缓冲材料蠕变特性测试系统设计

邢月卿，刘乘，黄威，张瑜，孙德强
（陕西科技大学，西安 710021）

摘要：目的 介绍一种缓冲材料蠕变测试系统的设计方法，该系统包括测试装置的硬件设计和相应的测试软件开发。**方法** 设计一种新的缓冲材料蠕变特性的测试装置，并用 LabVIEW 软件开发其测试软件系统，采用 PC 机自带的声卡作为数据采集卡，配合传感器、压频(V/F)转换器等硬件对缓冲材料在一定静压下的厚度变化量进行数据采集与分析，得出缓冲材料蠕变特性曲线。**结果** 位移传感器采集缓冲材料随时间的位移形变，经信号调理、低通滤波后，输入给以 LM331 芯片所组成的 V/F 转换器，声卡采集该转换器所输出的频率信号并转换为数字信号，计算机读取该数字信号并在测试软件界面输出蠕变-时间、位移-时间、应力-时间等曲线。**结论** 该测试装置和软件测试系统操作简单，使用 PC 自带声卡替代昂贵的数据采集卡作为数据采集系统，降低了成本，灵活性和可靠性较高，使缓冲材料的蠕变特性测试更加方便快捷，为更好地掌握缓冲材料蠕变特性进行缓冲设计提供了强有力的工具。

关键词： 蠕变特性测试系统；缓冲材料；压频转换器；数字信号
中图分类号： TB485.1；TB487 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3563(2016)13-0071-06

Creep Properties Test System Design of Cushion Materials

XING Yue-qing, *LIU Cheng*, *HUANG Wei*, *ZHANG Yu*, *SUN De-qiang*
(Shaanxi University of Science and Technology, Xi' an 710021, China)

ABSTRACT: This work aimed to introduce a design method of creep testing system for cushion materials, including the hardware design of the testing device and the development of corresponding software. A new creep properties testing device for cushion materials was designed, and the test system software was developed with LabVIEW software. The sound card of PC was used as data acquisition card, with the hardware of the sensor and V/F converter used to collect and analyze the thickness variations of cushion material under a certain static pressure to get the creep properties curves of cushion materials. Displacement sensor acquitted the displacement deformation of the cushion materials, and the voltage was input to frequency converter (V/F) consisting of LM331 chip after signal conditioning and low pass filter. The sound card collected the output frequency signal of the converter and converted it into a digital signal. The computer read the digital signal and output the creep-time, displacement-time, force-time curves on the test software interface. The test device and software testing system had the advantages of simple operation and used the sound card of PC instead of expensive data acquisition as a data acquisition system, which reduced the cost, improved the flexibility and liability, and made the cushion material creep test more convenient and efficient, providing a powerful tool for cushioning design to better grasp the creep characteristics of cushion materials.

KEY WORDS: creep properties test system; cushion materials; voltage frequency converter; digital signal

收稿日期： 2015-10-26

作者简介： 邢月卿（1979—），女，河北保定人，陕西科技大学讲师，主要研究方向为包装材料、缓冲包装等。

缓冲材料的蠕变是指在恒定的应力作用下材料的应变随时间增加而逐渐增大的现象[1]。蠕变与载荷大小直接相关，而且与载荷作用时间、环境温度有一定关系[2]。在实际应用中，缓冲材料被置于包装件内后，包装件的仓储和运输过程一般时间较长，缓冲材料由于受内装产品自重的长期静态压载而产生蠕变，会使缓冲材料的总体结构尺寸减小，导致缓冲材料和外包装容器之间空隙的产生，产品会因为得不到应有的缓冲而损坏。需要根据产品、流通环境和流通周期，了解不同缓冲材料的蠕变特性，并进行适当的形变补偿，设计出适当尺寸的缓冲结构，以发挥缓冲材料良好的保护作用。虽然传统的蠕变试验箱和试验机也能进行缓冲材料蠕变特性测试，但费时费力，需要手动测量和记录，会有人为操作误差，因此，需要开发出便捷高效的缓冲材料蠕变特性测试系统。

1　缓冲材料蠕变特性测试原理

缓冲材料的蠕变特性测试是指在一段时间内，对缓冲材料施加恒定静压力，测量缓冲材料厚度对应于时间的变化，从而获得缓冲材料的蠕变特性的测试[3]。“GB/T 14745 包装缓冲材料蠕变特性试验方法”规定了使用压缩箱的蠕变试验方法。该标准按试验样品是否进行预压缩，规定了 A 法和 B 法 2 种试验方法。所有实验样品为质量均匀、性能稳定的常用包装缓冲材料，如 EPE，EPS 等，试样的尺寸为 150 mm × 150 mm × 100 mm。所有实验样品均按照 GB 4857.2 进行预处理，环境温度为 23 ℃，相对湿度为 55%，时间 24 h 以上，直到样品质量达到平衡[4]。

首先根据预定的应变量确定所需的压缩载荷；将试验样品放在测试装置下方底板和上方压板的中间，将确定的载荷平稳地压在试验样品上，载荷施加(60±5)s 后，用精度不小于 0.05 mm 的游标卡尺测量底板的上表面到压板的下表面之间的距离，作为试样加载下的初始厚度 d；在施加载荷 6 min，1 h，24 h，96 h 和 168 h 时，以及在其他任何所需时间上测量加载状态下的试验样品的厚度，作为规定时间间隔的试验样品的厚度(d_s)，则根据以下公式得到缓冲材料的蠕变 ε_c，绘制缓冲材料蠕变-时间曲线。

$$\varepsilon_c = \frac{d - d_s}{d} \times 100\% \tag{1}$$

2　缓冲材料蠕变性能测试系统整体设计方案

缓冲材料蠕变特性的测试系统的整体结构和工作流程见图 1。缓冲材料置于相互平行的压板和底板之间，底板上用螺栓、轴肩固定导杆，压板可以通过滑动轴承沿着导杆上下自由滑动。压板上固定有位移传感器，可以随时监测缓冲材料的厚度改变，即位移，并将此位移信号转换为电信号，该电信号一般都较大且有噪声干扰，因此要经过衰减和滤波等信号调理，调理后的电信号经过 V/F 转换器转换为频率信号，然后以声卡为数据采集卡采集该频率信号并通过声卡的 A/D 转换芯片将该频率信号转化为数字信号[5—7]，以 LabVIEW 为开发软件的蠕变测试系统采集该数字信号并分析生成缓冲材料的蠕变特性曲线。根据流通环境、流通周期、缓冲材料特性等条件来确定加载在压板的静载压力，可以通过放置在压板上的砝码的大小来调节该静载压力的数值[8—11]。

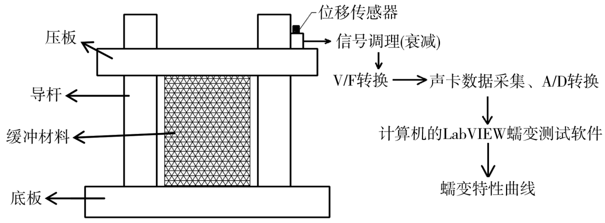


图 1　缓冲材料蠕变特性测试系统
Fig.1 Test system for the creep characteristics of cushion materials

2.1　蠕变装置设计

参考 GBT 14745—1993 包装缓冲材料蠕变特性试验方法，试验样品为上下面均为正方形的长方体，其尺寸定为 150 mm × 150 mm × 100 mm，因此拟定压板为 200 mm × 200 mm 的方形铝板，厚度为 15 mm。拟定导杆的直径为 20 mm。选用 SF-1 系列轴承，轴承内径为 20 mm，轴承长度为 20 mm。初选底板厚度为 35 mm，开有台阶孔，与导杆配合时，采用台阶孔定位、螺栓固定。由于导杆直径为 20 mm，考虑到扳手拧紧螺纹的空间，因此选内六角头全螺纹螺栓 M12。螺栓与底板之间的垫片由 GB/T 95—1985 查得 $r_1 \cdot r_2 \cdot d$=13.5 mm × 24 mm × 2.5 mm，r_1 为垫片的公称内径，r_2 为垫片的公称外径，d 为垫片厚度。由于螺栓头部宽度为 2.5 mm，垫圈厚度 2.5 mm，因此下沉孔深不小于 10 mm，取孔深 12 mm，并取下沉空直径为 35 mm。

导杆伸入底板由螺栓固定，总长为 195 mm。由于螺栓长为 25 mm，垫圈厚 2.5 mm，则螺纹孔深应大于 22.5 mm，取为 24 mm。装配时，压板与滑动轴承过盈配合 N8/h7，滑动轴承与导杆间隙配合 H7/g6，使压板可以在导杆上自由滑动[12—15]。导杆与底板上通孔的配合采用过渡配合 H7/k6。其装配和结构见图 2，当然，这只是设计之初的结构图，后期会根据制造工艺和安装要求等进行一些尺寸和结构的微调。

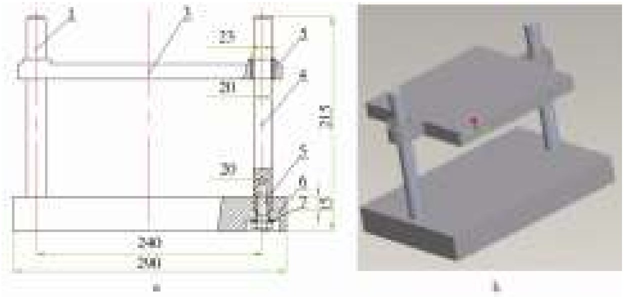


图 2　缓冲材料蠕变特性测试装置
Fig.2 The test device for the creep characteristics of cushioning materials

2.2　V/F 信号转换

放置在压板上的位移传感器为常州纳微电子科技有限公司的 NWDZ-L 磁致伸缩位移传感器（见图 1），测量精度高，具有高分辨率、高精度、高稳定性、响应时间快等优点。长期使用不需要重新标定，也不需要定期维护。其位移量程为 200 mm，电压范围为 0~5 V。

V/F 转换是将被测物理量经传感器转换成与被测信号成比例的连续变化的电压量，再转换为电压 V 的脉冲频率 f。本测试系统采用美国 NS 公司的 LM331 集成芯片制成的 V/F 转换器将位移传感器从蠕变试验装置采得的电压信号转换为频率信号，其 V/F 转换流程和转换电路见图 3—4。

输入电压 U_1 通过由电容 C_1 和电阻 R_1 组成的低通滤波器进行低通滤波后，直接输入集成芯片 LM33l，如图 4。由于在芯片外部接入了由电容 C_t、电阻 R_t、电容 C_L、电阻 R_L 所组成的充放电电路，就能够组成高转换精度的电压/频率转换电路，完成了输入电压 U_1 和输出脉冲频率 f_0 的电压-频率转换。在此电压/频率转换过程中，由于对输入电压进行了低通滤波，能够减少干扰脉冲，有利于 V/F 转换精度的提高[16]。通过查询资料[17]，输入电压 U_1 和输出频率 f_0 的关系为：

$$f_0 = \frac{1}{T} = \frac{R_s \cdot U_1}{2.09 R_t \cdot C_t \cdot R_L} \tag{2}$$

由上式(2)，则可得出输出脉冲频率 f_0 与输入电压 U_1 成正比，实现了电压-频率(V/F)的线性变换，而且电阻 R_t，R_L，外接调节电阻 R_S 和电容 C_t 的精度直接影响输出脉冲频率 f_0 的结果，因此对各元件型号和性能指标有一定的要求，可根据转换精度选择适当的电路元件。

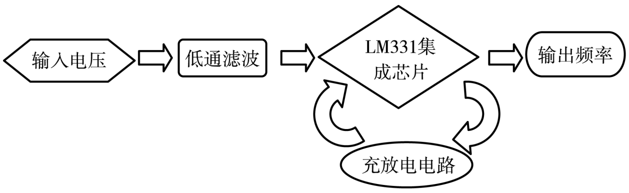


图 3　V/F 转换流程
Fig.3 V/F conversion flow chart

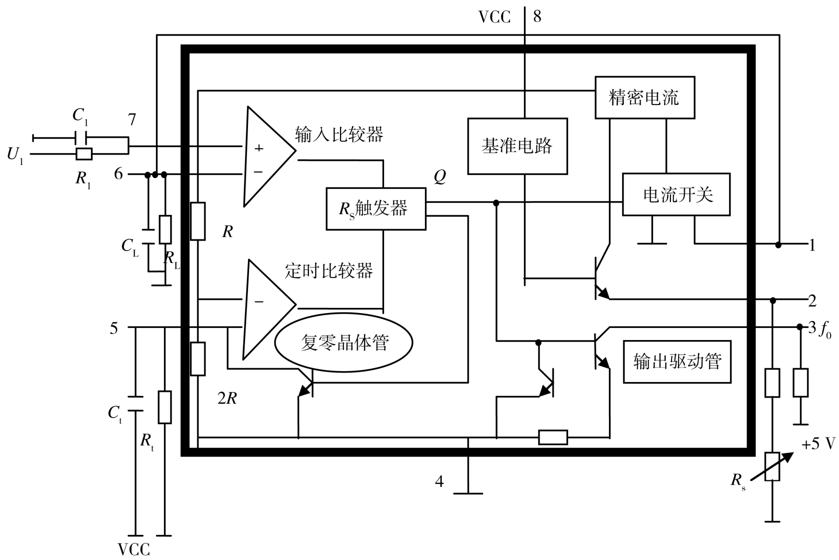


图 4　LM331 内部 V/F 转换电路
Fig.4 The internal LM331 V/F conversion circuit diagram

2.3　数据采集系统

数据采集是测试系统中信号分析与处理的一个重要环节。一般的计算机数据采集系统包括传感器、信号调理器、数据采集卡和控制软件等。在实际测试系统中，数据采集卡的选取需要根据被测量的精度、信号频率范围等具体要求而定。数据采集卡大多价格昂贵，而 PC 声卡本身就是一个很好的数据采集系统，其具有 A/D 和 D/A 转换功能，价格低廉，因此可以利用计算机上的声卡作为数据采集卡使用。

声卡一般都由晶振、模数转换器(ADC)、数模转换器(DAC)和数字信号处理(DSP)芯片及其他辅助电路组成，其采样精度最高为 16 bit，最高采样频率为 44.1 kHz，完全能够满足缓冲材料蠕变性能测试系统的要求。采用声卡作为本测试系统的数据采集卡，完成数据采集和分析处理任务的同时，降低了设备成本。

声卡作为音频信号与计算机的通用接口，其基本工作流程见图 5。当音频信号通过 Line In 输入端输入时并由麦克风输入获取的声音信号给模数转换器(ADC)，再由其实现音频信号和数字信号的转换，将此数字信号存入内存缓冲区，以供 CPU 随时调用进行播放等处理；输出声音信号时，计算机通过总线将数字信号以 PCM（脉冲编码调制）方式送到数模转换器(DAC)，并由其转换成模拟的音频信号，再通过 Line Out 输出端将此音频信号送到音箱等设备转换为声波。声卡的数据输入端有 Mic 和 Line In 两个插孔，其中 Mic 插孔因为有高增益放大器，会对采集到的频率信号产生干扰作用而使其失真，因此将声卡作为数据采集卡使用时，选用噪声干扰小且稳定可靠的 Line In 插孔作为频率信号输入端，即数据线将输入端 Line In 与 V/F 转换器的输出端连接。输入端 Line In 采集到的频率信号由模数转换器(ADC)转换为数字信号，经过声卡的数字信号处理(DSP)芯片分析处理并送入计算机的 Labview 测试软件，得到缓冲材料蠕变特性的数据和曲线。

声卡的采样频率和采样位数会对数据采集的效率和质量产生影响，因此，利用声卡的 DMA 方式进行数据采集，需要根据试验条件和声卡的性能指标来设定采样频率、采样位数、缓冲区大小。声卡将采集和转换后的数字信号数据存储在指定的内存缓冲区中，以供 CPU 随时调用此内存缓冲区的数据，显示缓冲区数据的波形。也可以把此数字信号数据存到磁盘，供日后分析使用。声卡的这种 DMA（直接内存读取）数据传送方式，提高了 CPU 效率和数据采集系统的运行速度。声卡 16 位的模数转换器(ADC)的转换精度，比通常数据采集卡的 12 位转换精度高，其成本却很低，本缓冲材料蠕变特性测试系统将声卡作为数据采集卡使用，可以组成一个低成本高性能的数据采集与分析处理系统。声卡只适合采集处于 20~20 000 Hz 范围内的音频域信号，某些声卡对大频率信号转换是有一些误差的。应根据测试系统的特性和具体的声卡型号来确定数据采集和分析处理的设备。

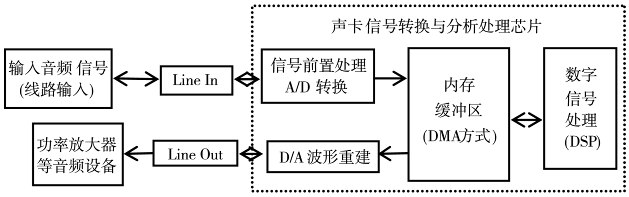
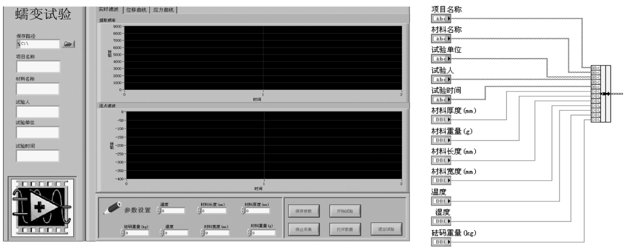


图 5　声卡工作流程
Fig.5 The working flow of sound card

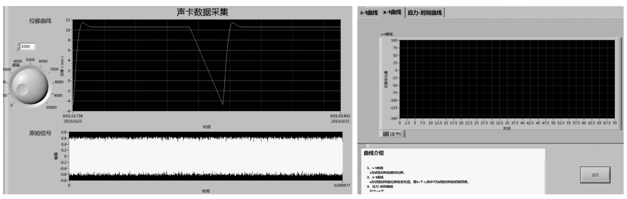
3　LabVIEW 软件测试系统及测试实例

LabVIEW 是一种基于可视化图形编程语言的开发平台，使用 G 代码语言，用方框图作为程序代码，其编程简单直观、调试方便[18]。这里由蠕变实验的测试原理和以上数据采集和转换过程，开发出基于 LabVIEW 软件的缓冲材料蠕变特性测试系统[19]，系统的部分界面和程序见图 6—8。



a　　　　b

图 6　蠕变实验测试系统
Fig.6 The creep test system



a　　　　b

图 7　声卡数据采集界面和蠕变曲线界面
Fig.7 Sound card data acquisition interface and creep curve interface

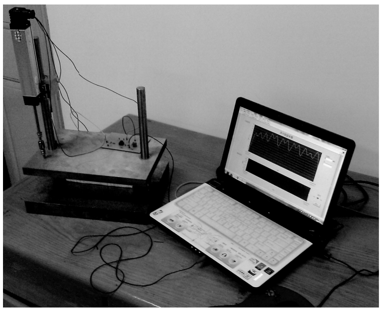


图 8 缓冲材料蠕变特性测试实体装置及系统
Fig.8 The Test device and system for the creep characteristics of cushioning materials

以密度为 0.0239 g/cm^3，质量为 32.2 g，长×宽×厚度为 150 mm×150 mm×58.32 mm 的 EPE 为试验样品，这里的厚度是指预处理后的试验样品的厚度，上压板和砝码质量为 30.7 kg，对其蠕变性能进行测试。试验前按 GB 4857.2—84 的规定，对试验样品进行 24 h 以上温湿度预处理，直到样品质量达到平衡。在施加载荷(60±5)s 时，试件的厚度（初始厚度）为 54.96 mm，则由本测试系统和传统蠕变实验箱对同样的 EPE 样品进行测试，其蠕变-时间曲线见图 9，可以看出，2 种方法测试出来的曲线非常相近，由于蠕变实验箱是手动记录数据，根据相关公式计算后绘制的曲线，理论上要比测试系统的误差更大一些，同时也证明测试系统的可靠性、精确性和便捷性，可以作为缓冲材料蠕变特性测试系统使用。图 9 中 *OA* 段是缓冲材料在加载后的瞬间弹性变形，*AB* 段是材料的蠕变过程，*BC* 段是 EPE 在卸载后的瞬间弹性恢复，*CD* 段是蠕变缓慢恢复过程。

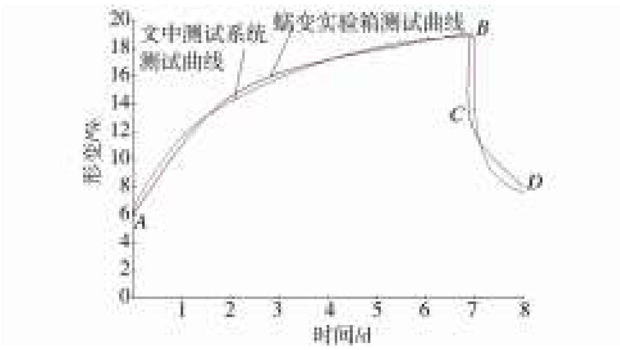


图 9 EPE 的蠕变-时间曲线
Fig.9 Creep-time curve of EPE

4 结语

缓冲材料蠕变测试系统包括了蠕变实验测试装置、位移传感器、V/F 转换器、基于声卡的数据采集设备，并结合 LabVIEW 自带的声卡软件驱动和基于 LabVIEW 的测试软件系统，使缓冲材料蠕变特性测试更加便捷高效，并且大大提高了蠕变特性测试的精确性。蠕变实验装置的性能和操控特性、磁致位移压缩传感器的精度、V/F 转换器的精度、声卡的精度等都会影响和决定本测试系统的测试工作精度。采用高性价比的声卡作为数据采集卡，在 LabVIEW 程序驱动环境下，构成一个较高采样精度、中等采样频率，且具有很大灵活性[20]的缓冲材料蠕变特性测试数据采集系统，对于缓冲材料的性能改进和不同规格的缓冲材料的选用、包装技术的发展和进步起到了推动作用。当然，测试系统可能还会存在一些问题，如测试装置和数据采集与分析系统的协调工作，对不同缓冲材料测试时系统参数的改变等，因此还需要对系统各装置的各种参数进行更加细致的设置和不断的调试，以使本测试系统运行得更加顺利，为缓冲包装设计提供更加科学合理、高效精确的缓冲材料蠕变特性数据和曲线。

参考文献：

[1] 高德. 包装应用力学[M]. 北京:中国轻工业出版社, 2013.
GAO De. Packaging of Applied Mechanics[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2013.

[2] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京:印刷工业出版社, 2012.
PENG Guo-xun. Logistics Transportation Packaging Design[M]. Beijing:Printing Industry Press, 2012.

[3] 山静民. 包装测试技术[M]. 北京:印刷工业出版社, 2013.
SHAN Jing-min. Packaging Test Technology[M]. Beijing:Printing Industry Press, 2013.

[4] GB/T 14745—93, 包装缓冲材料蠕变特性试验方法[S].
GB/T 14745—93, Test Method for Creep Properties of Package Cushioning Materials[S].

[5] 杨会成. 数字信号处理[M]. 北京:国防工业出版社, 2012.
YANG Hui-cheng. Digital Signal Processing[M]. Beijing:National Defence Industry Press, 2012.

[6] 黄松岭, 吴静. 虚拟仪器设计基础教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2008.
HUANG Song-ling, WU Jing. Virtual Instrument Design Based Tutorial[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2008.

[7] 刘继飞, 韩雪山. 蠕变对发泡聚乙烯缓冲性能影响的研究[J]. 包装工程, 2014, 35(3):48—51.
LIU Ji-fei, HAN Xue-shan. Effects of Cushion Property of Foamed Polyethylene EPE Cushioning Material

Exerted by the Creep[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(3):48—51.

[8] MASSO M. Finite Element Analysis Applied to Polyethylene Foam Cushion in Package Drop Tests[J]. Packaging Technology and Science Materials, 2012, 43(1):39—41.

[9] 刘乘, 吴莎. 测试缓冲材料性能的方法及其分析[J]. 包装工程, 2011, 32(13):25—27.
LIU Cheng, WU Sha. Cushioning Material Properties Testing Methods and Analysis[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(13):25—27.

[10] 刘乘, 任亚东. 几种常用缓冲材料的性能研究[J]. 包装工程, 2010, 31(7):117—119.
LIU Cheng, REN Ya-dong. Research on Properties of Several Cushion Materials[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(7):117—119.

[11] 奚德昌, 高德. 缓冲包装材料的本构建模研究进展[J]. 包装工程, 2011, 32(1):1—4.
XI De-chang, GAO De. The Review on Constitutive Modeling of Cushion Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(1):1—4.

[12] 郭勇, 杨凌云. 基于 MATLAB/GUI 缓冲材料测试数据处理软件设计[J]. 包装工程, 2012, 33(21):91—103.
GUO Yong, YANG Ling-yun. Test Data Processing Software Design for Cushioning Packaging Materials Based on MATLAB/GUI[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(21):91—103.

[13] JEONG K Y, CHON S S, MUNSHI M B. A Constitutive Model for Polyurethane Foam with Strain Rate Sensitivity[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(7):2033—2038.

[14] 段宁宁, 陈安军. 矩形脉冲激励下斜支承系统易损件的冲击特性研究[J]. 包装工程, 2013, 34(7):21—24.
DUAN Ning-ning, CHEN An-jun. Shock Characteristics of Vulnerable Components of Tilted Support System under Rectangular Pulse Excitation[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(7):21—24.

[15] 刘冰, 阮红斌, 曹海斌, 等. 蜂窝-瓦楞复合纸板的面外承载及静态缓冲性能研究[J]. 包装工程, 2012, 33(7):4—8.
LIU Bing, RUAN Hong-bin, CAO Hai-bin, et al. Research on Outside Bearing and Static Cushioning Performance of Honeycomb-corrugated Composite Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(7):4—8.

[16] 许江淳. 单片机测控技术应用实例解析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
XU Jiang-chun. Case Analysis of Single Chip Microcomputer Measurement and Control Technology[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2010.

[17] 张宏亮, 曹立江, 朱和智, 等. LM231 在管道爬行器电池电压控制中的应用[J]. 无损检测, 2008, 30(11):850—852.
ZHANG Hong-liang, CAO Li-jiang, ZHU He-zhi, et al. The Application of LM231 on Battery Voltage Controlling of Pipeline Crawler[J]. Nondestructive Test, 2008, 30(11):850—852.

[18] 陈锡辉. 基于 LabVIEW 8.20 程序设计从入门到精通[M]. 北京:清华大学出版社, 2007.
CHEN Xi-hui. Based on LabVIEW 8.20 Programming from Entry to the Master[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2007.

[19] 张优云, 陈花玲. 现代机械测试技术[M]. 北京:科学出版社, 2005.
ZHANG You-yun, CHEN Hua-ling. Modern Mechanical Testing Technology[M]. Beijing:Science Press, 2005.

[20] 蒋帅锋, 施展. 基于声卡的数据采集系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8):47—49.
JIANG Shuai-feng, SHI Zhan. Data Acquisition System Based on Sound Card[J]. Journal of Instrument and Meter, 2005, 26(8):47—49.