

柱形空气衬垫振动传递特性的试验研究

巩桂芬^{a,b,c}, 李超^{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** 研究柱形空气衬垫的振动传递特性, 以获取振动传递率曲线。**方法** 在频率为 3~100 Hz 区间对柱形空气衬垫和确定载荷质量形成的振动系统进行正弦扫频振动试验, 分析初始内压和厚度对其振动传递特性的影响规律。**结果** 初始内压对空气衬垫的隔振能力没有显著影响, 3 种初始内压下振动系统的共振频率均在 35 Hz 左右, 传递率峰值集中在 11 左右。当厚度增大时, 共振频率和传递率峰值同时减小, 空气衬垫隔振能力增强。**结论** 在满足缓冲性能的前提下, 选择合适的初始内压, 以及采用多层空气衬垫可显著提高其隔振能力。研究结果可为柱形空气衬垫的缓冲隔振包装设计提供基本依据。

关键词: 柱形空气衬垫; 振动传递率; 初始内压; 厚度

中图分类号: TB484.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)19-0092-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.19.013

Experimental Study on Vibration Transmissibility Properties of Cylindrical Air Cushion

GONG Gui-fen^{a,b,c}, LI Chao^{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 & Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the vibration transmissibility properties of the cylindrical air cushion, so as to obtain the vibration transmission rate curves. The sinusoidal frequency sweeping vibration test was carried out on the vibration system formed by cylindrical air cushion and load mass in the frequency range of 3~100 Hz to analyze the influence rule of initial internal pressure and thickness on its vibration transmissibility properties. The results showed that, the initial internal pressure had no significant effect on the vibration isolation capability of the air cushion. The resonance frequencies of the vibration system at three initial internal pressures were all around 35 Hz, and the peak value of the transmission rate was around 11. With the increase of thickness, the resonance frequency and the transmission rate peak were simultaneously reduced, and the vibration isolation capability of the air cushion was enhanced. Therefore, the selection of a suitable initial internal pressure and the use of a multi-layer air cushion can significantly improve its vibration isolation capability while satisfying the cushioning performance. The research results can provide a basic basis for the design of the cushioned vibration isolation package for cylindrical air cushion.

KEY WORDS: cylindrical air cushion; vibration transmissibility; initial internal pressure; thickness

收稿日期: 2019-04-16

作者简介: 巩桂芬 (1974—), 女, 陕西科技大学副教授, 主要研究方向为包装机械和运输包装。

通信作者: 李超 (1994—), 女, 陕西科技大学硕士生, 主攻包装材料缓冲性能研究。

柱形空气衬垫是一种通过给附有单向逆止阀的塑料薄膜气室中充入空气而形成的绿色环保承载与缓冲材料。在包装件受到外界冲击及振动时,衬垫中的空气可以吸收外界能量降低冲击加速度,从而实现对被包装产品的缓冲保护^[1-4]。

产品在运输过程中会因为同时受到多种因素的影响而受损,其中最主要的因素是冲击和振动。一旦运输过程中包装件产生共振,将对产品造成致命损坏。目前常见的缓冲材料如蜂窝纸板、瓦楞纸板和发泡聚苯乙烯的防振性能均有研究者对其进行了研究,并取得了一定的研究成果^[5-7];对柱形空气衬垫这种新型缓冲材料的研究成果主要集中于空气垫的静态压缩性能、动态冲击性能^[8-11]以及建立有限元模型进行缓冲性能数值模拟^[12-13]等,对于其防振性能的研究甚少。综上所述,此研究通过对柱形空气衬垫进行正弦扫频振动试验模拟实际运输过程中包装件可能会受到的振动情况,得到振动传递率-频率曲线(简称 T_r - f 曲线)以振动传递特性来表征空气衬垫防振性能的优劣,并且分析初始内压和厚度对空气衬垫隔振性能的影响。

1 试验

1.1 原理

试验通过振动台向振动系统输入正弦激励信号,以此模拟产品在实际运输时受到的振动,分析柱形空气衬垫对振动能量的吸收和传递特性。缓冲材料的振动传递率为系统的响应加速度幅值与激励加速度幅值之比,试验过程中分别记录振动台和质量块的加速度值,可用式(1)表示缓冲材料的振动传递率。

$$T_r = \frac{G_i}{G_0} \quad (1)$$

式中: G_i 为响应加速度幅值; G_0 为激励加速度幅值。

在试验中,由空气衬垫、质量块和振动台构成的振动系统可简化为有支座激励的单自由度线性振动系统,这种系统在受到外界的正弦激励时,其振动传递率 T_r 的计算式^[14]为:

$$T_r = \sqrt{\frac{1 + (2\xi\lambda)^2}{(1 - \lambda^2)^2 + (2\xi\lambda)^2}} \quad (2)$$

式中: λ 为频率比; ξ 为阻尼比。当频率比 $\lambda=1$,即系统产生共振时,可由式(2)得出此时缓冲材料阻尼比 ξ 的计算公式,见式(3)。

$$\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{T_r^2 - 1}} \quad (3)$$

阻尼比是指材料在任意时候的阻尼系数 C 与临界阻尼系数 C_c 的比值,即 $\xi=C/C_c$ 。其中,临界阻尼系数 $C_c=2m\omega_n$,此时的阻尼比 $\xi=1$,因此阻尼系数可由式(4)计算得到。

$$C = \xi C_c = 2\xi m \omega_n \quad (4)$$

式中: m 为系统的质量; ω_n 为系统固有的角频率。

1.2 方法

试验参考 GB/T 8169—2008《包装用缓冲材料振动传递特性试验方法》^[15]对柱形空气衬垫进行正弦扫频试验。振动台测试原理及试样安装方式见图1。试验参数设置:频率范围为3~100 Hz;扫频速率为1/2个倍频程/min;加速度为 $(5 \pm 0.1) \text{ m/s}^2$;上层试样静压力为0.7 kPa;载荷质量为5.2 kg。试验过程中,加速度传感器1和传感器2分别采集振动系统的激励加速度信号和响应加速度信号,通过式(1)计算得到振动传递率 T_r ,并绘制出 T_r - f 曲线。

1.3 材料及设备

1) 试验采用柱形空气衬垫,其塑料薄膜材料为PE/PA七层共挤复合膜,薄膜厚度为70 μm ,未充气前单个气室长度均为160 mm,其他材料结构参数见表1。文中根据柱形空气衬垫特殊的结构形式,通过

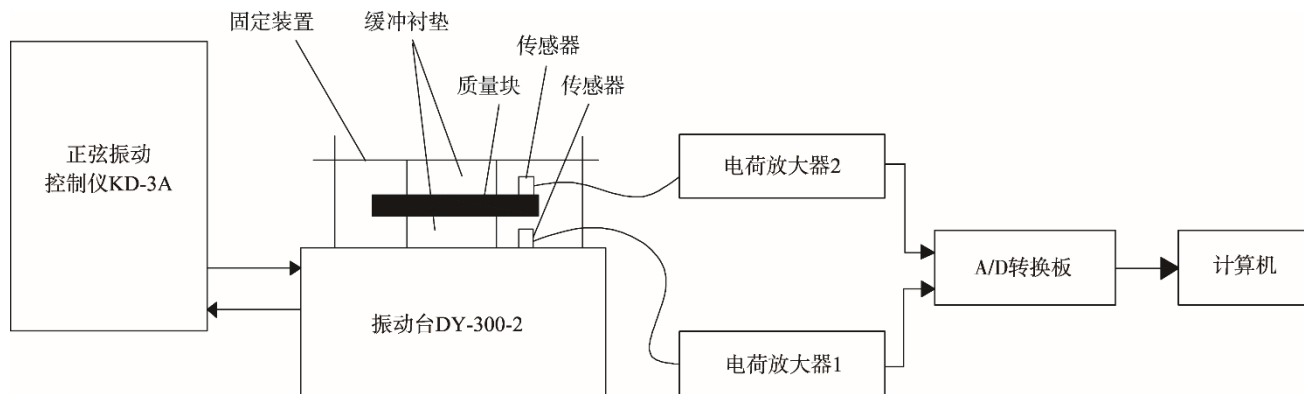


图1 缓冲材料防振性能测试系统

Fig.1 Vibration isolation test system for cushioning materials

表1 空气衬垫的结构参数
Tab.1 Structure parameters of air cushion

序号	气室 宽度/cm	初始 内压/kPa	气室 个数	衬垫 层数	厚度/ mm
1 [#]	3	50	8	2	32.80
2 [#]	3	70	8	2	32.81
3 [#]	3	70	8	3	50.32
4 [#]	3	90	8	2	32.83
5 [#]	4	70	6	2	46.27
6 [#]	4	70	6	3	70.39

改变使用层数来获得不同的厚度。

2) 主要仪器设备包括 DY-300-2 电动振动系统、KD-3A 正弦振动控制仪、功率放大器、电荷放大器、计算机数据采集系统、智能充气泵。

2 结果与分析

通过正弦扫频试验可以直接得到柱形空气衬垫的振动传递率曲线, 见图 2。从该曲线上可以得到振动传递率峰值和峰值频率。对不同初始内压和不同厚度的试验结果进行对比分析, 探究这 2 种因素对空气衬垫的固有频率、振动传递率峰值、阻尼比和阻尼系数的影响。阻尼比通过 1.1 节试验原理中的式(3)计算得到。当激振频率和系统的固有频率相同($\lambda=1$)时, 发生共振, 此时系统出现传递率峰值, 对应的峰值频率是系统发生共振时的频率, 因此可近似认为固有频率和峰值频率在数值上是相等的。然后可根据式(4)计算得出共振时空气衬垫的阻尼系数。

2.1 初始内压对振动传递率的影响

分别对平铺时气室宽度为 3 cm 规格的空气衬垫设置 50, 70, 90 kPa 等 3 种初始内压(衬垫具体规格参数见表 1)并按上述试验条件进行正弦扫频振动试验, 测试初始充气内压对其振动传递特性的影响。随着初始充气内压增大, 振动传递率的变化曲线见图 2。

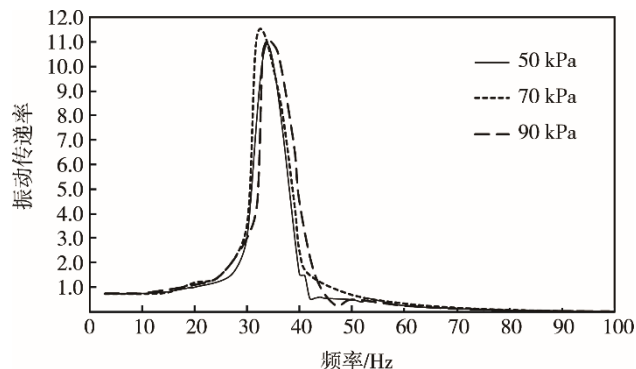


图2 不同初始内压时空气衬垫材料的 T_r - f 曲线
Fig.2 T_r - f curve of air cushion materials at different initial internal pressures

由 T_r - f 曲线可知, 当 $T_r > 1$ 时, 说明振动系统中质量块上的响应加速度大于振动台产生的激励加速度, 此时空气衬垫没有起到隔振效果, 反而使振动加剧, 进行缓冲防振包装设计时应注意避开这个区域。当 $T_r < 1$ 时, 空气衬垫可以减小传递到产品上的外界振动激励信号, 起到缓冲隔振效果。

图 2 显示在不同的初始充气内压下, 柱形空气衬垫材料的振动传递率曲线基本重合, 可见空气衬垫的初始充气内压对其振动传递特性几乎没有影响。在试验条件下, 空气衬垫对外界振动激励信号的放大区均集中在 25~45 Hz 间, 其中峰值频率均在 35 Hz 左右, 振动传递率峰值集中在 11 左右。在频率大于 45 Hz 后, 振动传递率数值均小于 1 且接近于 0, 说明空气衬垫在高频振动下有较强的隔振能力。表 2 则计算得出了系统共振时空气衬垫的阻尼比和阻尼系数。空气衬垫用作缓冲防振材料时, 其原理是利用内部气体的粘滞性来吸收和耗散能量。气体具有粘滞性, 即在外界振动的作用下, 气体内部产生对变形的抵抗, 并以内摩擦形式表现出来, 从而耗散振动能量。造成气体粘滞性的主要原因是分子的热运动, 由于压强变化对气体分子的动量交换影响非常微弱, 因此气体的粘滞性随压强的变化很小, 这与试验结果是相一致的。

表2 不同初始内压时空气衬垫的振动试验数据
Tab.2 Vibration test data of air cushion at different initial internal pressures

序号	初始 内压/kPa	峰值频率 f_p /Hz	传递率	阻尼比	阻尼 系数
1 [#]	50	34	10.9	0.046	102.15
2 [#]	70	32	11.3	0.044	91.96
3 [#]	90	35	11.1	0.045	102.87

2.2 厚度对振动传递率的影响

选择平铺时气室宽度分别是 3 cm 和 4 cm 的 2 种柱形空气衬垫, 对 2 种衬垫都通过改变使用层数来改变厚度, 试验后得到的振动传递率曲线见图 3。其中图 3a 的结果对应表 1 中 2 号和 3 号样品, 图 3b 的结果对应表 1 中 5 号和 6 号样品。

从图 3 可以看出, 对于这 2 种气室规格的空气衬垫来说, 随着厚度的增加, 其 T_r - f 曲线均向左下方偏移, 表明随着厚度的增加, 空气衬垫的振动放大频率区间向低频方向移动, 系统的高频减振区间增加, 振动传递率峰值减小, 振动系统的固有频率也呈减小趋势。图 4 显示了 2 种气室规格的空气衬垫在不同厚度时的振动传递率峰值。对于 3 cm 气室规格的空气衬垫, 随着使用层数增加一层, 厚度增加了 53%, 振动传递率峰值减小约 11.8%。4 cm 气室规格空气衬垫的使用层数增加一层, 厚度增加了 52%, 振动传递率峰

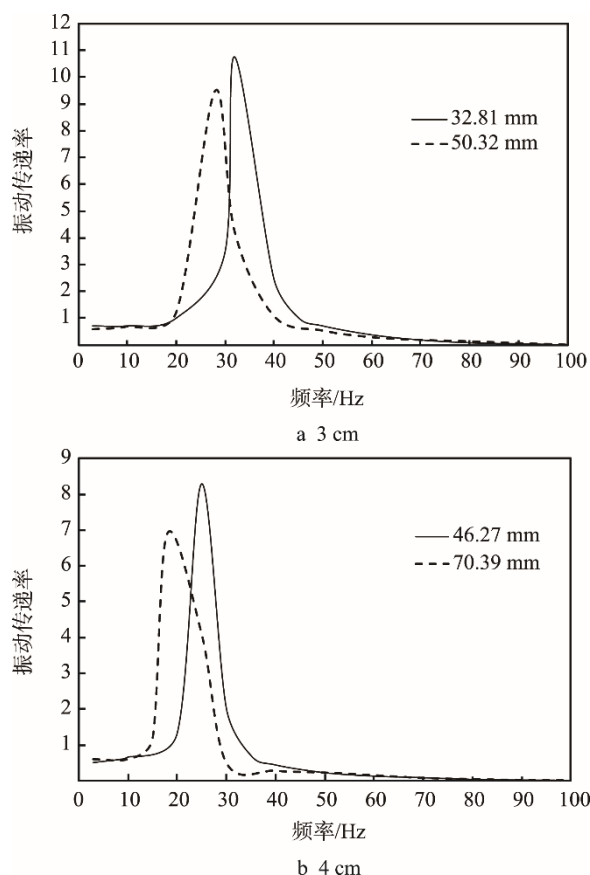


图3 不同厚度空气衬垫材料的 T_r - f 曲线
Fig.3 T_r - f curve of air cushion materials with different thickness

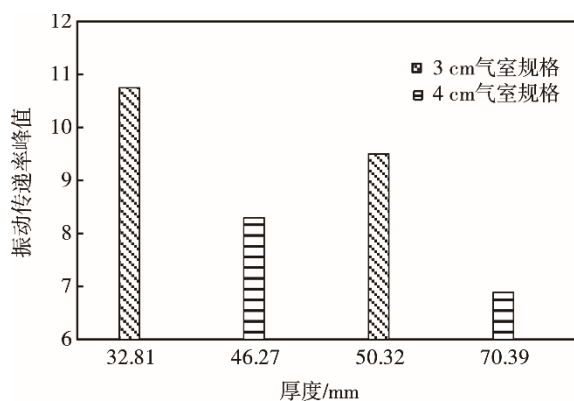


图4 不同厚度时空气垫的振动传递率峰值变化
Fig.4 Variations of vibration transmissibility peak value at different thicknesses

值减小约 16.9%。空气衬垫厚度的增加意味着耗散外界振动能量的气体量增加, 空气衬垫的阻尼比增大, 阻尼比增大即表明振动能量会更多地被空气衬垫耗散。所以增加厚度可以增强空气衬垫的隔振效果, 使得传递率峰值减小。

3 结语

通过对柱形空气衬垫进行正弦扫频振动试验, 得

到了不同初始内压和不同使用厚度下空气衬垫的振动传递特性曲线, 分析并研究了初始充气内压和使用厚度这 2 个因素对柱形空气衬垫材料振动传递特性的影响。结果表明, 初始充气内压对空气衬垫材料的隔振能力没有显著影响; 在 3 种充气压力下, 空气衬垫材料的隔振频率区间比较一致, 对高频频率隔振性能较好。随着厚度的增加, 衬垫阻尼比增大, 隔振能力增强, 具体表现为振动传递率峰值减小, 系统固有频率减小。试验结果可为空气衬垫的缓冲防振包装设计提供基本依据。

参考文献:

- [1] 徐健, 刘晓玉, 王保升. 缓冲气柱袋在运输包装中的应用设计及研究现状[J]. 印刷技术, 2016(4): 40—42. XU Jian, LIU Xiao-yu, WANG Bao-sheng. Application Design and Research Status of Air Column Bag in Transportation Packaging[J]. Printing Technology, 2016(4): 40—42.
- [2] GAY D, HOA S V. Composite Materials: Design and Applications[M]. CRC Press, 2007.
- [3] TAKAHASHI J. Development of Environment-friendly Cushioning Materials[J]. JPI Journal, 1997, 35(2): 166—173.
- [4] SASAKI H, SAITO K, ABE K. Development of an Air Cushioning Material Based on a Novel Idea[J]. Packaging Technology and Science, 1999(12): 143—150.
- [5] 谷吉海, 田野, 高翔, 等. 充气压力对空气衬垫缓冲防护性能的影响研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(20): 226—230. GU Ji-hai, TIAN Ye, GAO Xiang, et al. Influence of Inflation Pressure on the Buffer Protection Performance of Air Cushion[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(20): 226—230.
- [6] 郭振斌, 陈安军. 柱状缓冲空气垫动态刚度研究[J]. 包装工程, 2012, 33(5): 69—72. GUO Zhen-bin, CHEN An-jun. Research on Dynamic Stiffness of Cylindrical Air Cushion[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(5): 69—72.
- [7] 郭静, 康勇刚. 充气垫缓冲材料动态冲击性能评价[J]. 包装工程, 2014, 35(1): 73—76. GUO Jing, KANG Yong-gang. Dynamic Impact Performance Evaluation of Inflatable Cushion[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(1): 73—76.
- [8] 巩桂芬, 刘萌沛. 充气垫缓冲材料破损强度研究[J]. 陕西科技大学学报, 2015, 33(3): 149—153. GONG Gui-fen, LIU Meng-pei. Study of Damage Strength of Inflatable Cushion Materials[J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology, 2015, 33(3): 149—153.
- [9] GUNAWAN F E. Numerical Modeling and Experimental Verification of Airbag for Packaging Material

- Application[J]. International Journal, 2012, 7(1): 64—68.
- [10] 吴芳英, 范小平, 向红, 等. 空气垫静态缓冲性能的数值模拟[J]. 包装工程, 2015, 36(5): 11—15.
WU Fang-ying, FAN Xiao-ping, XIANG Hong, et al. Numerical Simulation of Static Cushioning Performance of Air Cushion[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(5): 11—15.
- [11] 李琛, 肖生苓, 刘颖. 热老化对聚苯乙烯缓冲材料振动传递特性的影响[J]. 科技导报, 2013, 31(35): 56—59.
LI Chen, XIAO Sheng-ling, LIU Ying. Effects of Thermal Aging on Vibration Transmissibility of Expanded Polystyrene[J]. Science and Technology Review, 2013, 31(35): 56—59.
- [12] 李海广, 安振涛, 武红文, 等. 典型弹药系统运输振动特性试验研究[J]. 包装工程, 2017, 38(15): 92—96.
LI Hai-guang, AN Zhen-tao, WU Hong-wen, et al. Experimental Study on Transportation Vibration Characteristics of Typical Ammunition System[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(15): 92—96.
- [13] 李晓刚, 孟星彤. 0945 型瓦楞纸板衬垫缓冲防振性能试验[J]. 包装工程, 2018, 39(3): 28—32.
LI Xiao-gang, MENG Xing-tong. Test of Cushioning and Anti-vibration Properties of 0945-type Corrugated Paperboard Liner[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(3): 28—32.
- [14] 高德, 计宏伟. 包装动力学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2010.
GAO De, JI Hong-wei. Packaging Dynamics[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2010.
- [15] GB/T 8169—2008, 包装用缓冲材料振动传递特性试验方法[S].
GB/T 8169—2008, Testing Method of Vibration Transmission Characteristics for Packaging Cushioning Materials[S].