

跌落冲击试验机的控制和数据采集处理系统

薛飞¹, 张炜²

(1. 太原科技大学, 太原 030024; 2. 浙江大学 宁波理工学院, 宁波 315100)

摘要: 基于经典的缓冲材料缓冲特性理论, 开发了一套跌落冲击试验机系统, 并研究了自由跌落冲击过程中的数据采集与处理中的关键问题。通过采用多种数字滤波技术, 有效地削弱了随机信号的干扰; 利用一种新的获取初速的数据处理方法, 使得数据更趋于实际值; 通过获取的实验数据, 利用最小二乘法进行包装材料缓冲特性的拟合, 获得了缓冲材料的缓冲特性曲线。在相同条件下, 针对 EPE 材料进行了多次跌落冲击试验, 实验结果符合经典的缓冲包装材料缓冲特性曲线, 实验最大相对误差为 3.7272%。实验表明, 试验系统数据采集规范、数据处理方法准确, 并验证了试验系统的可靠性, 为缓冲包装设计提供了有利的科学依据。

关键词: 跌落冲击; 数据采集; 数据处理; 最小二乘拟合

中图分类号: TB485.1; TB486+.03 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)23-0054-06

Control and Data Acquisition Processing System of Drop Impact Testing Machine

XUE Fei¹, ZHANG Wei²

(1. Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China)

Abstract: A set of drop impact testing machine was developed based on classical cushioning properties theory of cushion material. Key issues of data acquisition and processing of free fall were studied. The interference of random signal was effectively reduced by a variety of digital filtering technology; by using a new data processing method to obtain the initial velocity, the data approaches to the actual value; the buffer curve of cushioning materials was then obtained through the least square fitting of the experimental data. Repeated drop impact experiments of EPE materials were carried out. The results satisfy the classical cushion curve, and the maximum relative error is 3.7272% of the experimental result. It was concluded that the data acquisition of the experimental system is standard, the data processing method is accurate, and the experimental system is reliable. The purpose was to provide scientific basis for cushion packaging design.

Key words: drop impact; data acquisition; data processing; least-squares fit

在缓冲包装设计中, 要求缓冲包装能够在保证安全的前提下达到最佳经济效益, 因此针对包装缓冲材料缓冲特性的分析及测试是必不可少的环节。在实际生活和工程中所用到的包装缓冲材料绝大部分是非线性的材料^[1-2], 其应力变形曲线比较复杂, 不便于直观分析。目前, 国内外对于包装设计计算衬垫的一些物理特征(如厚度和面积), 普遍采用缓冲材料的缓冲系数-最大应力曲线和最大加速度-静应力曲线来

计算^[3-4], 这 2 种曲线都是经过大量试验数据通过最小二乘拟合方法或三次样条曲线拟合绘制的^[5]。

跌落冲击试验能较真实地模拟现实生活中的冲击现象^[6], 以往的跌落冲击试验普遍采用通用的 FFT 分析仪或冲击测量仪, 两者都有一定的缺陷, 前者不具备专门处理包装材料缓冲性能的功能, 需要对实验数据进行二次处理; 后者不能提供加速度时间历程, 不能直观分辨数据的真实性^[7-8]。以至于试验者耗时, 延长了整个包装设计的开发周期。为此, 山静

收稿日期: 2013-10-10

基金项目: 国家十二五科技支撑项目(2011BAD24B01); 宁波市自然科学基金(2011A610154)

作者简介: 薛飞(1986-), 男, 山东人, 太原科技大学硕士研究生, 主要研究方向为现代机械设计理论与关键技术。

民^[9]等借助 VC++ 平台开发了缓冲包装材料动态压缩试验的测试系统,能够进行数据的采集和分析。相比 Labview 平台,开发周期较长;当测试要求变化时,不能方便地增减软件模块,使得软件功能单一。文中主要是借助虚拟仪器的思想,设计搭建了缓冲包装材料特性测试系统,完成了对缓冲包装材料特性测试分析的功能。在数据采集过程中利用光电触发系统(由遮光片和光电开关组成)触发数据采集系统。数据采集系统包括加速度传感器信号量采集和光电开关信号量采集。光电开关信号量的采集主要是计算冲击时的初速度,由于跌落冲击是瞬态冲击,冲击过程为毫秒(ms)级,可以近似地将冲击初速度的计算等效为匀速运动。刘乘、李志强^[10]等人采用数据采集卡的定时计数器功能进行初速度的计算。文中主要是通过数据采集卡同步通道对遮光片经过光电开关的过程进行数据采集计算初速度。

1 缓冲包装材料缓冲特性理论

缓冲包装产品在跌落冲击试验过程中可以用自由落体模型表示,见图 1。

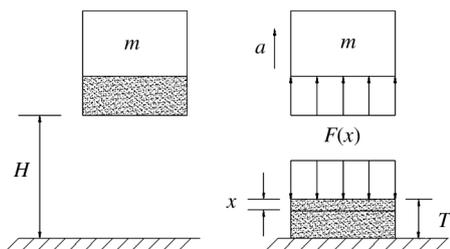


图 1 跌落冲击过程动力学模型

Fig. 1 Dynamics model of drop impact process

在理想条件下(忽略因摩擦和空气阻力而消耗的小部分机械能),由冲击载荷 F 做的功转变成缓冲包装材料的变形能^[3],其运动规律如下。

$$\int_0^x F dx + \frac{1}{2}mv^2 = W(H+x) \quad (1)$$

因为 $x = T\varepsilon$ 则

$$\int_0^x F dx + \frac{1}{2}mv^2 = \int_0^\varepsilon A\sigma T d\varepsilon + \frac{1}{2}mv^2 = AT \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon + \frac{1}{2}mv^2 = W(H+x) \quad (2)$$

式中: m 重锤的质量,kg; σ 为试样所能承受的压缩应力,且 $\sigma = F/A$,Pa; v 为冲击缓冲材料过程中重锤

的速度,m/s; A 为试样的承载面积, m^2 ; F 为作用在缓冲材料上的力,N; W 为重锤重量,N; T 为试样的厚度,m; H 为重锤的跌落高度,m; x 为试样的压缩变形量,m; ε 为试样的压缩应变,且 $\varepsilon = x/T$ 。

由牛顿第二定律得:

$$F_m = Wa_m/g \quad (3)$$

$$\text{令 } G = a/g$$

$$\text{则 } G_m = \frac{a_m}{g} = \frac{F_m}{mg} = \frac{A\sigma_m}{W} = \frac{\sigma_m}{\sigma_s} \quad (4)$$

式中: F_m 为缓冲材料达到最大变形时作用于缓冲材料上的力,N; a 为冲击过程中重锤的加速度, m/s^2 ; a_m 为冲击过程中重锤的最大加速度, m/s^2 ; G_m 为试样作用于重锤的最大加速度; g 为重力加速度; σ_s 为缓冲材料受到的静应力, $\sigma_s = W/A$,Pa; σ_m 为缓冲材料所承受的最大应力, $\sigma_m = G_m \sigma_s$,Pa。

缓冲系数 C 为缓冲效率 η 的倒数,其表达式为:

$$C = \frac{1}{\eta} = \frac{FT}{e} \quad (5)$$

式中: e 为试样的变形能, $e = \int_0^x F dx$ 。

当缓冲包装材料压缩量达到 x_m 时,即重锤的冲击速度 $v=0$ 时,由冲击载荷做功产生的能量全部转换为缓冲包装材料的变形能 e_m ,由公式(2)得:

$$e_m = \int_0^{x_m} F dx = \int_0^{\varepsilon_m} A\sigma T d\varepsilon = AT \int_0^{\varepsilon_m} \sigma d\varepsilon = W(H+x_m) \quad (6)$$

式中: x_m 为缓冲材料的最大变形量,m。

由式(3),(4)和(6)代入式(5)得动态缓冲系数

C :

$$C = G_m \frac{T}{H+x_m} \quad (7)$$

2 跌落冲击试验系统

2.1 系统原理

跌落冲击试验系统以 GB 8167《包装用缓冲材料动态压缩试验方法》为依据。其硬件由跌落冲击试验机^[11]、数据采集卡、PLC 控制系统、加速度传感器、电荷放大器、PC 机等组成,跌落冲击试验系统结构见图 2。

跌落冲击试验系统由 PC 机作为上位机,适时传输指令控制 PLC 系统动作,实现跌落冲击试验机冲台上升到试验高度和自由落体运动。当冲台做自由落

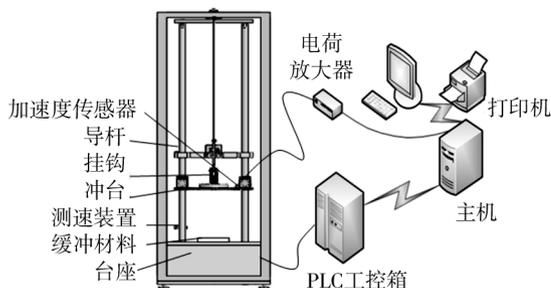


图2 跌落冲击试验系统结构

Fig. 2 Architecture of the drop impact test system

体运动与缓冲材料接触时,由测速装置的光电开关启动数据采集,冲台反弹再次经过测速装置,PC机传输指令控制PLC动作使冲台制动,数据采集结束,然后由PC机完成数据的处理。跌落冲击试验系统原理见图3。

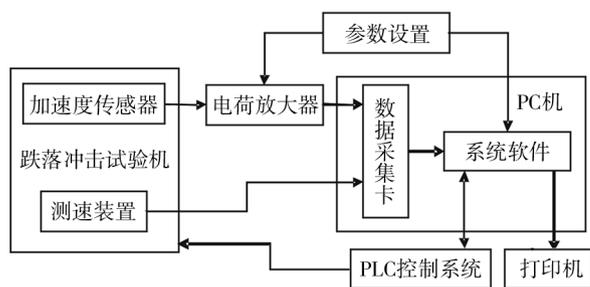


图3 跌落冲击试验系统原理

Fig. 3 Schematic of the drop impact test system

跌落冲击试验机的动作由PLC控制系统控制完成,利用modbus通讯技术使其Labview和PLC之间实现无阻通讯。PC机作为上位机适时地传输命令指令控制PLC系统的动作,实现控制的自动化。PLC控制系统使得试验机的动作更加规范,不仅动作精度得到提高,且减少了人为的干预,从而降低了试验误差。

2.2 加速度信号采集及处理

跌落冲击过程中冲击载荷做功转化为材料的弹性势能。在跌落冲击过程中,直接获取冲击载荷是比较困难的^[12-14],缓冲材料的缓冲系数与冲击过程中的加速度 a 有关,可用加速度反映。

加速度传感器采集的电荷信号首先经电荷放大器的二阶低通滤波器滤波放大,转换输出为电压量,然后经数据采集卡的模拟量通道传输至A/D转换器,将模拟量转换成数字量,送入采集卡缓存中,然后将采集的数据原码再转换成电压量。为进一步消除

冲击过程中的干扰,在程序中设有两级滤波器,首先为“限幅滤波器”,将电压量的数据中残差大于 3σ (σ 为采样数据的均方根差)剔除(因为随机尖脉冲的残差超过 $\pm 3\sigma$ 范围的概率为0.27%,可以认为是小概率事件),降低大幅度随机干扰的影响;然后再经“Butterworth滤波器”滤波,消除截止频率以外的信号。根据传感器灵敏度和电荷放大器输出mV/Unit档级的关系,经单位换算,电压量信号转换成加速度(g)信号,得到加速度-时间历程曲线,进而得到缓冲系数。上述数据采集流程见图4。

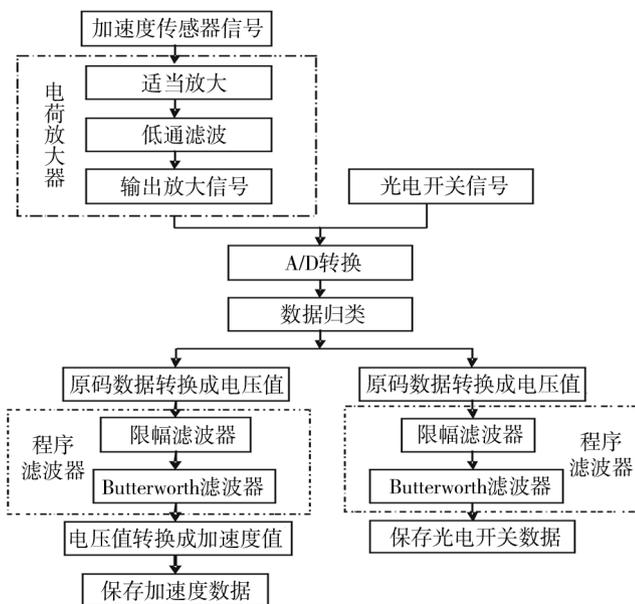


图4 数据采集处理

Fig. 4 Data acquisition and processing

2.3 冲击速度的简化计算

在跌落冲击过程中,近似地将冲击初速度和末速度计算等效为匀速运动,设冲击过程中遮光片经过光电开关的时间为 Δt ,此时间段内光电开关处于TTL高电平状态。已知数据采集卡采样速率为 f ,遮光片宽度为 h ,该 Δt 内,采集的高电平信号数量为 n (数据采集卡规定TTL电平量高电平最低电压为2V,低电平最高电压为0.8V),则重锤冲击速度 v 为:

$$v = \frac{h}{\Delta t} = \frac{h f}{n} \quad (8)$$

求得冲击初速度。

式中: h 为遮光的宽度,m; f 为数据采集卡的采样速率,Hz; Δt 为遮光片经过光电开关的时间, $\Delta t = \frac{n}{f}$,

重锤下落时第 1 次通过遮光片的速度称为初速度,回弹时第 2 次通过遮光片的速度也采用上述方法计算,称为末速度。获取速度的流程见图 5。

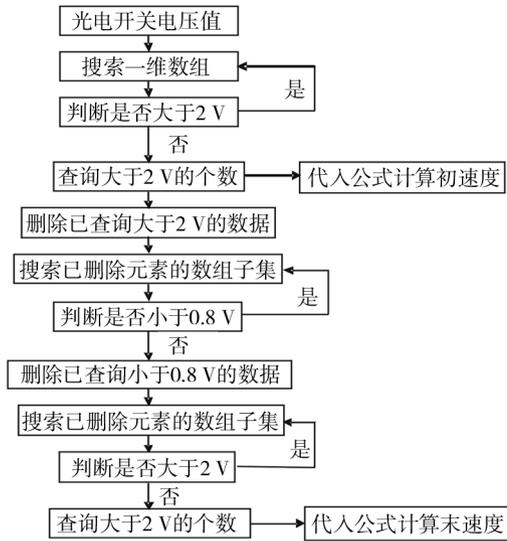


图 5 获得速度流程

Fig. 5 Flowchart of acquiring speed data

2.4 压缩变形量

在跌落冲击过程中,试样的压缩变形量可以让试验者更直观地分析缓冲包装材料的缓冲性能,试样的压缩变形量 x 可通过重锤在冲击过程中的位移量 s 来体现,其压缩变形量为:

$$s = V_0 t + \int_0^t \left(\int_0^t a(t) dt \right) dt \quad (9)$$

式中: V_0 为冲击初速度, m/s ; t 为冲击过程中重锤与缓冲包装材料接触的时间, s ; $a(t)$ 为冲击过程中重锤的加速度, m/s^2 。

在跌落冲击过程中,试样的压缩变形量为缓冲包装设计提供了定性分析,同时也为缓冲包装设计提供了有利的科学依据。

2.5 缓冲特性曲线拟合

包装缓冲材料绝大部分是非线性的材料,须多次试验并拟合得到特性曲线。文中采用最小二乘拟合方法进行数据拟合,得到缓冲系数-最大应力曲线和最大加速度-静应力曲线,且成功识别其拟合方程,可以直接应用在缓冲包装设计中计算缓冲材料的面积和厚度,减少了查找图表数据的繁琐性,为缓冲包装设计提供了有利的科学依据。

基于单次试验结果,由公式(4)及 σ_s 可得一组

$(\bar{G}_{mi}, \sigma_{si})$ (i 表示第 i 次试验, \bar{G}_{mi} 表示第 i 次试验 G_m 的平均值, $i=1, 2, \dots, n$) 数据,将此数据作为拟合程序的离散数据 (x_i, y_i) 进行最小二乘拟合,可得到最大加速度-静应力曲线。

由公式(7)及 σ_m 可得一组 (C_i, σ_{mi}) (i 表示第 i 次试验, $i=1, 2, \dots, n$) 数据,将其作为拟合程序的离散数据 (x_i, y_i) 进行最小二乘拟合,可得缓冲材料的缓冲系数-最大应力曲线。包装材料的缓冲系数越小,单位体积的缓冲材料吸收的能量越多,缓冲性能越好^[15]。最大加速度-静应力曲线和缓冲系数-最大应力曲线之间存在内在的联系,在一定的条件下可以相互转化^[16]。

3 实验

对 EPE 材料的 125 个试样进行冲击试验(EPE 材料的跌落冲击试验参数见表 1),通过对公式(4)及 σ_s , (7) 及 σ_m 分别计算,其缓冲系数 C 及最大应力 σ_m 值见表 2,将其数据利用最小二乘法拟合,试验结果见图 6。

表 1 EPE 材料跌落冲击试验参数

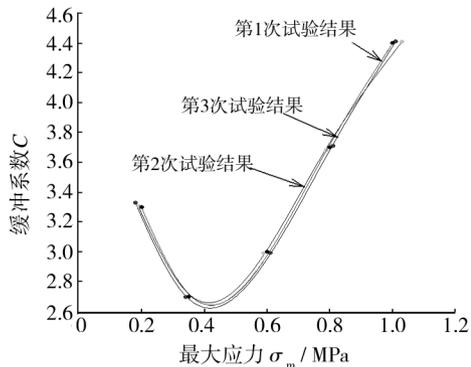
Tab.1 Drop impact test parameters of EPE material

密度 / $(kg \cdot m^{-3})$	长度 /m	宽度 /m	厚度 /m	跌落高度 /m
21.2	0.12	0.12	0.045	0.6

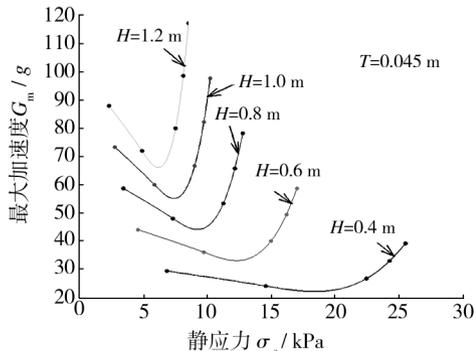
表 2 EPE 材料缓冲系数及最大应力

Tab.2 Cushion coefficient and the largest stress of EPE material

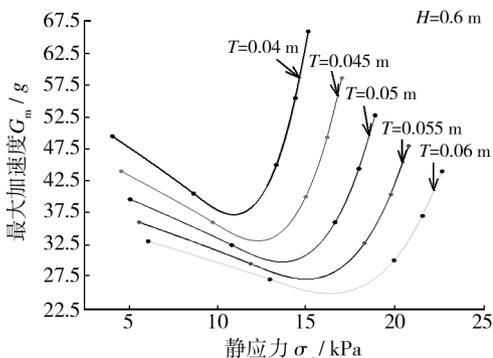
试验次数	冲击次数	C	σ_m /MPa
第 1 次试验	1	3.3009	0.2054
	2	2.7015	0.3497
	3	3.0014	0.5987
	4	3.7028	0.7993
	5	4.3961	0.9927
第 2 次试验	1	3.3052	0.1902
	2	2.7052	0.3514
	3	2.9913	0.5883
	4	3.6821	0.7884
	5	4.4081	1.0297
第 3 次试验	1	3.3303	0.1793
	2	2.6979	0.3389
	3	2.9938	0.6094
	4	3.7096	0.8099
	5	4.4094	1.0126



a 缓冲系数-最大应力曲线



b 冲击高度为变量时最大加速度-静应力曲线



c 试样厚度为变量时最大加速度-静应力曲线

图6 EPS材料的缓冲特性曲线

Fig. 6 Cushion characteristic curves of EPE material

图6a为EPE缓冲材料的缓冲系数-最大应力曲线,3条曲线是在相同条件下进行的3次试验分别获取,试验相对误差 e_c 和 e_{σ_m} 为:

$$\begin{cases} e_c = \frac{C(i+1,j) - C(i,j)}{C(i,j)} \times 100\% \\ e_{\sigma_m} = \frac{\sigma_m(i+1,j) - \sigma_m(i,j)}{\sigma_m(i,j)} \end{cases} \quad (10)$$

试验数据 C 之间的最大相对误差为0.8907%,实验数据 σ_m 之间的最大相对误差为3.7272%,产生这种情况的主要原因有材料本身结构的变化、噪声影响等。从试验数据可知,冲击试验机系统具有较好的

重复性。图6b为试样厚度 $T=0.045$ m时的EPE缓冲材料利用表2第1次实验数据在不同的跌落冲击高度 H 条件下推导获得的最大加速度-静应力曲线簇。由图6b可知,最大加速度-静应力曲线受跌落冲击高度的影响。随着跌落冲击高度 H 的降低最大加速度-静应力曲线逐渐平缓,且出现往右下方偏移现象,这是因为:

$$\begin{cases} (G_m T)_{\min} = C_{\min} H = \text{常量} \\ (G_s \sigma_s)_{\min} = (\sigma_m)_{\min} = \text{常量} \end{cases} \quad (11)$$

图6c为跌落冲击高度 $H=0.6$ m的EPE缓冲材料,利用表2第1次实验数据在不同的试样厚度 T 条件下推导获得的最大加速度-静应力曲线簇。由图6c可知,最大加速度-静应力曲线受试样厚度 T 的影响,随着试样厚度 T 的增大最大加速度-静应力曲线逐渐平缓,且出现往右下方偏移现象,这种现象的原因由公式(11)可以说明。

拟合缓冲特性曲线,随着横坐标值的增大先平滑递减,然后逐渐递增。在此曲线中有一个极值点,此处缓冲效率最大,缓冲性最好,符合EPE材料的缓冲特性。试验结果表明数据采集规范、波形完整,拟合结果可靠,为缓冲包装设计提供了有利的科学依据。

4 结语

基于虚拟仪器技术,开发了缓冲包装材料的缓冲特性测试系统,详细地描述了跌落冲击过程中数据采集与处理过程,对缓冲包装材料缓冲特性测试的研究具有重要意义。同时针对EPE材料进行了试验,进一步验证了跌落冲击试验系统的可行性,为缓冲包装设计提供了科学性依据。

参考文献:

- [1] DA Yu, KWAK J B, SEUNGBAE Park, et al. Dynamic Responses of PCB Under Product-level Free Drop Impact[J]. Microelectronics Reliability, 2010(50):1028-1038.
- [2] 卢富德,陶伟明,高德. 瓦楞纸板串联缓冲系统动力学响应[J]. 振动与冲击, 2012, 31(21): 30-32.
LU Fu-de, TAO Wei-ming, GAO De. Dynamic Response of a Series Cushioning Packaging System Made of Multi-layer Corrugated Paperboard [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(21): 30-32.
- [3] 汤伯森,奚德昌. 包装动力学[M]. 北京: 化学工业出版社

- 社,2011.
- TANG Bo-sen, XI De-chang. Packaging Dynamics[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [4] 卢富德,陶伟明,高德. 具有简支梁式易损部件的产品包装系统跌落冲击研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(15): 79-81.
- LU Fu-de, TAO Wei-ming, GAO De. Drop Impact Analysis on Item Packaging System with Beam Type Elastic Critical Component[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(15): 79-81.
- [5] MICHAEL A. S, MINETT M, ROUILLARD M, et al. A New Method for the Determination of Cushion Curves[J]. Packaging Technology and Science, 2000(13): 249-255.
- [6] 任昌,潘宏侠. 基于冲击信号的冲击响应谱研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2010(3): 21-24.
- REN Chang, PAN Hong-xia. Study of Shock Response Spectrum Based on Shocking Signal[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2010(3): 21-24.
- [7] 卢杰,焦丽娟,周廷美. 基于 Labview 的缓冲材料动态压缩测试系统设计[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(4): 534-537.
- LU Jie, JIAO Li-juan, ZHOU Ting-mei. Test System Design of Dynamic Compression Test for Cushioning Material Based on Labview[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(4): 534-537.
- [8] 邵孟,刘乘. 基于 Labview 的压力试验机测试系统的设计[J]. 包装工程, 2008, 29(10): 168-169.
- SHAO Meng, LIU Cheng. Design of Test System of Compression Testing Machine Based on Labview[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(10): 168-169.
- [9] 山静民,冯睿,谭志明,等. 缓冲材料动态压缩试验的虚拟仪器设计[J]. 包装工程, 2003, 24(4): 32-34.
- SHAN Jing-min, FENG Rui, TAN Zhi-ming, et al. Virtual Instrumental Design of Dynamic Compression Test for Cushioning Material[J]. Packaging Engineering, 2003, 24(4): 32-34.
- [10] 李志强. 包装冲击试验机专用虚拟仪器设计[J]. 包装工程, 2010, 31(7): 70-72.
- LI Zhi-qiang. Design of Virtual Instrument Used in Package Impact Testing Machine[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(7): 70-72.
- [11] HOKKA J, MATTILA T T, LI J, et al. A novel Impact Test System for More Efficient Reliability Testing[J]. Microelectronics Reliability, 2010(50): 1125-1133.
- [12] CHENG M, DIONNE J P, MAKRI S A. On Drop-tower Test Methodology for Blast Mitigation Seat Evaluation[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010(37): 1180-1187.
- [13] REIFF D, BRADLEY E. A Novel Mechanical Shock Test Method to Evaluate Lead-free BGA Solder Joint Reliability[C]//Proceedings of the 55th Electronic Components and Technology Conference, 2005: 1519-1525.
- [14] VARGHESE J, DASGUPTA A. Test Methodology for Durability Estimation of Surface Mount Interconnects under Drop Testing Conditions[J]. Microelectron Reliability, 2007(47): 93-103.
- [15] 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: Chemical Industry Press, 2010.
- [16] 苏远,汤伯森. 缓冲包装理论基础与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- SU Yuan, TANG Bo-sen. Fundamental and Application of Cushioning Packaging[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2006.

(上接第 37 页)

- [16] 韩永生,周欣. 固载二氧化氯缓释保鲜剂对巨峰葡萄保鲜效果的研究[J]. 包装工程, 2009, 30(2): 9-11.
- HAN Yong-sheng, ZHOU Xin. Study on Fresh Keeping Effect of Solid ClO₂ Slow-release Preservation on Kyoho Grape[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(2): 9-11.
- [17] 周斌,王建清. 柠檬草精油涂膜包装袋对葡萄保鲜效果的研究[J]. 包装工程, 2013, 34(9): 14-17.
- ZHOU Bin, WANG Jian-qing. Study on Fresh-keeping Effect of Grape Stored in Bag Coated with Oregano Oil[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(9): 14-17.
- [18] 李海燕,冯玉才,董世良,等. 山葡萄果实成熟过程中呼吸强度和主要营养成分的变化规律[J]. 吉林农业大学学报, 2001, 23(1): 46-49.
- LI Hai-yan, FENG Yu-cai, DONG Shi-liang, et al. Changes of Respiration Intensity and Main Nutritional Components of Fruit of Vitis amurensis during Maturation[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2001, 23(1): 46-49.
- [19] 张西芬,王秀梅,杨贤良,等. 酿酒葡萄成熟过程糖、酸、Vc 变化规律研究, 中外葡萄与葡萄酒, 1984(1): 9-12.
- ZHANG Xi-fen, WANG Xiu-mei, YANG Xian-liang, et al. Research the Variation of Sugar, Acid and VC During the Wine Grape Maturation Process[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 1984(1): 9-12.