

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2014.03.007

# 确定缓冲曲线的应力-能量法研究

史岩, 李光

(天津科技大学 包装与印刷工程学院, 天津 300222)

**摘要:** 应力-能量法是确定缓冲材料缓冲曲线的主要方法, 其能预测任意高度的缓冲曲线, 操作简便, 且基于试验所得数据进行推算, 可以得到较为精确完整的缓冲曲线, 但由于应力-能量法是以假定缓冲材料在受到冲击过程中没有能量损失为前提, 且该法较易受人为因素的影响, 故利用应力-能量法的动能公式计算得到的能量不够精确。现有对应力-能量法的应用研究可分为直接应用和改进应用两个方面, 今后的研究可适当减少能量水平和跌落次数, 进一步优化数据拟合函数的选取以及试验数据, 从而更大程度地节省材料及试验时间, 以获得更准确的缓冲曲线。

**关键词:** 缓冲曲线; 应力-能量法; 静态压缩; 动态冲击

**中图分类号:** TB487

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2014)03-0035-05

## Research on Stress-Energy Method for Determining Cushioning Curve

Shi Yan, Li Guang

(College of Packaging & Printing Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** Stress-energy method is the major method of determining cushioning curves of cushioning materials. Cushioning curves at any height could be predicted by this method with easy operation. As the calculation is based on the data from experiments, fairly accurate and complete cushioning curve could be gotten. But the assumption of stress-energy method is there is no energy lost during the impacting process of buffer materials, and this method is more easily influenced by artificial factors, therefore the energy calculated by using dynamic energy formula of stress-energy method is not precise enough. The existing application research on stress-energy method could be divided into two aspects, direct application and the improved application. In future study, the energy level and falling times could be properly reduced with the optimization of data fitting function selection and experimental data in order to save materials and experiment time to get more accurate cushioning curves.

**Key words:** cushioning curve; stress-energy method; static compression; dynamic impact

## 0 引言

产品在流通过程中易遭受振动、冲击等影响, 从而受到损坏。降低或避免产品因受冲击、振动等机械载荷损坏最有效的方法, 就是利用缓冲包装材料

对产品进行保护。缓冲包装材料可以吸收大量冲击和振动过程中产生的能量, 从而避免或降低内装物因冲击、振动而引起的损坏。缓冲包装材料能将外界冲击或振动产生的动能转换为其他形式的能量, 并吸收其中的部分能量, 使作用在被包装产品上的

收稿日期: 2014-03-19

作者简介: 史岩(1988-), 男, 安徽亳州人, 天津科技大学硕士生, 主要研究方向为运输包装技术及物流装备,

E-mail: bzshiyang@126.com

外力或能量降低到某一程度,从而对被包装产品实施保护作用<sup>[1]</sup>。在包装实践中,一般应用不同类型的缓冲包装材料,以满足不同的包装要求。目前,应用较广泛的缓冲包装材料主要有纸板类、泡沫塑料类及缓冲气垫类等。

缓冲设计通常建立在对环境条件的统计数据处理结果、产品脆值测定和缓冲材料特性等试验的基础上<sup>[2]</sup>,缓冲材料的性能主要通过动态缓冲曲线来表现<sup>[3]</sup>,利用缓冲材料的缓冲曲线,可以有效地进行缓冲包装设计<sup>[4]</sup>。确定缓冲材料缓冲曲线的方法很多,使用较普遍的为 ASTM D1596《包装材料减震性能的试验方法》<sup>[5]</sup>和 GB 8167—2008《包装用缓冲材料动态压缩试验方法》<sup>[6]</sup>,但是这两种方法均需要大量的试验数据,费时费力<sup>[7-8]</sup>。鉴于这一原因,缓冲材料生产厂家对缓冲材料的缓冲曲线很少进行更新,有的生产厂商使用的缓冲曲线甚至是过时的,这就使得缓冲材料的使用者不能很好地进行缓冲包装设计<sup>[9]</sup>。为此,国内外学者不断探索,研发出了一些确定缓冲曲线的简化方法,其中包括应力-能量法。本文在对 ASTM D1596 中的方法和应力-能量法两种确定缓冲材料缓冲曲线的方法进行简单介绍的基础上,重点探讨了应力-能量法的应用,以便为缓冲包装设计提供理论参考。

## 1 应力-能量法简介

目前,确定缓冲材料缓冲曲线的方法主要有 ASTM D1596《包装材料减震性能的试验方法》和应力-能量法。

ASTM D1596 中的方法是目前确定包装缓冲材料冲击震动吸收性能的主要方法。在这个标准中,材料的缓冲性能采用一组曲线来表示,这组曲线显示出产品在不同的冲击中所具有的不同的静应力、跌落高度,以及在不同的材料厚度下的最大加速度值。这个方法能较为准确地确定静态应力和跌落高度对材料所受冲击水平的影响。应用标准 ASTM D1596 中的方法来确定缓冲曲线,如要得到某一个最大加速度值,就需一个特定质量块从一个特定跌落高度跌落到一个面积和厚度确定的缓冲材料样品上。使用 ASTM D1596 中的方法得到的缓冲曲线较为准确,但是该方法需要大量的试验数据,耗时耗力,成本也非常高。比如,要获得一套缓冲曲线,需要使用 10 500 个样品进行跌落测试,测试时间至少需要 175 h,数据分析也需要花费大量时间。除此之外,使用这种方法,一次试验结果只能得出该缓冲材料在某一特

定高度的缓冲曲线;而如果需要该缓冲材料在 2 个不同高度下的缓冲情况,则需要进行 2 次试验,并且无法测定出任意高度下的缓冲曲线<sup>[10]</sup>。

如果按照传统方法来测定缓冲包装材料的缓冲特性,不但成本较高,过程复杂,而且测定的缓冲曲线范围也相当有限。因此,针对传统方法确定包装缓冲材料最大加速度-静应力曲线的缺陷,美国 Hewlett-Packard 公司研发中心的 Matthew Daum 博士等人,基于能量耗散物理机制、材料缓冲吸收机能和模型分析等,提出了泡沫塑料缓冲曲线的快速预测法:应力-能量法。Matthew Daum 博士在 Burgess 所阐述方法的基础上,对应力-能量法进行进一步改进<sup>[10]</sup>。Burgess 阐述了一种基于动态应力和能量密度数据,并以其对应公式确定缓冲材料缓冲曲线的方法,该法首先使用少量的缓冲试验得到相应的峰值加速度值,然后据此求出系统的动态应力与能量密度的关系曲线<sup>[11]</sup>。Burgess 后来又对此方法进行了改进,应用其改进后的方法,能从一次缓冲试验中得到能量密度数据,即对冲击脉冲进行积分,从而得到速度变化量。这样,缓冲材料所吸收的能量就可以用动能变化量来表示<sup>[12]</sup>。Matthew Daum 博士的研究表明,动应力与能量密度之间存在一定的函数关系,他们使用指数函数来表示动应力与能量密度之间的关系,提出了确定缓冲材料缓冲曲线的应力-能量法<sup>[10]</sup>。

以应力-能量法确定缓冲材料最大加速度-静应力曲线是根据能量守恒定律,并假设缓冲材料在受到冲击的过程中没有能量损失为前提的,即重锤在跌落的过程中所产生的重力势能全部转化为动能被缓冲材料吸收<sup>[13]</sup>。这样,缓冲材料单位体积的变形能就可以表示为:

$$E = \frac{mgh}{At} = \frac{sh}{t} \quad (1)$$

式中:  $E$  为动能量,  $\text{kN/m}^2$ ;

$m$  为质量,  $\text{kg}$ ;

$g$  为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;

$h$  为跌落高度,  $\text{m}$ ;

$A$  为缓冲材料表面积,即受力接触面积,  $\text{m}^2$ ;

$s$  为静应力,  $\text{kPa}$ ;

$t$  为缓冲材料的厚度,  $\text{m}$ 。

$$\sigma = G * s, \quad (2)$$

式中:  $\sigma$  为动应力,  $\text{kPa}$ ;

$G$  为加速度值,  $\text{m/s}^2$ 。

那么,动应力与动能量之间的关系可以表示为:

$$\sigma = ae^{bx} \quad (3)$$

式中:  $a, b$  为材料常数, 是由缓冲材料的类型和密度确定的常量;

$e$  为自然常数。

经推导, 可得出加速度的表达式为:

$$G = \frac{ae^{\frac{bsh}{t}}}{s} \quad (4)$$

为此, 使用应力-能量法测定缓冲材料的最大加速度-静应力曲线的步骤如下<sup>[14]</sup>:

1) 按照标准 ASTM D1596 中描述的动态压缩冲击试验方法, 记录最大冲击加速度  $G$  (加速度  $G$  可由试验直接获得), 重锤的跌落高度  $h$ , 缓冲材料的厚度  $t$ , 缓冲材料表面积即受力接触面积  $A$ , 重锤质量  $m$ , 准备数组试样进行冲击试验。为了精确, 选择 5 个具有相同的  $m, A, h, t$  的缓冲材料作为一组, 且每组单个试样进行 5 次冲击试验, 求取最大加速度的平均值, 得到一组对应的  $G, E$  值, 划分能量范围, 选取不同的能量值。重复上述过程。

根据式 (1) 与 (2), 计算每组试样的动应力及动能量。

2) 根据所测得的应力与能量的数据分布, 选择常用的以自然对数的底作为参数的指数函数, 表示动应力与动能量之间的关系, 再用试验所得数据进行曲线拟合, 于是存在式 (3) 所示的指数关系, 进而确定常数  $a, b$  的值。

3) 利用式 (4), 得出缓冲材料的最大加速度-静应力曲线。

采用应力-能量法所预测的缓冲材料的缓冲曲线, 因其依靠试验所得数据, 并按照科学理论进行推算, 因此, 其缓冲曲线横坐标范围可以从 0 到无穷大, 包含了所有的应力点。只需要经过 1 次测试便可推导出该材料在任意高度、任意缓冲厚度下的最大加速度-静应力曲线, 省时省力, 快捷且方便。但是, 应力-能量法是在假设缓冲材料在受到冲击的过程中没有能量损失为前提的, 即重锤的势能全部转化为材料的变形能, 而实际情况是重锤的重力势能未能全部被缓冲材料吸收, 实际过程中重锤的势能只有一部分转化为材料的变形能, 受到冲击后, 重锤会发生反弹, 并带走一部分能量, 即重锤离开试样时具有部分动能。重锤的重力势能、材料的变形能及重锤反弹带走的能量存在如下关系式:

$$mgh = E + \frac{1}{2}mv^2,$$

式中:  $v$  为重锤反弹时的初始速度, m/s。

因此, 利用应力-能量法所给出的动能量公式计算所得到的能量就不够精确。而在要求精确的前提

下, 利用公式  $E = \int_0^{\varepsilon_m} \sigma d\varepsilon$  计算所得到的结果更为精确可靠<sup>[15]</sup>。

## 2 应力-能量法的应用

自应力-能量法被提出之后, 国内外很多学者运用应力-能量法进行缓冲材料的性能研究, 从而获得材料的缓冲曲线。

### 2.1 直接应用

在已有对应应力-能量法的应用研究中, 有些学者只是直接地套用应力-能量法, 以之测定缓冲材料的缓冲曲线。

如路冰琳等人<sup>[16]</sup>利用应力-能量法, 进行了不同厚度、不同跌落高度下的可发性聚乙烯 (expandable polyethylene, EPE) 的动态缓冲特性研究, 结果表明, 运用应力-能量法所测得的数据与 ASTM D1596 中的测试数据拟合程度较高。

丁毅等人<sup>[17]</sup>运用应力-能量法测试了某包装材料的缓冲曲线, 得出使用该方法的关键点为: 1) 依据仪器自身的条件, 选择合适的能量值, 根据公式不断调整合适的  $s, h, t$ ; 2) 加速度  $G$  值的采集; 3) 通过数据如何得出  $a, b$  值以及加速度-静应力缓冲曲线。同时, 他们运用 Excel 软件, 给出了得到缓冲曲线的具体操作步骤, 比难懂且不易操作的计算分析软件更省时、便捷。

Ákos Mojzes 等人<sup>[18]</sup>利用应力-能量法, 测试了环境友好型泡沫塑料与可生物降解材料的缓冲性能, 结果显示, 其测试结果与公布的缓冲曲线差别不大, 利用公式计算所得结果与试验所得数据的吻合度高达 90%~95%。

已有直接应用应力-能量法获取缓冲曲线的研究结果均证明使用应力-能量法获取缓冲材料的缓冲曲线较为便捷, 但同时也会面临一些问题, 如变量的确定和测试数据和经验数据之间的差异等。

### 2.2 改进应用

有些科研工作者为了更好地确定缓冲材料的缓冲曲线, 他们在已有应力-能量法的基础上, 对其应用进行了进一步的改进。

张慧等人<sup>[19]</sup>根据应力-能量法的一般公式, 提出了直线法测定泡沫塑料缓冲系数曲线的新方法, 从而以较少的试验数据、较快的测试速度、较高的测试精度, 完成确定整个缓冲系数曲线簇的绘制。

克莱姆森大学的 Potter<sup>[20]</sup>利用应力-能量法, 对厚度变化范围为 2.54~7.62 cm 的缓冲材料进行了研究。结果表明, 3 个能量水平足以获得缓冲曲线, 每个能

量水平采用5个试样,基于材料的预期所需能量或者根据预期试验预测,选择3个能量水平。用斜率、截距和标准 $t$ 检验,可以得出,使用3个能量水平所得到的线性直线与使用5个能量水平所得到的直线无统计学差异。

Marcondes 等人<sup>[21]</sup>的研究表明,运用应力-能量法预测厚度小于2.54 cm的缓冲材料的冲击加速度是不精确的,除非原始的应力-能量法试验包括小于2.54 cm的试样。

Kendalyn 等人<sup>[22]</sup>运用应力-能量法预测缓冲曲线的研究表明,仅使用判定系数 $r^2$ 表示应力-能量公式拟合缓冲曲线的拟合优度是不够充分的,因为测试的数据点会有异常值,这些异常值会导致拟合的曲线有所偏离,因此,除了判定系数之外,还需使用均方根误差(root-mean-square error, RMSE)表示其拟合优度,低的均方根误差和高的判定系数表明,应力-能量公式能够准确地得出测试数据。

王金梅等人<sup>[23]</sup>利用应力-能量法的原理,求得5组发泡聚苯乙烯(expanded polystyrene, EPS)的动能量与动应力值,根据散点图,推测函数为多项式或者含指数项。同时,利用Matlab编程,求得动能量与最大加速度的多项式、指数拟合函数模型,从而求出静应力与最大加速度的函数关系。结果显示,研究所得多项式、指数拟合函数模型与传统方法获得的试验值相比均存在一定误差,多项式拟合的数据与实际试验得到的数据的误差较小。

以上研究结果表明,对应力-能量法获取缓冲材料缓冲曲线的方法进行改进后,能更好地确定材料的缓冲曲线,判定各相关系数。

### 3 结语

作为确定缓冲材料最大加速度-静应力曲线的方法,应力-能量法与ASTM D1596中的方法相比较,虽然ASTM D1596中的方法较为精确,但是采用ASTM D1596中的方法耗时耗力,成本较高,并且1次试验结果只能得出该缓冲材料在某一特定高度的缓冲曲线;而采用应力-能量法,能预测任意高度的缓冲曲线,操作简便,且其基于试验所得数据进行推算,可以得到更为精确完整的缓冲曲线。对于闭孔泡沫材料来说,应力-能量法能获得相当精确的缓冲曲线。因此在精确度要求不严格的场合下,应力-能量法不失为一种简便、有效的方法。

但由于应力-能量法是以假定缓冲材料在受到冲击过程中没有能量损失为前提的,且该法较易受

人为因素的影响,如设置仪器设备和调整跌落高度时易受人为因素的影响,因此,利用应力-能量法的动能量公式计算得到的能量不够精确。在应力-能量法今后的研究方面,可适当减少能量水平和跌落次数,进一步优化数据拟合函数的选取以及试验数据,从而更大程度地节省材料及试验时间,以获得更准确的缓冲曲线。

### 参考文献:

- [1] 刘继飞. 缓冲包装材料性能的分析方法与研究进展[J]. 包装工程, 2014, 35(7): 149-155.  
Liu Jifei. Analysis Method and Research Progress in Cushioning Performance of Cushion Packaging Materials [J]. Packaging Engineering, 2014, 35(7): 149-155.
- [2] 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: 信息与管理工程版, 2010, 32(4): 534-537, 546.  
Lu Jie, Jiao Lijuan, Zhou Tingmei. Test System Design of Dynamic Compression Test for Cushioning Material Based on Labview[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering, 2010, 32(4): 534-537, 546.
- [3] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2006: 104-136.  
Peng Guoxun. Logistics and Transport Packaging Design [M]. Beijing: Printing Industry Press, 2006: 104-136.
- [4] 陈淑荣. 发泡材料缓冲性能表征方法的研究进展[J]. 印刷质量与标准化, 2013(1): 25-27.  
Chen Shurong. The Research Progress of Foaming Material Buffer Performance Characterization Methods[J]. Printing Quality & Standardization, 2013(1): 25-27.
- [5] American Society of Testing Materials. ASTM D1596 Standard Test Method for Shock Absorbing Properties of Package Cushioning Materials[S]//Annual Book of ASTM Standards: 15.09. Pennsylvania: ASTM International, 2003.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 8167—2008包装用缓冲材料动态压缩试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 1-3.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the Peoples Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 8167—2008 Testing Method of Dynamic Compression for Packaging Cushioning Materials[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009: 1-3.
- [7] 山静民. 包装测试技术[M]. 北京: 印刷工业出版社, 1999: 115-116.

- Shan Jingmin. Package Testing Technology[M]. Beijing: Printing Industry Press, 1999: 115-116.
- [8] 山静民. 材料缓冲性能测试的GB法和能量法[EB/OL]. [2011-05-26]. [http://www.testimpact.com/new\\_page\\_6.htm](http://www.testimpact.com/new_page_6.htm).
- Shan Jingmin. GB Cushioning Material Performance Testing Method and the Energy Method[EB/OL]. [2011-05-26]. [http://www.testimpact.com/new\\_page\\_6.htm](http://www.testimpact.com/new_page_6.htm).
- [9] Patricia Navarro-Javierre, Manuel-Alfredo Garcia-Romeu-Martinez, Vicente-Agustin Cloquell-Ballester, et al. Evaluation of Two Simplified Methods for Determining Cushion Curves of Closed Cell Foams[J]. Packaging Technology and Science, 2012, 25(4): 217-231.
- [10] Daum M. A Simplified Process for Determining Cushion Curves: The Stress-Energy Method[C/OL]//Proceedings of the International Conference on Transport Packaging. [2014-02-02]. <http://talkpkg.com/Papers-Presentations/Presentation/Daum%20Matthew%20Dimensions06%20paper.pdf>.
- [11] Gary Burgess. Consolidation of Cushion Curves[J]. Packaging Technology and Science, 1990, 3(4): 189-194.
- [12] Gary Burgess. Generation of Cushion Curves from One Shock Pulse[J]. Packaging Technology and Science, 1994, 7(4): 169-173.
- [13] 刘乘, 刘晶. 应力-能量法在求取包装材料最大加速度-静应力曲线方面的应用分析[J]. 包装工程, 2011, 32(1): 74-75.
- Liu Cheng, Liu Jing. Application of Stress-Energy Method in Determination of Packaging Material's Buffer Characteristics[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(1): 74-75.
- [15] 张波涛. 应力-能量法在测定泡沫塑料缓冲曲线中的应用[J]. 包装工程, 2008, 29(1): 59-60, 65.
- Zhang Botao. Application of the Stress-Energy Method in Determining Cushion Curves of Foam Materials[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(1): 59-60, 65.
- [16] 路冰琳, 孙诚, 韩雪山. 运用数学拟合方法绘制动态冲击缓冲曲线的研究[J]. 包装工程, 2010, 31(15): 4-6, 24.
- Lu Binglin, Sun Cheng, Han Xueshan. Study on Drawing Dynamic Shock Cushioning Curve Based on Mathematic Fitting Method[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(15): 4-6, 24.
- [17] 丁毅, 陈立民, 苏杰. 基于能量法测试包装材料缓冲曲线的探讨[J]. 包装与食品机械, 2011, 29(6): 66-69.
- Ding Yi, Chen Limin, Su Jie. Investigate Based on the Energy Method for Determining Packing Material Cushioning Curves[J]. Packaging and Food Machinery, 2011, 29(6): 66-69.
- [18] Ákos Mojzes, Peter Földesi, Peter Böröcz. Define Cushion Curves for Environmental Firendly Packaging Foam[J/OL]. Annals of Faculty Engineering Hunedoara: International Journal of Engineering, 2012, 1: 113-118. [2014-02-02]. <http://annals.fih.upt.ro/pdf-full/2012/ANNALS-2012-1-17.pdf>.
- [19] 张慧, 谢宇坤, 王军. 直线法测定泡沫塑料缓冲系数曲线[J]. 包装工程, 2011, 32(3): 36-38.
- Zhang Hui, Xie Yukun, Wang Jun. Determination of Cushioning Performance of Foam Using Improved Stress-Energy Method[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(3): 36-38.
- [20] Potter Glen A. Performance of Expanded Polymer Cushion Materials at Less Than One Inch Thick[D]. South Carolina: Clemson University, 2010.
- [21] Marcondes P, Batt G, Darby D, et al. Minimum Samples Needed to Construct Cushion Curves Based on the Stress Energy Method[J]. Journal of Applied Packaging Research, 2008, 2(3): 191-198.
- [22] Kendalyn Paulin. Statistical Analysis of the Stress-Energy Methodology Applied to Cushion Curve Determination[D]. South Carolina: Clemson University, 2012.
- [23] 王金梅, 刘乘. 应力-能量法求取泡沫塑料缓冲曲线时函数模型的研究[J]. 包装工程, 2014, 35(5): 79-82, 101.
- Wang Jinmei, Liu Cheng. Function Models of the Stress-Energy Method in Determining Cushion Curves of Foam Materials[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(5): 79-82, 101.

(责任编辑: 徐海燕)

