

## 发泡聚丙烯本构模型在冲击试验仿真中的应用

刘 乘<sup>1</sup>, 刘 勋<sup>1</sup>, 沈训乐<sup>2</sup>

(1. 陕西科技大学, 西安 710021; 2. 无锡耐帆包装工程有限公司, 无锡 201206)

**摘要:** 把静态压缩本构方程拟合得到的应力-应变数据作为缓冲材料的载荷曲线, 利用有限元仿真软件 ANSYS LS-DYNA 对 DY-3 重锤冲击 EPP 材料进行了仿真, 得到了响应加速度-时间曲线, 并与试验曲线进行了对比, 误差在 6% 以内, 说明了利用本构方程拟合的应力-应变载荷曲线, 既能克服将缓冲材料简化为线性材料导致的缺陷, 又避免了需要通过试验获取载荷曲线的弊端。

**关键词:** 本构方程; 发泡聚丙烯; 缓冲设计; 有限元分析

**中图分类号:** TB487; TB484.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)15-0040-04

### Applications of EPP Constitutive Model in Impact Test Simulation

LIU Cheng<sup>1</sup>, LIU Xun<sup>1</sup>, SHEN Xun-le<sup>2</sup>

(1. Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China; 2. Nefab Packaging Engineering (Wuxi) Co. Ltd., Wuxi 201206, China)

**Abstract:** EPP drop test by DY-3 test machine was simulated by using ANSYS LS-DYNA and loading curves from stress-strain data fitted by compression constitutive equation. Response acceleration-time curves were obtained and compared with experimental result. Comparison results showed that the error of simulation result is less than 10%, which means that the fitting data derived by static compression constitutive equation can not only overcome the inaccuracy of simplifying EPP as a linear material, but also avoid using experiment to obtain the loading curve.

**Key words:** constitutive equation; expanded polypropylene; cushioning design; FEA

在用有限元对产品跌落进行仿真时, 为了方便计算, 将缓冲材料简化为线性材料<sup>[1]</sup>, 而如果需要设定材料类型为非线性泡沫材料, 在 LS-DYNA 中, 需要应力-应变载荷曲线, 一般需要通过材料的压力试验获得<sup>[2]</sup>。笔者把静态压缩本构方程拟合得到的应力-应变数组, 作为缓冲材料的载荷曲线, 对 DY-3 重锤冲击 EPP 材料进行仿真, 得到了响应加速度-时间曲线并与试验曲线进行对比, 即能较好地定义材料类型, 又无需试验获取载荷曲线。

### 1 EPP 静态压缩本构模型研究及参数识别

综合前人<sup>[3-5]</sup>的研究成果, 在 sherwood 模型基础上, 不考虑温度的影响, 增加密度和应变耦合影响应

力的作用、应变率、形状函数, 得出发泡聚丙烯的本构方程基本形式:

$$\sigma(\epsilon) = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^A e^{-B\left(\frac{\rho}{\rho_0}-1\right)\epsilon} [a_1\epsilon + a_2 \tan(a_3\epsilon) + a_4 \operatorname{th}(a_5\epsilon)] \quad (1)$$

式中:  $\rho_0$  为参考密度, 一般选择最低密度, 这里选为 20 kg/m<sup>3</sup>;  $A, B$  为拟合参数;  $[a_1\epsilon + a_2 \tan(a_3\epsilon) + a_4 \operatorname{th}(a_5\epsilon)]$  为形状函数。

式(1)采用应变率与应变耦合影响应力的模型, 根据试验数据, 采用 Matlab 拟合<sup>[6]</sup>模型的参数。得到一组应力-应变拟合值, 对应力-应变拟合数组进行数值积分和公式换算, 得到其  $C-\sigma$  曲线。根据文献[8], 设计缓冲材料的缓冲面积。

建立了模型后, 将根据 Matlab 分别识别其中的

收稿日期: 2012-06-10

作者简介: 刘乘(1951—), 男, 山东济南人, 陕西科技大学教授, 主要从事包装测试、控制工程方面的研究和教学。

参数。准静态压缩过程的压力试验机下压板的移动速度为 12 mm/min, 因此将根据在此压缩速度下的不同密度的 EPP 的应力-应变数据拟合参数, 压缩速率为 12 mm/min 的不同密度的 EPP 应力-应变试验数据见图 1。

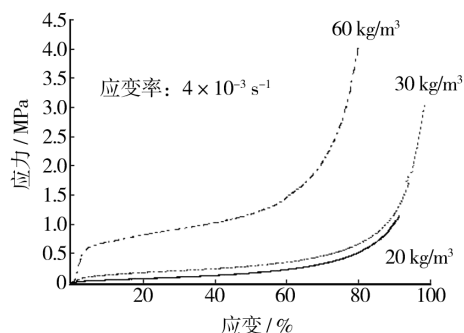


图 1 压缩速率为 12 mm/min 的不同密度的 EPP 的应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of different density EPP at compression ratio 12 mm/min

形状函数参数识别<sup>[7]</sup>: 根据密度为 20 kg/m³ 在应变率为  $4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  的应力-应变数组, 根据 Matlab 的 inline 函数进行函数定义, nlinfit 函数进行非线性参数拟合, 识别的参数:  $a_1 = -0.1620$ ,  $a_2 = 0.2219$ ,  $a_3 = 1.5313$ ,  $a_4 = 0.0303$ ,  $a_5 = 16.2153$ 。

密度函数的参数识别: 以 20 kg/m³ 为参考密度, 根据密度为 30 kg/m³, 应变率为  $4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  应力-应变数据, 采用 nlinfit 函数拟合, 识别的参数为:  $A = 2.8357$ ,  $B = 2.2631$ 。

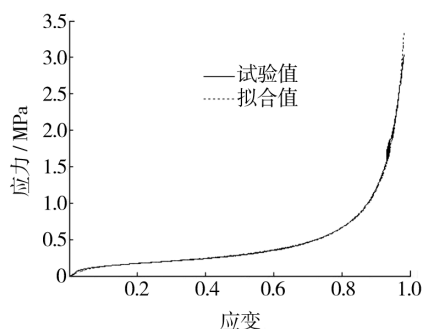


图 2 静态压缩本构方程试验值和拟合值对比

Fig. 2 Comparison of experimental data and fitting data for static compression constitutive equation

根据静态压缩本构方程拟合的应力-应变数据与试验数据对比见图 2, 可以看出方程拟合良好。

## 2 静态压缩本构方程在冲击试验仿真中的应用

本构方程在有限元中的应用分析步骤见图 3。

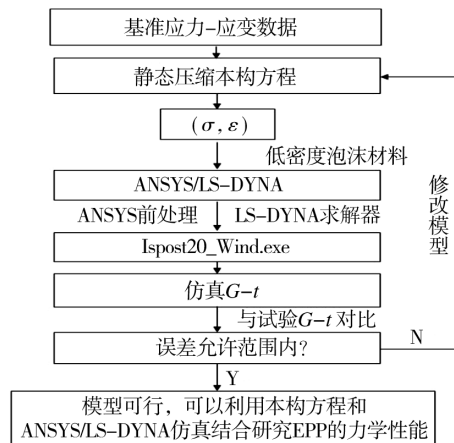


图 3 本构方程在有限元中的应用分析步骤

Fig. 3 Analysis steps for the application of constitutive equation in FEM

### 2.1 启动 LS-DANY

在 ansys 启动程序中选择 ANSYS Product launcher, 在弹出的对话框中选择 Simulation Environment 为 ANSYS, license 为 ANSYS LS-DANY, 单击 run, 进入 ANSYS LS-DANY 环境下。

表 1 有限元材料属性

Tab. 1 Material properties of FEM

	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/MPa	泊松比
质量块	2 710	$0.71 \times 10^5$	0.33
EPP	30	0.585	0.10
刚性地面	DTM 模块默认设置		

### 2.2 前处理(preprocessor)

1) 设置质量块和 EPP 泡沫单元类型为 solid 164; 材料属性见表 1。

2) 定义材料类型。重锤的材料号为 1, 材料属性为: linear isotropic; dens: 2 710,  $EX = 0.71 \times 10^{11}$ ,  $\nu = 0.33$ 。

3) 设置应力-应变曲线: Parameters-array parameters-define/edit。

根据式(1), 拟合得到密度 30 kg/m³ 的 EPP 静态压缩应力-应变数据, 见表 2。

该数组符合典型的应力-应变变形趋势, 见图 4。

表 2 应力-应变数据

Tab.2 Stress-strain data

应力/Pa	0	42 230	71 390	93 010	119 980
应变	0	0.099 8	0.201	0.299 6	0.399 8
应力/Pa	160 960	224 450	326 230	515 220	1 028 680
应变	0.5	0.6	0.7	0.800 2	0.9

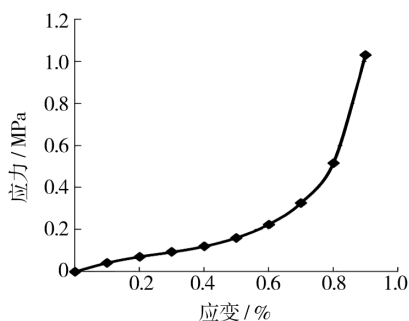


图 4 跌落仿真载荷曲线

Fig. 4 Loading curve of drop simulation

1) 建立曲线号。Preprocessor/LS-DYNA Option/Loading Option/Curve Option/Add curve 曲线 ID 为 1, 曲线横轴(abscissa vals 为 STRAIN), 纵轴: ordinate vals 选择为 stress; 建立 EPP 泡沫材料类型: crushable, Dens = 30, EX = 5.85E5, NUXY = 0.1, LOAD Curve ID: 1, tens cutoff value 5E7, viscous damp coeff = 0.1。

2) 建立模型。包装件采用体建模, 设置坐标为  $X_1, X_2$  为 0.05, 0.15;  $Y_1, Y_2$  为 0.05, 0.15;  $Z_1, Z_2$  为 0, 0.05; 重锤模型坐标为  $X_1, X_2$  为 0, 0.2,  $Y_1, Y_2$  为 0, 0.2,  $Z_1, Z_2$  为 0.05, 0.142。

3) 划分网格。在 TYPE 下拉框选择 1, 在 [MAT] 下拉框中选择 1, 其他栏用默认值, 单击 OK 按钮确认退出。在 meshtool 面板 Mesh 右侧的下拉框中选定 volumes 并选定网格类型为 hex, size control 泡沫采取 0.002, 重锤 0.005 采取同样的划分, 对刚体地面进行网格划分。

4) 创建 PART。选择 Main Menu/Preprocessor/LS-DYNA Options/Parts Option/Parts Options, 弹出 Part Data Written for LS-DYNA 对话框。在 Option 选择栏中激活 Create all parts 单选钮, 单击 OK。

5) 定义接触类型。选择 Main Menu/Preprocessor/LS-DYNA Option/Contact/Define Contact 命令, 弹出 Contact Parameter Definitions 对话框; 在设

置中选择接触类型为 Automatic Single Surface 算法, 动、静摩擦因子均设置为 0.1, 其余参数取默认值。单击 OK 按钮。

6) 施加约束, 施加  $X, Y$  的平动和  $X, Y, Z$  的转动。

### 2.3 Solution 设置分析类型

在 Energy Options, CPU Limit, Bulk Viscosity 对话框, 选用默认参量, 单击 OK 按钮, 关闭对话框。

1) 设置分析时间。Main menu/Solution/Time Controls/Solution time, 在 Terminate at Time 输入 0.03, 即跌落碰撞的求解时间为 0.03 s。

2) 设置结果文件输出类型。Main menu/Solution/Output Controls/Output File Type 设置输出文件的格式为 LS-DYNA Solve。

3) 设置结果文件输出步数。Main menu/Solution/Output Controls/File Output Freq/Number of Steps 在 [EDRST] 输入 100, [EDHTIME] 输入 100, EDDUMP 为 1。

4) DTM 设置。跌落高度为 0.6 m, 重力加速度为 9.8 m/s, 设置方向时, 从下面往上面取两点作为跌落方向。在利用压缩本构方程应力-应变数组作为载荷数组进行有限元仿真时, 根据试验结果确定 EPP 采用哪种泡沫材料模型, 确定材料模型后根据得出的材料本构方程, 输入相应的非线性参数进行跌落仿真测试。DTM 主要设置重力加速度、跌落高度和物体的跌落方向。设置完成见图 5。

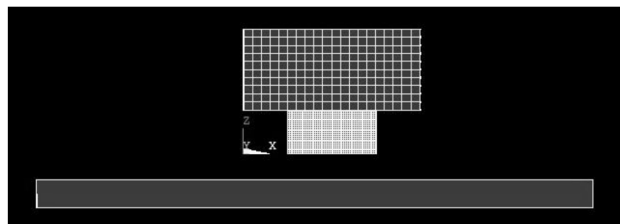


图 5 缓冲包装跌落模型

Fig. 5 Drop test model of cushioning packaging

### 2.4 求解

设置完成后, 求解。

### 2.5 后处理

求解完成后, 将生成的 d3plot 文件, 程序读取文件, 运行后处理工具包 lspost20\_wind.exe, 读取 File/Open/Binary Plot, 打开工作目录下生成的 d3plot, 单击动画控制按钮, 可以观察跌落过程与地面碰撞过程

的变形过程。可以得到不同时刻的变形图,见图 6。

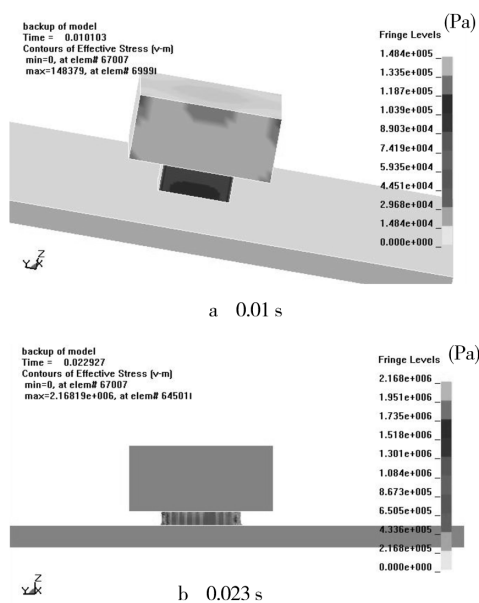


图 6 等效应力云图

Fig. 6 Equivalent stress contours

可以看出:在重锤刚接触 EPP 泡沫时所受应力最大,而后能量逐渐被泡沫吸收,直至泡沫被压缩至最大位移处,泡沫有一定的剪切变形。

对比图 7 和 8 可以看出,利用 LS-DYNA 进行有

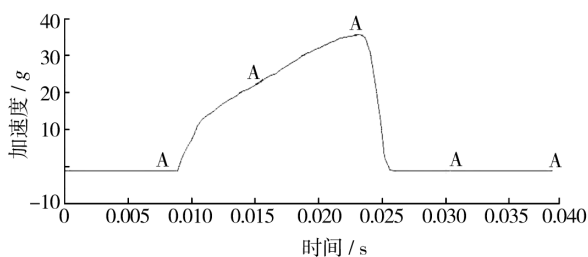


图 7 质量块顶部的节点加速度响应曲线

Fig. 7 Node acceleration curve at the top of mass block

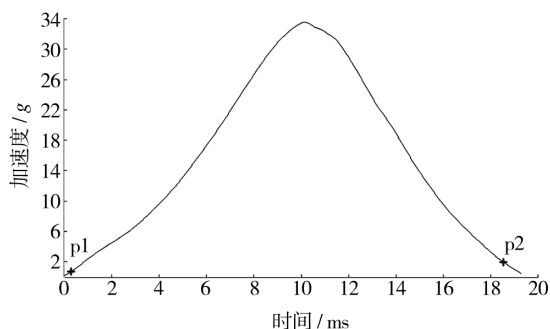


图 8 冲击加速度-时间曲线

Fig. 8 Impact acceleration-time curve

限元动态压缩仿真,得到加速度响应曲线与试验的加速度响应曲线对比,存在一定的误差,但能直观反映整个跌落过程。

### 3 结论

利用压缩本构方程进行有限元分析,根据已知密度材料的试验数据,利用本构方程拟合得到其他密度下的应力应变数据,并将其作为有限元分析的载荷曲线,利用 LS-DYNA 进行有限元动态压缩仿真,得到加速度响应曲线与试验的加速度响应曲线对比,如果试验误差在可允许的范围内,说明完全可以利用本构方程结合有限元仿真作为分析工具,此方法将可以广泛应用在工业产品的动态压缩仿真中,可极大地提高效率,发展了 CAE 在包装工程中的应用。

### 参考文献:

- [1] 胡名玺,陈煜,杜振杰,等. 基于 ANSYS /LS-DYNA 的包装件跌落仿真分析[J]. 包装工程,2007,28(11):53—54.  
HU Ming-xi, CHEN Yu, DU Zhen-jie, et al. Simulate of Packaging Drop Based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(11): 53—54.
- [2] 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—170.  
SHAO Meng, LIU Cheng. Design of Test System of Compression Testing Machine Based on LabVIEW[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(10): 168—170.
- [3] 黄少云,李东立. 发泡聚丙烯研究进展及应用展望[J]. 包装工程,2009,30(5):86—89.  
HUANG Shao-yun, LI Dong-li. Research Progress and Application Prospects of EPP[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(5): 86—89.
- [4] 李俊,高德. 低密度聚乙烯泡沫塑料压缩本构关系的研究[J]. 包装工程,2008,29(12):25—26.  
LI Jun, GAO De. Study of the Constitutive Relation of Low Density Polyethylene Foam under Compression[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(12): 25—26.
- [5] RUSCH K C. Load-compression Behavior of Brittle Foams [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1970, 14(5): 1263—1276.
- [6] 高德,卢富德. 聚乙烯缓冲材料多自由度跌落包装系统优化设计[J]. 振动与冲击,2012,31(3):69—72.

(下转第 47 页)

试验数据表明,在周边长增长到 1 600 mm 过程中,纸箱的抗压强度值随之增长,但当周边长超过该值以后,抗压强度逐渐下降。Kellicut 公式和 Makee 公式计算结果均表明随着纸箱周边长的增大,抗压强度逐渐增大,但 Kellicut 公式的计算结果相对 Makee 公式而言更加接近试验数据。由此可以认为 Kellicut 公式在生产过程中相对更具有指导意义。

#### 4 结语

瓦楞纸箱除其他因素之外,抗压强度与其尺寸具有一定相关性,试验证明在其他因素相同时,高度 400 mm,长宽比 1.6,周边长在 1600 mm 左右,这 3 个条件达到其中一个时,纸箱的抗压强度相对较高。

公式计算的抗压强度中,Kellicutt 公式计算值与实际测试值最为接近,Wolf 和 Makee 公式计算值过于保守,实际使用中参考价值有限。

仅仅从实际使用中尺寸对纸箱抗压强度的影响角度进行了试验,但瓦楞纸箱的设计生产不能完全按照最优尺寸进行。在实际中,瓦楞纸箱的设计生产需要将实际的包装需求和瓦楞纸箱最优尺寸比例相结合,最佳的尺寸只是为了给生产设计提供参考。生产者在条件允许的情况下,设计出最符合实际、节省资源的纸箱,需要根据内装物的性质、重量、规格和尺寸等条件综合考虑。

#### 参考文献:

- [1] 陈瑞. 影响纸箱抗压强度的因素分析及解决方案[J]. 包装世界,2005(10):37-41.  
CHENG Rui. Analysis on Effective Facts of Corrugated Boxes'Compressive Property and Solutions[J]. Packaging World, 2005(10):37-41.
- [2] 李春伟,王桂英,陈春晟. 手孔对瓦楞纸箱抗压强度的影响[J]. 东北林业大学学报,2008,36(6):34-36.  
LI Chun-wei, WANG Gui-ying, CHEN Chun-sheng. Effects of Handing Hole on Compressive Strength of Corrugated Box[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2008,36(6):34-36
- [3] 王俊丽,郑全成. 瓦楞纸箱的含水率对力学性能的影响[J]. 兰州交通大学学报,2006,25(3):134-136.  
WANG Jun-li, ZHENG Quan-cheng. Effect of Moisture Content of Corrugated Box on Mechanical Properties[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2006,25(3):134-136.
- [4] 刘慧. 折叠纸盒结构及其尺寸对抗压强度的影响[J]. 包装工程,2008,29(5):29-31.  
LIU Hui, ZHANG Xin-chang. Effect of Structure and Dimension on Compression Strength of Folding Cartons [J]. Packaging Engineering, 2008,29(5):29-31.
- [5] 李玉盛,张书彬. 瓦楞纸箱抗压强度的统计分析[J]. 包装工程,2005,26(3):17-19.  
LI Yu-sheng, ZHANG Shu-bin. Statistics and Analysis on the Compression Strength of Corrugated Box [J]. Packaging Engineering, 2005,26(3):17-19.
- [6] 张书彬,冯学正. 瓦楞纸箱抗压强度的试验研究[J]. 包装工程,2008,29(9):10-11.  
ZHANG Shu-bin, FENG Xue-zheng. Experiment Research of Corrugated Box's Compression Strength[J]. Packaging Engineering, 2008,29(9):10-11.
- [7] 孙诚. 纸包装结构设计[M]. 北京:中国轻工业出版社,2003.  
SUN Cheng. Structural Design of Paper Packing [M]. Beijing:China Light Industry Press, 2003.
- [8] GB/T 4857.4-2008, 包装 运输包装条件基本试验 第 2 部分:温湿度调节处理[S].  
GB/T 4857.4-2008, Packaging-Basic Tests for Transport Packages - Part 2: Temperature and Humidity Conditioning[S].
- [9] GB/T 4857.4-2008, 包装 运输包装件基本试验 第 4 部分:采用压力试验机进行的抗压和堆码试验方法[S].  
GBT 4857.4-2008, Packaging-Basic Tests for Transport Packages-Part 4: Compression and Stacking Tests Using a Compression Tester[S].

(上接第 43 页)

- GAO De, LU Fu-de. Optimization design of MDOF Package Cushioning System Made of Polyethylene[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012,31(3):69-72.
- [7] 刘学. 发泡聚乙烯包装系统动力学有限元分析[J]. 包装工程,2011,32(13):11-13.  
LIU Xue. Finite Element Analysis of Dynamic Properties of Expanded Polyethylene Cushion Packaging System [J]. Packaging Engineering, 2011,32(13):11-13.
- [8] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京:印刷工业出版社,2006.  
PENG Guo-xun. The Packaging Design of Logistics Transport[M]. Beijing:Printing Industry Press, 2006.