meng-meng², YUAN Pan-pan²
(1.AECC Harbin Bearing Co., Ltd., Harbin 150025, China; 2.Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China;
3.Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a method based on PDMS to fabricate the cushion package for aviation engine bearing, in view of the defect that the current main shaft bearing of the aviation engine has no cushion package. According to the reference, the two-component PDMS was matched, the data were obtained through static compression test, and the buffer coefficient-stress curve of PDMS cushion pad was drawn. Then, the minimum thickness value of the cushion pad was calculated. Based on this, the aviation bearing was poured and packaged. The feasibility of making cushion pad from PDMS material was verified through the drop test of simulated products during transportation. The impact acceleration of the bearing was less than 1.1 km/s^2 when the PDMS cushion thickness was 30 mm. The method can provide protection for aviation bearings.

KEY WORDS: cushion package; PDMS; aviation bearing; drop test

轴承是航空发动机中的重要零部件,其质量决定飞机的性能和寿命,但其在运输搬运过程中,由于跌落和振动冲击,导致轴承接触表面质量下降^[1-4]。产品包装中的缓冲衬垫能够减小流通过程中的冲击和振动,使其减小到轴承所能承受的范围内,进而延长保质期提高产品附加值,因此对于缓冲包装的研究至关重要。

赵鑫等^[5]建立了能够反映超弹性缓冲垫接触应力均匀性的评估模型,通过对聚四氟乙烯缓冲垫仿真结果的分析,建立了减小摩擦因数、改变缓冲垫结构等2种优化模型,并通过超弹性缓冲垫加载脆性结构件的试验,对有限元模型的有效性进行了验证。卢立新等^[6]提出运输过程中纸板的缓冲性能随着振动次

收稿日期: 2018-08-14

基金项目: 哈尔滨商业大学青年创新人才支持项目(2016QN067); 哈尔滨商业大学博士科研启动资助项目(2016BS07)

作者简介: 张振宇(1984—),男,硕士,工程师,主要研究方向为轴承结构技术及其防护技术。

数和强度的增加而降低。申展等^[7]通过将聚乙烯泡沫压缩试验数据引入仿真分析软件中,对缓冲包装件的跌落冲击进行仿真模拟,验证了其可行性和有效性,为非线性缓冲系统的有限元分析提供了参考。王志伟等^[8]研究了蜂窝纸板抗反复低强度冲击的能力,提出了其力学变化规律。Wang^[9-10]等建立了能为产品包装系统的跌落损伤预估提供理论基础的瓦楞纸板动力学行为耦合方程。高德^[11]等建立了发泡聚乙烯缓冲材料动态非线性本构模型,并基于此提出了多自由度包装系统动力学方程。随后基于最优解的结构,测试了发泡聚乙烯缓冲系统的加速度响应值,并对计算与试验结果进行误差分析,得出平均相对误差都在0.8%以内,此方法克服了最大加速度-静应力曲线不能设计多自由度缓冲包装设计的弊端。Griffiths^[12]提出调制均方根和加速度功率密度谱这2个概念来作为衡量包装件破损程度的重要指标。

文中提出一种采用PDMS材料作为航空轴承缓冲包装垫的方法,拟通过对双组份AB料进行配比,选择最优比例对PDMS有机硅胶材料进行静态压缩试验,并计算缓冲系数-应力曲线,为缓冲衬垫厚度计算提供理论基础。在实验室环境下模拟产品在运输过程中的跌落高度,通过对数据的分析与整理,验证PDMS的缓冲衬垫性能是否满足要求。

1 PDMS 双组份配比及静态压缩试验

聚二甲基硅氧烷为热塑性弹性体,是一种固态时无毒,具有疏水和防水性,且不易燃的透明弹性硅胶体,已广泛应用于材料合成及工业领域,可将其应用于航空轴承的全封闭式包装。在应用中PDMS表现出良好的透明可视性,可应对不同形状轴承的普遍适用性、缓冲性能优良。

基于已有文献^[13-14]对双组份PDMS材料A液(二甲基硅油)B液(固化剂)不同的质量比进行了研究,采用质量比为10:1,10:1.5,10:3的AB液,均匀搅拌,并在室温(23℃)下静置24h,其中双组份质量比为10:1的PDMS压缩试样见图1。若质量比低于10:1,即固化剂混合比例低于1,则PDMS呈粘稠状,很难固化成弹性固体。



图1 双组份的质量比为10:1的PDMS压缩试样
Fig.1 PDMS compression samples with two-component mass ratio of 10:1

采用压力试验机对固化后的PDMS样品进行静态压缩试验,测得了此材料的压力-位移曲线,进而计算出缓冲材料的应力-缓冲系数曲线。试验样品为不同配比的PDMS经固化后静置24h以上的稳定透明高弹态固体,质量比分别为10:1,10:1.5,10:3,每种配比取3份。设定压缩试验机以12.5mm/min的速度沿厚度方向对试验样品逐渐增加载荷,直至样品完全被压溃形变。逐次对样品进行压缩试验,并记录压缩过程中相对应的压力和形变量数据,拟合成应力-应变(σ - ε)曲线,见图2。

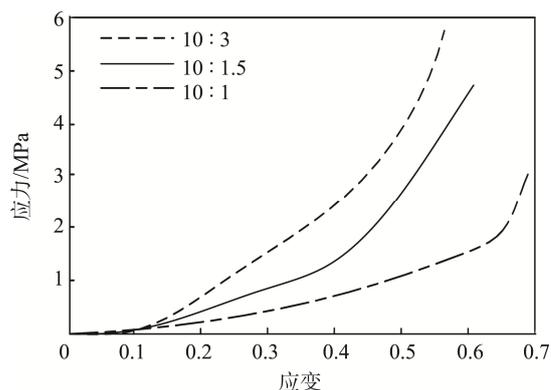


图2 不同配比的应力-应变曲线
Fig.2 Stress-strain curves of different ratios

从图2和图3可看出,在同样加载条件下,质量比为10:1的PDMS试样产生的应变最大,且对应的缓冲系数最小。

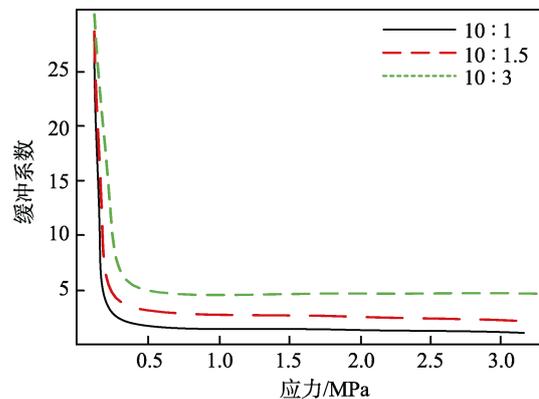


图3 PDMS缓冲系数-最大应力曲线
Fig.3 PDMS buffer coefficient-maximum stress curve

2 PDMS 缓冲垫厚度计算

航空用轴承的缓冲包装采用全面覆盖的缓冲形式,其外径为180mm,内径为128mm,质量为3kg。航空轴承属于飞机零件,因此其脆值不能高于110g。此外,根据军用轴承包装标准^[15]确定跌落高度为0.7m。轴承与缓冲衬垫接触面积为:

$$A = \pi R_1^2 - \pi r_1^2 = 0.021 \text{ m}^2 \quad (1)$$

式中: A 为轴承与衬垫接触面积; R_1 为轴承外圈

外表面半径； r_1 为轴承内圈内表面半径。

缓冲衬垫受最大应力为：

$$\sigma_m = \frac{WG}{A} = 0.18 \text{ MPa} \quad (2)$$

式中： σ_m 为轴承所受应力； W 为轴承的重力； G 为轴承的脆值。

规定缓冲材料为 PDMS，选用质量比为 10 : 1。由图 4 可知接触应力 0.18 MPa 对应的最小缓冲系数为 5。则缓冲衬垫的厚度为：

$$d = \frac{Ch}{G} = 29.17 \text{ mm} \quad (3)$$

式中： d 为轴承缓冲衬垫厚度； h 为包装件跌落高度。衬垫厚度至少为 29.17 mm 才能达到缓冲要求，因此，PDMS 缓冲衬垫的厚度确定为 30 mm。

3 跌落试验及其结果分析

航空用的航空轴承在运输过程中由于交通工具、路面、行驶状态以及搬运等因素，会受到冲击，导致轴承滚动体与内外圈及保持架的表面产生碰撞，影响了航空轴承的表面质量。该试验通过整体包装件的自由跌落测试，得到轴承受到的冲击加速度变化情况，用以衡量缓冲包装性能。实验选用跌落包装试验设备为 DJ-100B 单臂跌落机、加速度传感器及其数据分析采集仪，试验样件及传感器见图 4，设备见图 5。

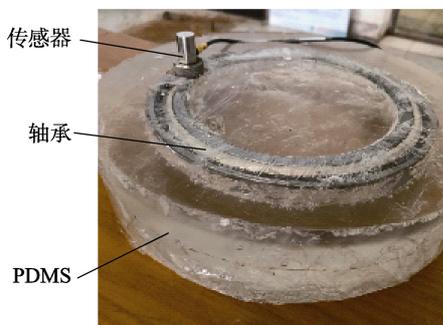


图 4 试验样件及传感器实物
Fig.4 Test sample and sensor

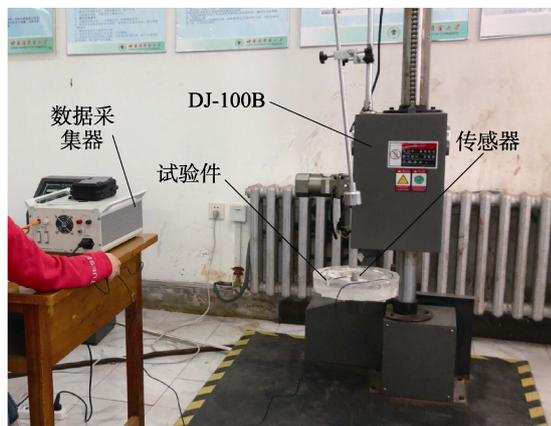


图 5 跌落试验设备组成实物

Fig.5 Material objects of components of the drop test equipment

跌落试验的准备及试验方法均按照 GB/T 4857 系列标准进行。每组有若干个试验，每个试验进行 4 次并取其结果的平均值。对无缓冲衬垫的轴承分别进行 400, 550 mm 跌落试验，由于 700 mm 跌落高度产生的加速度超过传感器量程，因此无法进行试验。对 PDMS 缓冲包装件分别进行多次 400, 550, 700 mm 跌落试验，缓冲衬垫厚度为 30 mm。无缓冲包装和有缓冲包装分别在 550 mm 高度上跌落时，轴承受到的冲击加速度曲线见图 6 和图 7。

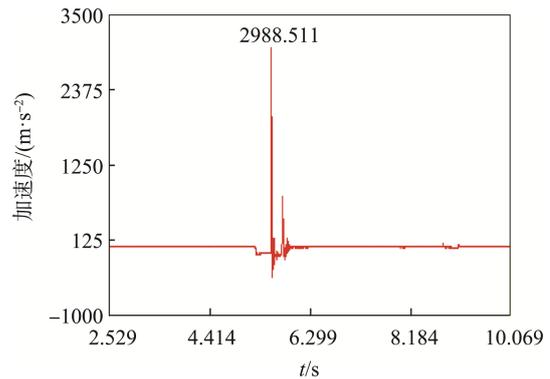


图 6 无缓冲包装的冲击加速度曲线
Fig.6 Impact acceleration curve of uncushioned packaging

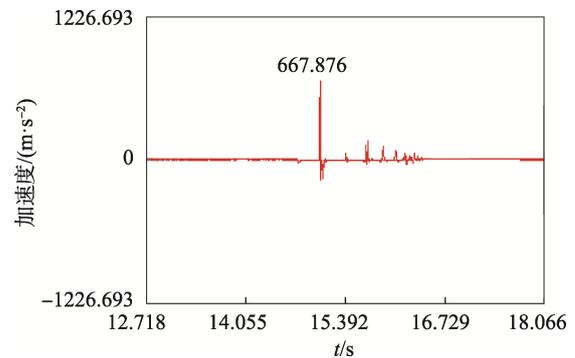


图 7 有缓冲包装的冲击加速度曲线
Fig.7 Impact acceleration curve with cushion package

无缓冲衬垫轴承单独跌落试验数据及轴承单独跌落加速度柱状图分别见表 1 和图 8。由图 8 可知，轴承单独在 400 mm 和 550 mm 的高度跌落时最大加速度分别为 1832 m/s² 和 3397.08 m/s²。由表 1 可知，加速度平均值为 1515.679 m/s² 和 2598.219 m/s²。该值超过航空产品的需用脆值 110g，因此无包装情况下跌落轴承极易损坏。

表 1 无缓冲衬垫轴承单独跌落试验数据

Tab.1 Single drop test data for bearings without cushioning liner m/s²

高度/ mm	a_1	a_2	a_3	a_4	均值
400	1611.04	1832.26	1432.65	1636.75	1515.67
550	2988.51	2396.23	1611.04	3397.08	2598.21

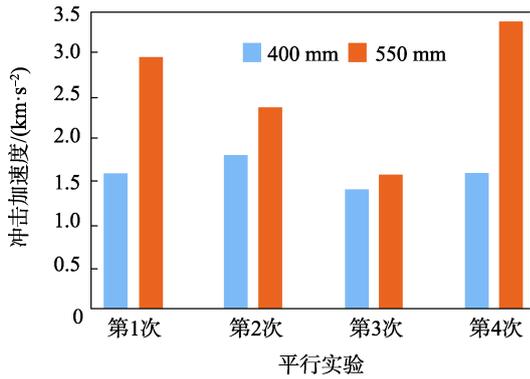


图8 无缓冲衬垫在不同高度跌落的加速度

Fig8 Acceleration of uncushioned liner at different drop heights

PDMS 缓冲垫轴承包装件跌落测试试验数据及包装件在不同高度跌落的加速度见表 2 和图 9, 可知采样 PDMS 缓冲垫的包装件在 400, 550, 700 mm 的高度上自由跌落时受到的冲击加速度均小于 1100 m/s²。

表2 PDMS 缓冲垫轴承包装件跌落测试试验数据
Tab.2 PDMS cushion bearing package drop test data

高度/ mm	$a_1/(m \cdot s^{-2})$	$a_2/(m \cdot s^{-2})$	$a_3/(m \cdot s^{-2})$	$a_4/(m \cdot s^{-2})$	平均值/ (m·s ⁻²)
400	510.481	578.892	613.863	517.113	555.087
550	667.876	646.546	651.677	680.811	661.728
700	785.283	833.883	793.697	830.949	810.953

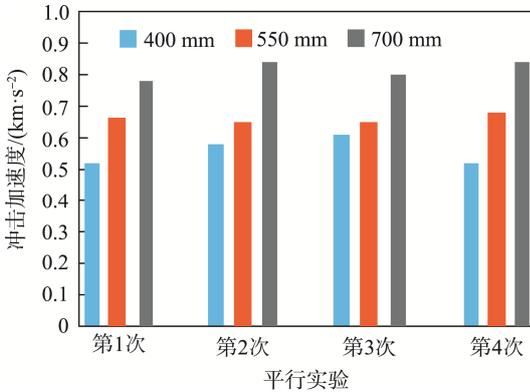


图9 包装件在不同高度跌落的加速度

Fig.9 Acceleration of the package falling at different heights

有无 PDMS 衬垫的轴承在跌落过程中所受到的冲击加速度对比见图 10, 可看出 PDMS 衬垫可有效

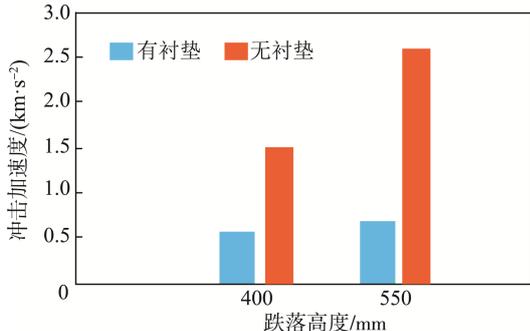


图10 在相同高度有无衬垫跌落的加速度对比

Fig.10 Acceleration contrast with or without liner falling at the same height

减小轴承受到的冲击加速度。厚度为 30 mm 的缓冲衬垫可以使轴承所受到的冲击加速度大大减小。

4 结语

1) 对 PDMS 双组份 AB 料进行配比及静态压缩试验, 根据缓冲系数确定选择质量比为 10 : 1 的方式制造 PDMS 缓冲垫。

2) 通过计算得到缓冲衬垫厚度为 29.17 mm, 并确定对轴承进行固化全封闭包装。

3) 通过模拟产品在运输过程的跌落, 采集轴承受到的冲击加速度, 通过对比可知有 PDMS 缓冲衬垫的轴承受到的冲击加速度小于产品脆值。

参考文献:

- [1] 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—44.
YAN Guo-bin, ZHANG Zhen-yu, TIAN Ye. Study on Packaging Cushioning Performance of Aero Precision Bearings[J]. Bearing, 2017(3): 39—44.
- [2] 张振宇, 智慧, 田野, 等. 精密轴承预紧力定位包装研究[J]. 包装工程, 2017, 38(9): 178—182.
ZHANG Zhen-yu, ZHI Hui, TIAN Ye, et al. Research on Positioning and Packing of Precision Bearing Pre-tightening Force[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(9): 178—182.
- [3] 张咏晖. 轴承的管理[J]. 一重技术, 2002(4): 109—110.
ZHANG Yong-hui. Bearing Management[J]. CFHI Technology, 2002(4): 109—110.
- [4] 孔雯. 滚动轴承包装材料展望[J]. 轴承, 1966(1): 68.
KONG Wen. Prospect of Rolling Bearing Packaging Materials[J]. Bearing, 1966(1): 68.
- [5] 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, 61(2): 81—85.
ZHAO Xin, HUANG Xiang, JIANG Yi-fan, et al. Finite Element Simulation and Optimization of Buffer Uniformity of Hyperelastic Materials[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(2): 81—85.
- [6] 卢立新, 孙聚杰, 王军. 疲劳振动效应对瓦楞纸板承载能力与缓冲性能的影响[J]. 振动与冲击, 2012, 31(2): 43—48.
LU Li-xin, SUN Ju-jie, WANG Jun. The Effects of Fatigue Vibration on Carry Capacity and Cushion Properties of Corrugated Board[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(2): 43—48.
- [7] 申展, 陈东, 罗俊杰. 聚乙烯泡沫缓冲系统跌落冲击过载仿真分析[J]. 包装工程, 2016, 37(19): 128—132.
SHEN Zhan, CHEN Dong, LUO Jun-jie. Simulation Analysis of Drop Impact Overload of Polyethylene

- Foam Cushioning System[J]. *Packaging Engineering*, 2016, 37(19): 128—132.
- [8] 王志伟, 王立军, 徐晨翼. 多次低强度冲击对蜂窝纸板缓冲性能的影响[J]. *应用力学学报*, 2015, 32(3): 31—35.
WANG Zhi-wei, WANG Li-jun, XU Chen-yi. Influence of Many Low Strength Impact on the Cushioning Properties of the Honeycomb Paperboard[J]. *Chinese Journal Applied Mechanics*, 2015, 32(3): 31—35.
- [9] WANG J, KHAN Y, YANG R H, et al. Dynamical Behaviors of a Coupled Cushioning Packaging Model with Linear and Nonlinear Stiffness[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2013, 38(6): 1625—1629.
- [10] WANG J, DUAN F, JIANG J, et al. Dropping Damage Evaluation for a Hyperbolic Tangent Cushioning System with a Critical Component[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2012, 18(10): 1417—1421.
- [11] 高德, 卢富德. 聚乙烯缓冲材料多自由度跌落包装系统优化设计[J]. *振动与冲击*, 2012, 3(31): 70—74.
GAO De, LU Fu-de. Optimization Design of Multi Degree of Freedom Drop Packaging System for Polyethylene Cushioning Material[J]. *Vibration and Shock*, 2012, 3(31): 70—74.
- [12] GRIFFITHS K, SHIRES D, WHITE W, et al. Correlation Study Using Scuffing Damage to Investigate Improved Simulation Techniques for Packaging Vibration Testing[J]. *Packaging Technology and Science*, 2013, 26(7): 373—383.
- [13] 何鱼, 刘毅, 杨银堂. 基于PDMS衬底的可延展柔性倒F天线设计[J]. *中国科学: 信息科学*, 2018, 6(48): 724—733.
HE Yu, LIU Yi, YANG Yin-tang. Design of Extensible Flexible Inverted F Antenna Based on PDMS Substrate[J]. *Chinese Science: Information Science*, 2018, 6(48): 724—733.
- [14] 姜亮, 马国亮, 王晓雷. PDMS表面织构润滑特性的研究[J]. *摩擦学学报*, 2010, 3(30): 262—268.
JIANG Liang, MA Guo-liang, WANG Xiao-lei. Study on the Lubrication Characteristics of PDMS Surface Texture[J]. *Tribology Journal*, 2010, 3(30): 262—268.
- [15] 高德, 计宏林. 包装动力学[M]. 北京: 中国轻工出版社, 2009.
GAO De, JI Hong-lin. *Packaging Dynamics*[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2009.