

步进电机驱动器和 EPE 衬垫配合间隙与振动关系

李国志^{a,b,c}, 刘鸿梅^{a,b,c}, 孙德强^{a,b,c}, 李彬^{a,b,c}, 石威^{a,b,c}

(陕西科技大学 a.陕西省造纸技术及特种纸品开发重点实验室 b.中国轻工业纸基功能材料重点实验室
c.轻化工程国家级实验教学示范中心, 西安 710021)

摘要: **目的** 为确定步进电机驱动器和 EPE 衬垫的配合间隙与振动的关系。**方法** 选取步进电机驱动器为研究对象, 以密度为 20, 28, 32 kg/m³ 的 EPE 衬垫为隔振包装, 研究对象与衬垫在垂直方向的配合间隙为 -4, -2, 0, 2, 4 mm。定制木质夹具的密度为 32 kg/m³, 配合间隙为 -4 mm 的 EPE 衬垫模型, 参照 ASTM-D4169 随机振动试验部分的 PSD 功率谱密度曲线, 进行随机振动试验分析。依据试验结果, 修正该包装件的仿真模型、接触方式、网格划分等, 仿真结果与试验结果的 RPSD 曲线吻合程度良好。依据该包装件的仿真设置, 对密度为 20, 28 kg/m³ 的系列配合包装件进行仿真分析。**结果** 同一密度 EPE 衬垫, 间隙配合比过盈配合振动强度低, 0 mm 配合的 RMS 值最小, 振动强度最低。同一配合间隙, 过盈配合时, EPE 衬垫密度越低, RMS 值越小, 振动强度越低; 间隙配合时, EPE 衬垫密度越高, RMS 值越低, 振动强度越低。**结论** 采用 EPE 衬垫包装步进电机驱动器时, 在同密度衬垫和同量级的外界激励下, 0 mm 配合隔振性能最佳, 间隙配合隔振性能优于过盈配合。

关键词: 步进电机驱动器; EPE 衬垫; 配合间隙; 振动关系

中图分类号: TB485.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2021)05-0142-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.05.018

Relationship between Vibration and Fit Clearance of Stepper Motor Driver and EPE Cushion Foam

LI Guo-zhi^{a,b,c}, LIU Hong-mei^{a,b,c}, SUN De-qiang^{a,b,c}, LI Bin^{a,b,c}, SHI Wei^{a,b,c}

(a.Shaanxi Provincial Key Laboratory of Papermaking Technology and Specialty Paper Development b.Key Laboratory of Paper Based Functional Materials of China National Light Industry c. National Demonstration Center for Experimental Light Chemistry Engineering Education, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to determine the relationship between vibration and fit clearance of stepper motor driver and EPE cushion foam. The stepper motor drivers were selected as the research product and EPE cushion foam with densities of 20, 28 and 32 kg/m³ were used as vibration isolation packaging. The fit clearance between the product and the EPE cushion foam in the vertical direction was -4, -2, 0, 2 and 4 mm. Customized wooden fixture and EPE cushion foam model with the density of 32 kg/m³ and the fit clearance of -4 mm were used for random vibration test analysis according to the PSD power spectral density curve of American ASTM-D4169. According to the test results, the simulation model, contact, mesh generation, etc. of the corresponding type of package were modified until the simulation results were in

收稿日期: 2020-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(51575327); 陕西省教育厅重点实验室及基地项目(16JS014); 陕西省教育厅 2014 陕西本科高校专业综合改革试点子项目(陕教高[2014]16号)

作者简介: 李国志(1979—), 男, 陕西科技大学教授, 主要研究方向为缓冲包装动力学、运输包装及包装结构设计。

通信作者: 孙德强(1976—), 男, 陕西科技大学教授、博导, 主要研究方向为包装系统的结构、性能与设计。

good agreement with the RPSD curve of the test results. According to the simulation setting of the package, the series of fit packages with densities of 20 and 28 kg/m³ were simulated and analyzed. For the EPE cushion foam with the same density, the vibration intensity of clearance fit was lower than that of interference fit. The RMS value and vibration intensity were the lowest at 0 mm fit. For the same fit, the lower the EPE cushion foam density was, the smaller the RMS value was and the lower the vibration intensity was at interference fit. The higher the EPE cushion foam density was, the smaller the RMS value was and the lower the vibration intensity was at clearance fit. When EPE cushion foam is used to pack the stepper motor driver, the vibration isolation performance of 0 mm fit is the best and the vibration isolation performance of clearance fit is better than that of interference fit under the same density of EPE cushion foam and level of external excitation.

KEY WORDS: stepper motor driver; EPE cushion foam; fit clearance; vibration relationship

聚乙烯泡沫 (EPE) 具有优良的耐化学性能和缓冲保护性能, 广泛应用于电子产品、家用电器、军工等^[1-5]。在包装领域, EPE 泡沫多作为缓冲隔振衬垫以保护产品。目前, 针对 EPE 泡沫的相对密度和缓冲性能等方面的研究较多, 而针对与产品的配合间隙对振动特性的影响方面的研究较少。在配合间隙方面, 邹广平等^[6]对金属橡胶减振器进行了随机振动试验, 发现预紧量较小时的误差较大, 而随预紧量的增加误差逐渐减小。当预紧量增大到一定值后, 误差却增大。应用振动试验中 Harmonic 谱的估计方法, 李太平等^[7]发现在相同的预紧力下, 外界激励的量级不同, 则结构具有不同的特性表现。在包装行业, 包装工程师在产品运输包装的过程中, 会依据经验确定产品和隔振包装配合的间隙。在符合优良的隔振效果前提下, 产品与包装过盈配合, 会造成产线工人装配费时费力, 因此两者的配合间隙与其振动结果的影响在工程师设计运输包装的过程中, 具有重要的研究意义。

1 包装系统模型及材料属性

1.1 产品模型建立

产品的质量为 1.5 kg, 外尺寸为 202 mm×147 mm×78 mm。使用 Creo parametric 5.0, 建立步进电机驱动器的模型。由于产品模型过于复杂, 为节省计算时间和计算成本, 此次模型基于仿真要求对产品进行简化, 将电路板上的电回路简化为 1 块平板, 简化所有的螺钉和焊点, 保留产品其他部件的外形, 见图 1, 然后再将模型以 x-t 格式导入 Ansys Workbench 软件中进行分析。

1.2 隔振包装模型建立

为研究步进电机驱动器和 EPE 衬垫配合间隙与振动, 该隔振包装采用左右半包裹式模型, 产品与衬垫前后左右接触面的间隙为 0 mm, 上下接触面分别取 5 种不同间隙 (-4, 2, 0, 2, 4 mm), 见图 2。

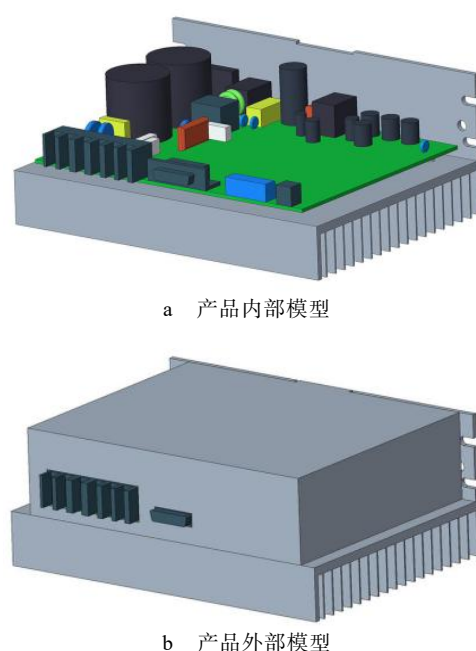


图 1 步进电机驱动器模型
Fig.1 Model of stepper motor driver

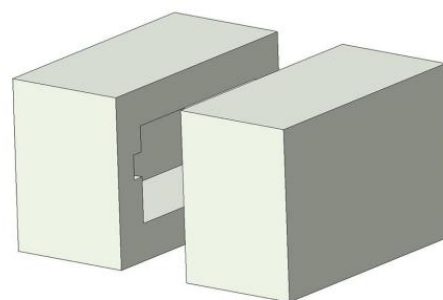


图 2 隔振包装模型
Fig.2 Model of vibration isolation package

1.3 材料属性

1.3.1 弹性模量

根据 GB/T 8168—2008《包装用缓冲材料静态压缩试验方法》^[8]单轴压缩一次成型 EPE, 得到力-位移

曲线, 由式 (1—2) 转化为应力-应变曲线, 对该曲线的弹性阶段线性拟合, 其斜率即为密度 20, 28, 32 kg/m³ EPE 的弹性模量, 见图 3—4。

$$\sigma = \frac{p}{A} \quad (1)$$

式中: σ 为应力; p 为施加的载荷; A 为试样原始的截面积。

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2)$$

式中: ε 为应变; L 为试样变形后的总长度; L_0 为试样的原始长度。

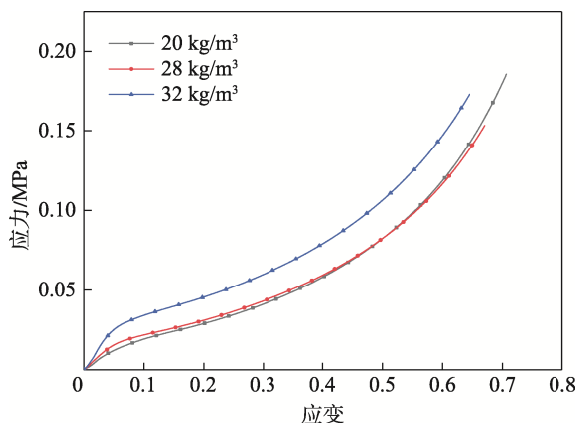


图 3 一次成型 EPE 单轴压缩试验应力-应变曲线
Fig.3 Stress-strain curve of a formed EPE uniaxial compression test

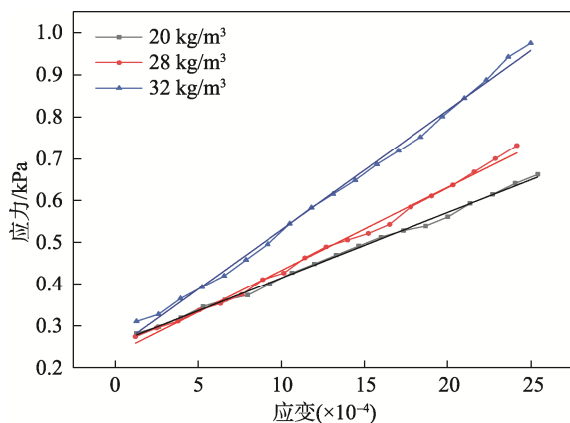


图 4 一次成型 EPE 单轴压缩试验的弹性部分及拟合方程
Fig.4 Elastic part and fitting equation of a formed EPE uniaxial compression test

1.3.2 泊松比

当试样直接置于万能材料试验机的夹头内时, 由于夹持部分的试样发生大变形, 且夹头位置应力集中, 导致根切现象, 因此使用环氧树脂浸泡并固化试样的被夹持部分, 见图 5, 降低试样产生根切。根据 GB/T 6344—200《软质泡沫聚合材料拉伸强度和断裂伸长率的测定》^[9]单轴拉伸试样, 见图 6。在 EPE 试样表面使用黑色 0.5 mm 笔迹定位, 实验中利用摄像头监

测 EPE 试样纵向变形与横向变形, 然后截取试样拉伸前与断裂前的 2 张照片, 使用 Photoshop 软件中的矩形工具, 测出对角点的纵横距离, 进而计算泊松比。



图 5 拉伸试样
Fig.5 Tensile sample



图 6 单轴拉伸试验
Fig.6 Uniaxial tensile test

产品基板和电路元件的材料属性由供应商提供, 材料属性见表 1。

表 1 材料属性
Tab.1 Material properties

材料	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量/ MPa	泊松比
基板	2000	15 000	0.28
电路元件	1300	10 000	0.3
铝合金机体	2700	71 000	0.32
EPE	20	0.1571	0.29
	28	0.1992	0.315
	32	0.2857	0.325

2 随机振动

2.1 随机振动前处理

近年来,随着仿真技术的发展,CAE 分析在包装行业得到了广泛应用^[10-12]。在随机动态载荷下响应的统计结果可以用功率谱密度值-频率值的关系曲线来表示。该曲线图面积的开方根,即均方根值(Root Mean Square, RMS),是随机振动强度的度量。功率谱密度函数(Power Spectral Density, PSD)是随机变量的自相关函数频域分析的描述^[13-14]。自相关函数的表述,见式(3):

$$R(x) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T a(t)a(t+x)dt \quad (3)$$

式中: T 为振动周期; $a(t)$ 为随机载荷历程; t 为振动时间。

自相关函数在 $R(x)-x$ 图形可反映随机载荷的频率。

$R(x)$ 经傅里叶变换得, $F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R(x)e^{2\pi f x} dx$, 即 PSD 谱。

建立静态力学分析到模态分析再到随机振动分析的流程。静态力学分析时,在前处理阶段,Workbench 提供了 5 种不同的接触类型,即绑定接触、不分离接触、光滑接触、摩擦接触、粗糙接触^[15]。产品与衬垫接触方式采用摩擦接触,经测量,密度为 20, 28, 32 kg/m³ 的产品与衬垫间的摩擦因数分别为 0.2, 0.19, 0.23。产品内部电路元件、基板和机体外壳采用绑定接触,接触时将偏移量 offset 依次设置为 -4, -2, 0, 2, 4 mm; 然后施加载荷,给该包装系统施加重力加速度,且衬垫底部采用固定约束;网格划分时,参照 Mechanical 的网格划分;模态分析时,获得包装件的六阶频率和振型,在模态分析的基础上进行随机振动分析。

2.2 试验

为了提高试验准确性,结合设备及包装件尺寸制作专用木质夹具,见图 7。定制密度为 32 kg/m³,配合间隙为 -4 mm 的 EPE 衬垫,参照 ASTM-D4169 随机振动试验部分的 PSD 值,对包装件进行振动分析。依据试验结果,修正仿真模型、接触、网格划分等。仿真结果与试验结果的响应功率谱密度(Response Power Spectral Density, RPSD),见图 8,两者的曲线吻合程度良好。

依据密度为 32 kg/m³ 的 EPE 衬垫,配合间隙为 -4 mm 包装件的仿真设置,对密度为 20, 28 kg/m³ 的系列配合包装件进行仿真分析。

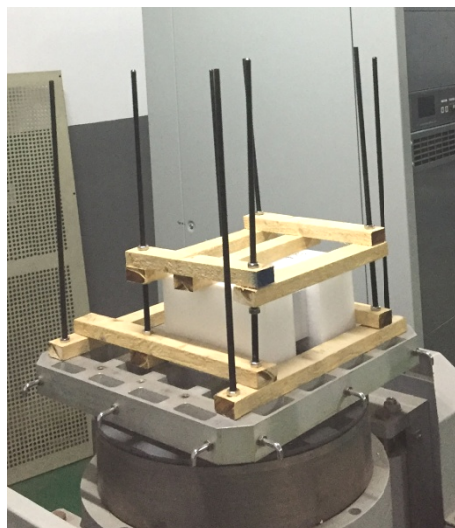


图 7 随机振动木质夹具
Fig.7 Wooden jig vibrating randomly

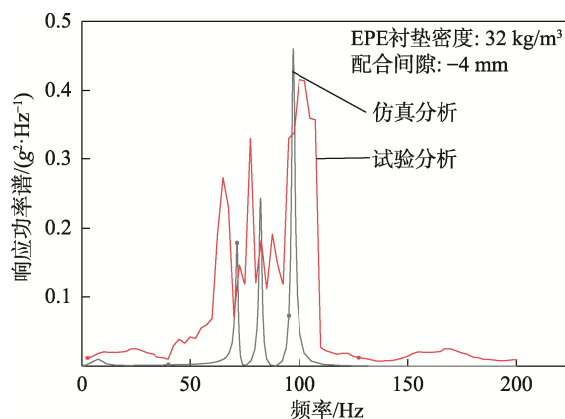


图 8 密度为 32 kg/m³, 过盈配合 4 mm 包装件随机振动试验和仿真结果

Fig.8 Random vibration test and simulation results of package with density 32 kg/m³ at an interference fit of 4 mm

3 结果分析

通过对产品与衬垫配合间隙随机振动的仿真进行分析研究,见图 9—11。在同量级的外界激励下,同一密度 EPE 衬垫与产品的间隙配合比过盈配合振动强度低。在低配合间隙时,缓冲衬垫将产品紧固包裹,更多的振动激励能量传递到产品上;当两者之间留有间隙时,振动激励较少地传递到产品上,产品受到了二次振动的输入。

由图 10—11 可知,在同一配合间隙,过盈配合时,EPE 衬垫密度越低,RMS 值越小,振动强度越低;间隙配合时,EPE 衬垫密度越高,RMS 值越低,振动强度越低。

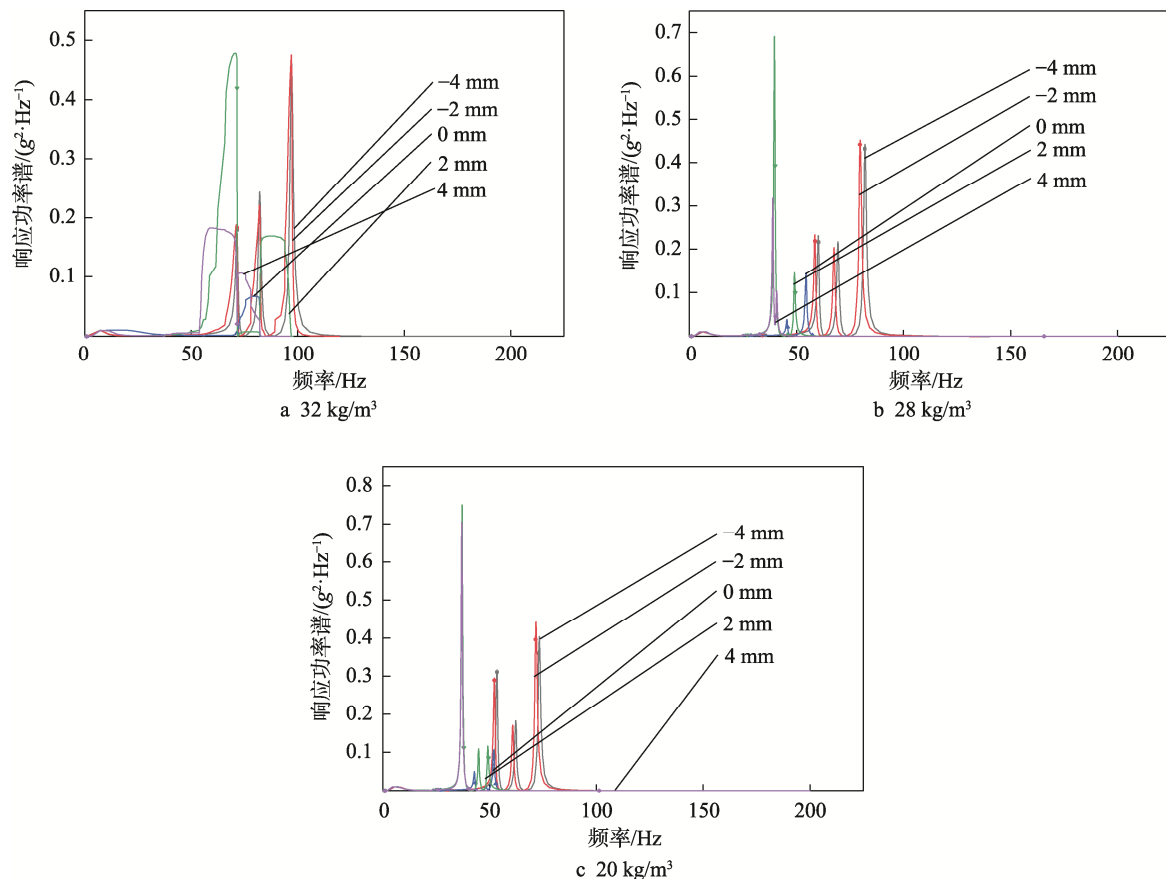


图 9 同一密度 EPE 衬垫系列配合间隙随机振动结果

Fig.9 Random vibration result of series fit clearance of EPE cushion foam with the same density

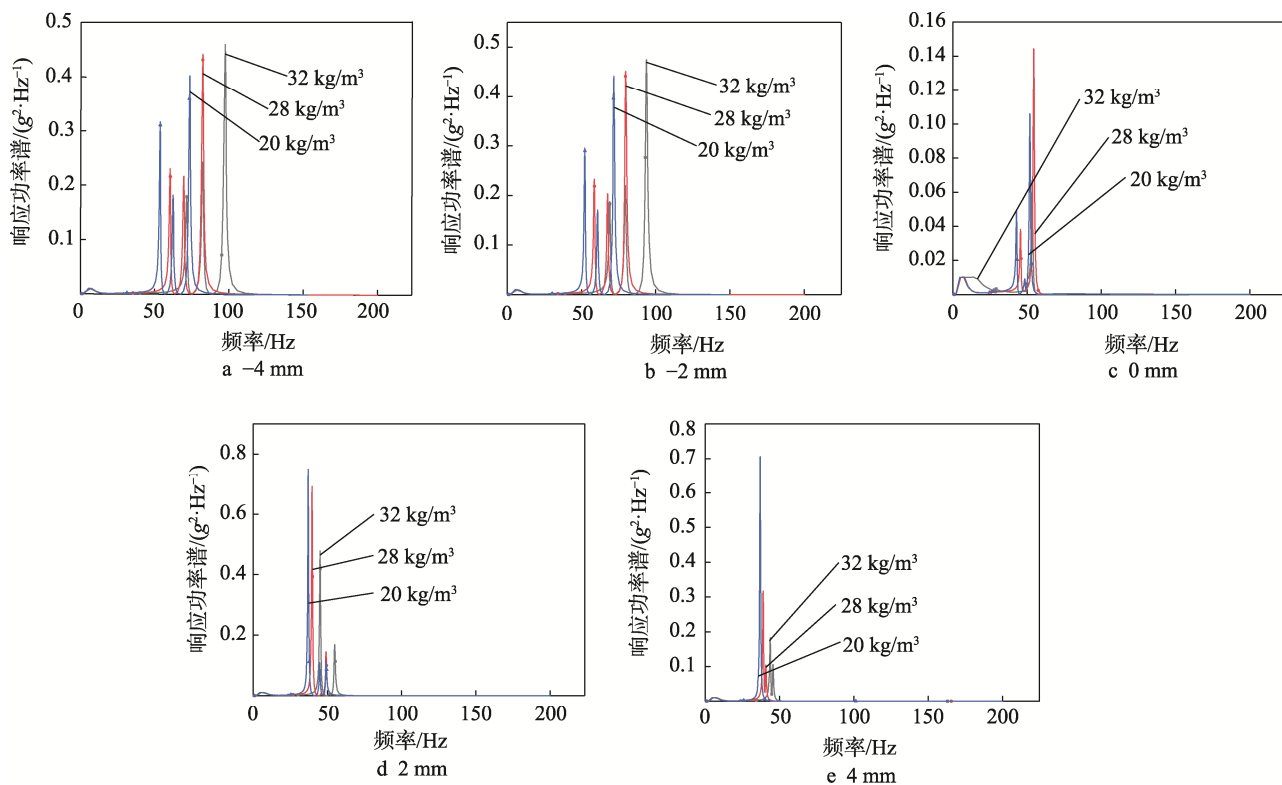


图 10 同一配合间隙系列密度随机振动结果

Fig.10 Random vibration result of the same series density under the same fit clearance

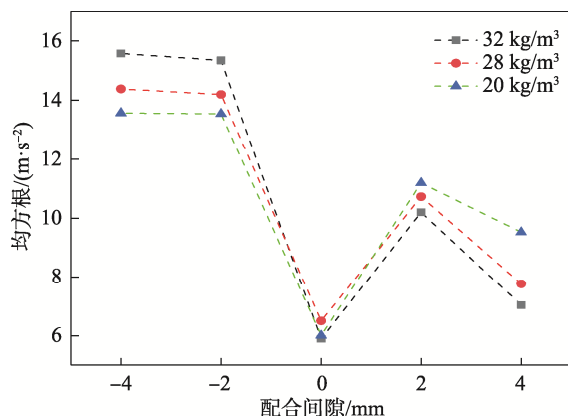


图 11 RMS 值
Fig.11 RMS value

4 结语

研究了步进电机驱动器和 EPE 衬垫配合间隙与振动的关系, 以密度为 20, 28, 32 kg/m³ 的 EPE 为隔振包装, 配合间隙为 2, 4, 0, -2, -4 mm。参照 ASTM-D4169 随机振动试验部分的 PSD 功率谱密度曲线, 进行随机振动分析, 试验与仿真 RPSD 曲线吻合程度良好。在同密度的 EPE 衬垫包装步进电机驱动器条件下, 0 mm 配合的隔振性能最佳, 间隙配合隔振性能优于过盈配合。该研究结果为包装工程师在设计运输包装时提供了参考, 具有重要的研究意义。

参考文献:

- [1] 李俊. 发泡聚乙烯缓冲性能的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010: 43—60.
LI Jun. Studies of Buffer Performance for Expanded Polyethylene[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010: 43—60.
- [2] 杨帅. EPE 缓冲性能的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2015: 11—16.
YANG Shuai. Research on Cushioning Properties of EPE[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2015: 11—16.
- [3] 霍银磊. 低密度泡沫塑料的结构及其力学行为研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008: 9—11.
HUO Yin-lei. The Study on the Structure and Mechanics Behavior of Low Density Foam Plastics[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008: 9—11.
- [4] 党楠茜. 新型建筑材料的应用现状与发展前景[J]. 山西建筑, 2019, 45(13): 70—71.
DANG Nan-xi. Application Status and Development Prospect of New Building Materials[J]. Shanxi Architecture, 2019, 45(13): 70—71.
- [5] 郭鹏, 徐耀辉. 聚乙烯发泡材料的研究进展[J]. 石油化工, 2015, 44(2): 261—266.
GUO Peng, XU Yao-hui. Progresses in Research of Polyethylene Foaming Materials[J]. Petrochemical

- Technology, 2015, 44(2): 261—266.
- [6] 邹广平, 刘泽, 程贺章, 等. 预紧量与振动量级对金属橡胶减振器振动特性影响研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(22): 173—177.
ZOU Guang-ping, LIU Ze, CHENG He-zhang, et al. Effects of Preloading and Vibration Level on the Vibration Characteristics of Metal Rubber Damper[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(22): 173—177.
- [7] 李太平, 江浩, 齐晓军, 等. 间隙预紧力对结构频率漂移影响的研究[C]// 第十二届全国振动理论及应用学术会议. 南宁, 2017: 240—246.
LI Tai-ping, JIANG Hao, QI Xiao-jun, et al. Study on Interval Preload's Influence on Structural Frequency Variations[C]// Nanning: Proceedings of the 12th National Conference on Vibration Theory and Application, 2017: 240—246.
- [8] GB/T 8168—2008, 包装用缓冲材料静态压缩试验方法[S].
GB/T 8168—2008, Test Method for Static Compression of Buffer Materials for Packaging[S].
- [9] GB/T 6344—200, 软质泡沫聚合材料拉伸强度和断裂伸长率的测定[S].
GB/T 6344—200, Determination of Tensile Strength and Elongation at Break of Soft Foam Polymeric Materials[S].
- [10] 付志强, 李芸, 杜昱雯, 等. 纸浆模制波状结构缓冲性能的仿真影响因素[J]. 包装工程, 2016, 37(21): 34—39.
FU Zhi-qiang, LI Yun, DU Yu-wen, et al. Influence Factors of Simulation on Testing the Cushioning Performance of Molded Pulps with Bi-wave Structure[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(21): 34—39.
- [11] FRANO R L, SANFIORENZO A. Demonstration of Structural Performance of IP-2 Package by Simulation and Full-scale Horizontal Free Drop Test[J]. Progress in Nuclear Energy, 2016(86): 40—49.
- [12] GUI Kun, WANG Xi. Design and Analysis of Cushioning Packaging for Home Appliances[J]. Procedia Engineering, 2017, 174(12): 904—909.
- [13] 刘乘, 卢杰, 陈满儒. 运输包装件振动特性的计算机仿真[J]. 包装工程, 2002, 23(4): 20—22.
LIU Cheng, LU Jie, CHEN Man-ru. Computer Simulation of Vibration Characteristics for the Package in the Transportation[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(4): 20—22.
- [14] 张沙, 钱怡. 电磁炉包装件的振动特性仿真分析[J]. 包装工程, 2012, 33(23): 56—60.
ZHANG Sha, QIAN Yi. Simulation Analysis of Vibration Characteristics of Induction Cooker Package[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(23): 56—60.
- [15] 秦璐, 丁毅, 苏杰. 基于 Ansys Workbench 的路由器风扇组包装的包装动力学应用研究[J]. 包装工程, 2013, 34(13): 56—58.
QIN Lu, DING Yi, SU Jie. Applied Research of Packaging Dynamics of Router Fan Assembly Packaging Based on Ansys Workbench[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(13): 56—58.