

# 泡沫 EPS 非线性粘弹性本构模型在 LS-DYNA 空调 跌落仿真中的研究

卢伟锋<sup>1</sup>, 刘志刚<sup>2</sup>, 李祖吉<sup>1</sup>, 周乐<sup>1</sup>, 王晓妮<sup>1</sup>, 张鹏娥<sup>1</sup>

(1.珠海格力电器股份有限公司, 广东 珠海 519070; 2.上海迅仿工程技术有限公司, 上海 201100)

**摘要:** **目的** 研究泡沫 EPS 非线性粘弹性本构模型对空调跌落仿真精度的影响。**方法** 通过动态压缩试验获得泡沫 EPS 在不同应变率下的应力-应变结果, 使用 LS-DYNA 中的非线性粘弹性本构模型 Fu-Chang 泡沫准确模拟泡沫在不同应变率下的力学性能, 并通过空调跌落仿真进行验证。**结果** 使用不同应变率下的泡沫 EPS 非线性粘弹性本构模型进行仿真, 空调不同位置的仿真加速度曲线和实际试验加速度曲线相似度在 90% 以上。**结论** 不同应变率下的泡沫 EPS 非线性粘弹性本构模型可以准确模拟 EPS 泡沫在动态冲击下的材料力学性能, 可以更加准确地模拟跌落工况中空调结构的动态反应及泡沫失效状态, 提高仿真精度。

**关键词:** 空调跌落; 应变率; Fu-Chang 泡沫; 仿真精度

中图分类号: TG156 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)17-0133-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.17.018

## Nonlinear Viscoelastic Constitutive Model of Foam EPS in LS-DYNA Air Conditioner Drop Simulation

LU Wei-feng<sup>1</sup>, LIU Zhi-gang<sup>2</sup>, LI Zu-ji<sup>1</sup>, ZHOU Le<sup>1</sup>, WANG Xiao-ni<sup>1</sup>, ZHANG Peng-e<sup>1</sup>

(1.GREE Electric Appliances, INC of ZhuHai, Zhuhai 519070, China;

2.Shanghai Share FEA Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai 201100, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the influence of foam EPS nonlinear viscoelastic constitutive model on the accuracy of air conditioner drop simulation. The stress-strain results of foam EPS at different strain rates were obtained through dynamic compression tests. The nonlinear viscoelastic constitutive model Fu-Chang foam in LS-DYNA was used to accurately simulate the mechanical properties of the foam at different strain rates, and verified by air conditioner drop simulation. By using foam EPS nonlinear viscoelastic constitutive model under different strain rates for simulation, the similarity between the simulated acceleration curve and the actual test acceleration curve of different locations of the air conditioner was more than 90%. The EPS foam nonlinear viscoelastic constitutive model under different strain rates can accurately simulate the mechanical properties of EPS foam under dynamic impact, and can more accurately simulate the dynamic response of air conditioner structures and the state of foam failure under drop conditions, to improve simulation accuracy.

**KEY WORDS:** air conditioner drop; strain rate; Fu-Chang foam; simulation accuracy

空调产品在运输过程中常常会受到冲击和碰撞，因此需要使用包装材料来提高产品的抗跌落、抗冲击能力<sup>[1-2]</sup>，保护空调产品在运输过程中不受破坏。聚苯乙烯泡沫（Expanded polystyrene，简称 EPS）是目前最常用的包装材料之一，具有价格便宜、表面光洁度好、易于注塑成型、重量轻等优点<sup>[3-4]</sup>。聚苯乙烯泡沫塑料一般是采用聚苯乙烯粒料浸渍制作或者是通过烃类发泡剂的粒料制作，聚苯乙烯颗粒中内部受热气化膨胀形成许多封闭的空腔，这种均匀的空腔结构提供了 EPS 许多独有的特性<sup>[5]</sup>。

压缩强度是聚苯乙烯泡沫包装材料抗压和缓冲性能的重要指标。Horvath<sup>[6]</sup>使用 50 mm×50 mm×50 mm 的立方体聚苯乙烯泡沫试件进行 10 mm/min 速度的无侧限单轴压缩试验，得到压缩应力-应变曲线。佟富强等<sup>[7]</sup>通过对聚苯乙烯泡沫进行不同变形速度的压缩实验，得到了不同变形速度条件下材料的缓冲系数-最大应力曲线。程志胜<sup>[8]</sup>通过静态和动态压缩试验，分析了聚苯乙烯泡沫衬垫缓冲性能的基本力学特征。但目前并没有研究泡沫 EPS 在不同应变率下的材料效应对空调整机产品仿真跌落精度的影响。

家电空调在包装实验中，跌落高度在 0.6~3 m 之间，这是一个典型的瞬态动力学过程，冲击瞬间泡沫和机身材料的应变率可达 100 s<sup>-1</sup>，而材料在不同应变率下会呈现不同的力学行为<sup>[9]</sup>，因此，空调内机跌落仿真工况中，单一的准静态拉伸实验得出的应力-应变无法准确的体现材料在跌落过程中的动态力学行为，需要通过动态拉伸试验得出不同应变率下的应力-应变曲线来定义材料动态力学行为。文中主要通过 LS\_DYNA 中泡沫非线性粘弹性本构模型研究泡沫 EPS 在不同应变率下的材料效应对空调内机跌落仿真精度的影响，通过试验获得 EPS 泡沫塑料力学行为的有限元表征，并应用于某款空调产品进行跌落试验对标、验证。

## 1 粘弹性材料模型

粘弹性属性是高分子聚合物材料非常典型的一种属性，但是在高速碰撞模拟中这一类材料的粘弹性属性很难准确模拟。例如在 LS-DYNA 中最常用的采用 von-Mises 屈服面的 MAT\_024 材料，虽然可以通过处理动态应变率试验获得的初始刚度，将屈服应力平移到相对较低的数值来实现粘弹性属性<sup>[10]</sup>，但是会导致塑性应变过大，无法在工程实际中应用。线性粘弹性模型通常采用多个线性流变模型组成，例如 Maxwell 模型、Kelvin 模型、Burgers 模型等。在 LS-DYNA 中的泡沫材料本构一般采用 Maxwell 模型作为基础流变模型<sup>[11]</sup>，例如 MAT\_057，MAT\_077 等。在一维体系中，线性粘弹性本构关系的积分表达式，

也称为 Boltzmann 固体积分形式：

$$a(t) = \int_0^t G(t-u)\dot{\varepsilon}(u)du \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}(u) = \frac{\partial \varepsilon(u)}{\partial u} \quad (2)$$

式中： $\mu$  为衰减时间； $a(t)$ ， $\varepsilon(t)$  为应力、应变； $G(t)$  表达式的卷积形式的通过积分可以重新得到式（3）的形式。

$$\sigma(t) = G(t) * \dot{\varepsilon}(t) = G(0)\varepsilon(t) - \int_0^t \frac{dG(t-u)}{du} \varepsilon(u)du \quad (3)$$

粘弹性材料都具有“记忆衰减”特征，其松弛模量一般都是连续单调非增函数。

线性粘弹性模型见图 1，基于 Kelvin-Voigt 模型发展而来，将阻尼器替换为多个并联的 Maxwell 模型。

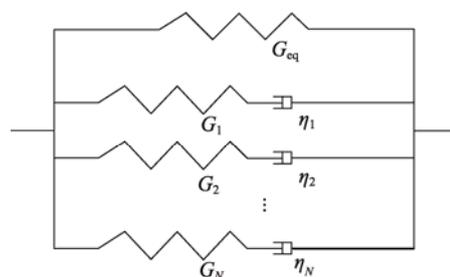


图 1 线性流变模型  
Fig.1 Linear rheological models

其松弛模量表达式为：

$$G(t) = G_{eq} + \sum_{i=1}^N G_i e^{-\beta_i t} \quad (4)$$

$$\beta_i = \frac{\eta_i}{G_i} \quad (5)$$

式中： $G_{eq}$  为并联的线性弹簧的刚度； $G_i$  和  $\eta_i$  分别为 Maxwell 单元中串联的线性弹簧刚度和线性阻尼器的粘滞系数； $\beta_i$  为衰减常数。

对于常应变率 Maxwell 单元有：

$$\varepsilon_1 = \dot{\varepsilon}_1 t \quad (6)$$

将式（4-5）代入式（3）中：

$$\sigma_1(t) = \dot{\varepsilon}_1 G_{eq} t + \dot{\varepsilon}_1 \sum_{i=1}^N \frac{G_i}{\beta_i} (1 - e^{-\beta_i t}) \quad (7)$$

由式（7）得出应力-应变结果成比例关系，但是在线性粘弹性中的应力-应变并没有表现出线性关系<sup>[12]</sup>。对于实际材料，应力-应变的线性关系仅仅局限于一定的应力、应变、时间和温度范围内<sup>[13]</sup>。对于高速碰撞、跌落工况则无法满足这样的条件，因此线性的粘弹性模型不能适用。

常用的非线性粘弹性本构形式有多重积分型、单积分型和微分型等<sup>[14]</sup>。Green-Rivlin 模型<sup>[15]</sup>作为典型的非线性粘弹性模型，基于连续函数假设，通过傅里叶展开积分多项式：

$$\begin{aligned} \sigma(t) = & \int_0^t \mathbf{K}_1(t-u_1) : \mathbf{E}(u_1) du_1 + \\ & \int_0^t \int_0^t \mathbf{K}_2(t-u_1, t-u_2) : \mathbf{E}(u_2) du_1 du_2 + \\ & \int_0^t \dots \int_0^t \left[ \left[ \left[ \mathbf{K}_n(t-u_1, t-u_2, \dots, t-u_n) : \mathbf{E}(u_1) \right] : \mathbf{E}(u_2) \right] : \dots \right] : \\ & \mathbf{E}(u_n) du_1 du_2 \dots du_n \end{aligned} \quad (8)$$

式中： $\sigma(t)$  为 Piola-Kirchhoff 应力张量； $\mathbf{E}$  为 Green-Lagrangian 应变张量；卷积核  $\mathbf{K}_n$  为第  $2(1+n)$  阶张量，可以更好地考虑材料在不同应变率下的应力-应变关系，因此在高速碰撞、整机跌落工况下需选择非线性的粘弹性模型。

## 2 动态压缩试验及标定

### 2.1 泡沫动态应变率压缩试验

文中研究对象是密度为  $30 \text{ kg/m}^3$  的 EPS 泡沫，进行不同应变率的动态压缩试验，基于 ISO 844—2014 硬质泡沫塑料压缩特性测定，试验选择的泡沫样件长宽高尺寸为  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ，应变率范围包含： $1 \times 10^{-3}$ （准静态）， $0.01, 1, 10, 100 \text{ s}^{-1}$ 。其中应变率  $1 \times 10^{-3}$ （准静态）在 CMT4104 电子万能试验机上进行，对应的加载速度为  $3 \text{ mm/min}$ （准静态）；其他应变率对应的加载速度分别为  $30, 50, 0.5, 5 \text{ m/s}$  在 Zwick 高速拉伸压缩试验机上进行，载荷数据通过试验机获得，而应变信息采用 DIC 获取<sup>[16]</sup>。泡沫原始材料件和切割后的试样见图 2。

根据不同的应变率设置试验机的加载速度完成泡沫的准静态和动态压缩试验。通过实验获取材料不同应变率的力-位移曲线，见图 3，在相同应变率下，加载段压缩力随着应变率增加而增大，说明随着应变率的提高，EPS 材料的压缩刚度随之增大，材料卸载段的刚度也同样增加。

### 2.2 动态压缩试验对标

根据泡沫在不同应变率下试验结果，获得不同应

变率的名义应力-名义应变曲线，选择 LS-DYNA 中的 83 号 \*MAT\_FU\_CHANG\_FOAM 非线性粘弹性材料模型，通过 TBID 参数将不同应变率下的应力应变曲线输入到材料中，即可根据动态压缩试验考虑泡沫在不同应变率下的刚度变化。MAT\_083 材料的本构基于 FU-Chang 在 1995 年对泡沫本构的研究<sup>[17]</sup>，应变分为线性部分和非线性部分：

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}^L(t) + \mathbf{E}^N(t) \quad (9)$$

对应的应变率：

$$\dot{\mathbf{E}}(t) = \dot{\mathbf{E}}^L(t) + \dot{\mathbf{E}}^N(t) \quad (10)$$

并假设材料只有瞬间的“记忆”，经历时间参数  $\tau=0$ ，对应的屈服泰勒级数表达式为：

$$E_i^N(\tau) = E^N(0) + \frac{\partial E_i^N}{\partial t}(0) dt \quad (11)$$

相应假设本构方程为：

$$\sigma(t) = \sigma^* \left( E^N(0), \frac{\partial E_i^N}{\partial t}(0), S(t) \right) = \quad (12)$$

$$\sigma^* \left( E^N(0), \dot{E}^N(t), S(t) \right)$$

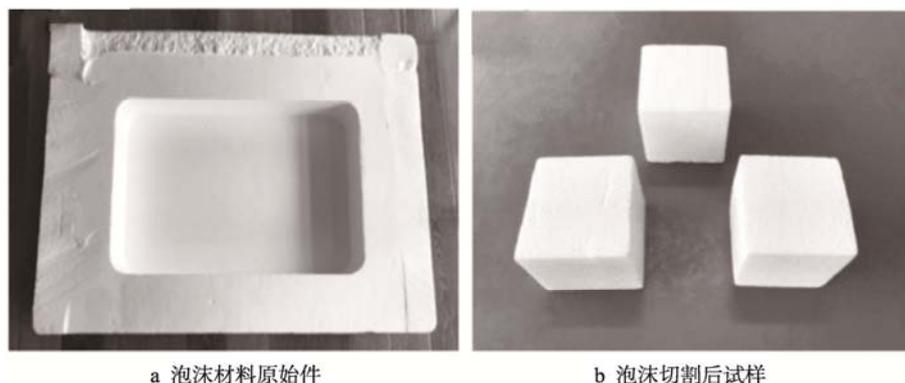
式中： $S(t)$  为状态变量。

标定结果见图 4，试验结果与仿真结果表现出较好的一致性。高应变率工况下，试验和仿真都表现出一定的噪音，但基本趋势吻合较好。低应变率压缩工况下，试验曲线更加平滑，仿真和试验结果非常接近。

结果表明，MAT\_083 材料可以很好地模拟 EPS 泡沫在受压状态下的力学特性，试验和仿真力-位移曲线贴合度较好，材料卡片可以应用到跌落分析中。

## 3 空调整机跌落试验及仿真

该次空调整机跌落试验包含了 3 次连续跌落，过程按照角跌—与角相连的最短边跌落—最小面跌落顺序进行，见图 5。



a 泡沫材料原始件

b 泡沫切割后试样

图 2 泡沫试验试样  
Fig.2 Foam sample

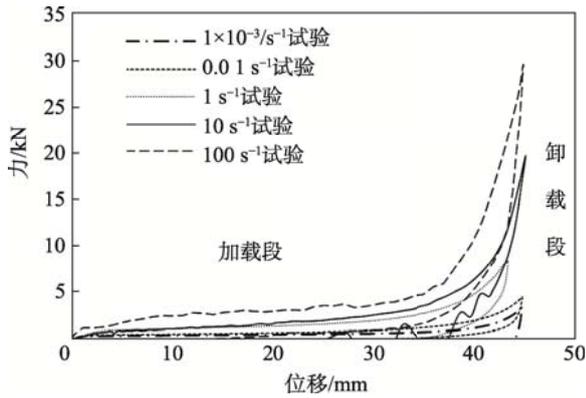


图3 不同应变率下泡沫力-位移曲线  
Fig.3 Force-displacement curve of foam under different strain rates

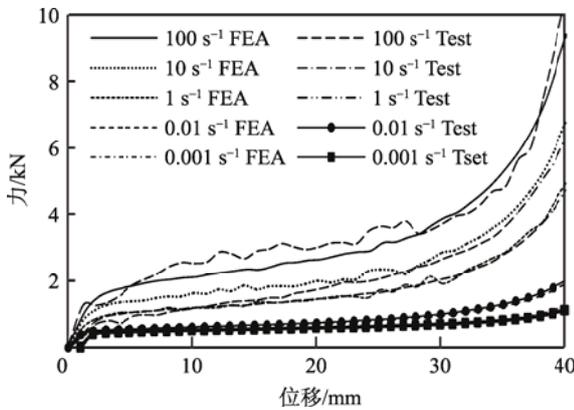


图4 试验和仿真力-位移曲线对比  
Fig.4 Comparison of force-displacement curve between test and simulation

试验跌落过程中使用 4 个加速度传感器对空调不同位置的加速度时程结果进行记录,加速度传感器测点位置见图 6。

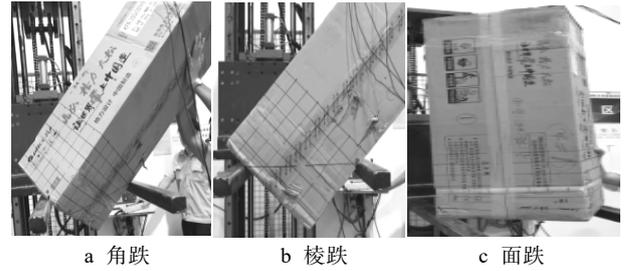


图5 空调3种不同跌落顺序  
Fig.5 3 drop sequences of air conditioner

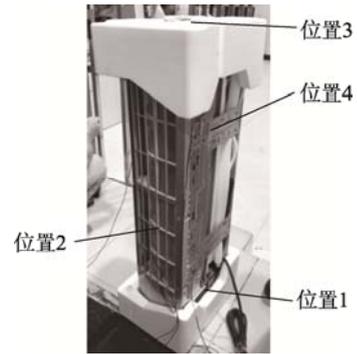


图6 跌落加速度传感器位置  
Fig.6 Locations of drop acceleration sensors

空调有限元模型建立,空调钣金结构、塑料结构采用壳单元划分,泡沫和橡胶结构采用实体单元划分。整体情况见表 1。

泡沫网格尺寸在 3 mm 和 5 mm 左右时,泡沫的失效比较接近,但是 5 mm 计算时间要比 3 mm 计算时间减少一半。随着泡沫网格尺寸增加,泡沫失效开始减小,当网格尺寸增加到 10 mm,泡沫出现的失效很少,见图 7。不同网格尺寸的模型计算时间见表 2,选择 5 mm 网格进行模拟可以使计算精度和计算效率之间达到较好的平衡。

表 1 空调整机有限元模型统计  
Tab.1 Summary of the air conditioner FE model

整机			有限元模型		
实体整机质量/kg	有限元整机质量/kg	误差/%	壳单元数量	实体单元数量	整机单元总数
14.5	14.3kg	1.40	50 万	130 万	180 万

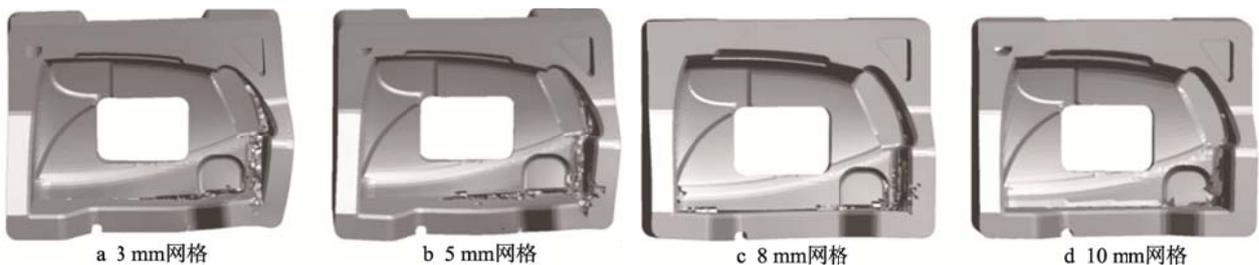


图7 不同网格尺寸泡沫破坏状态  
Fig.7 Foam failure state of different element sizes

最终通过角—棱—面 3 次连续跌落后结果表明,在相同模型条件下,考虑应变率的泡沫模型与实际泡沫破坏情况更加贴近,仿真结果的精度更高,见图 8。

输出最后面跌落工况下不同位置传感器的加速度时程结果,见图 9。通过软件的曲线对比功能,包括峰值、面积、最大和最小值、线形以及滤波后的线

性分析后得到的应变率结果与试验加速度曲线相似度在 90%以上,不考虑应变率结果曲线差别较大。

采用非线性粘弹性本构模型并考虑应变率效应的跌落模型可以更加准确模拟泡沫结构在整个跌落过程中的变形状态,整个模型的加速度反应也更加符合实际工况。

表 2 不同网格尺寸模型对比  
Tab.2 Comparison between models of different element sizes

网格尺寸/mm	泡沫网格数量( $\times 10^4$ )	计算时间/min
3	130	202
5	36	190
8	24	106
10	12	105



图 8 空调跌落泡沫失效状态对比

Fig.8 Comparison of failure states of different foam models

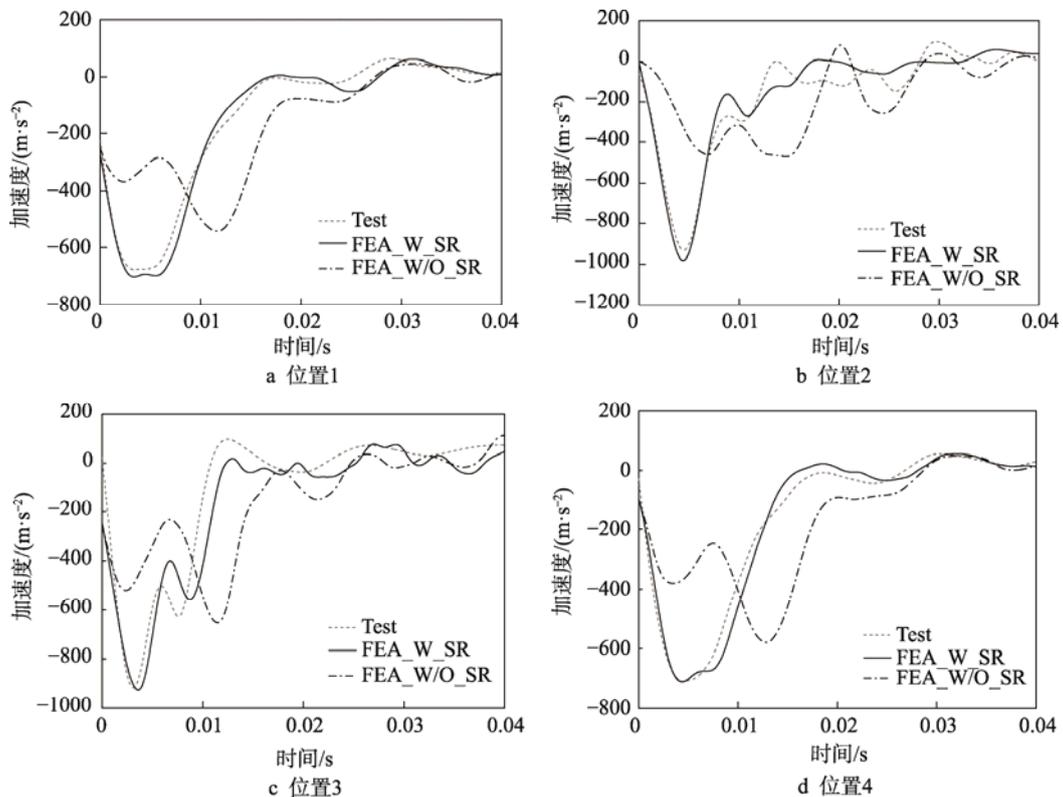


图 9 最终跌落加速度结果

Fig.9 Acceleration results of final drop test

## 4 结语

通过对泡沫 EPS 进行不同应变率的动态压缩试验、整机跌落试验及仿真对标, 可以得出如下结论。

1) 泡沫 EPS 在不同应变率下的压缩性能差别较大, 通过动态压缩试验结合非线性粘弹性模型可以准确模拟 EPS 泡沫结构在动态冲击下的材料力学性能。

2) 考虑应变率效应的泡沫材料模拟结果和试验具有较好的一致性; 在跌落过程中可以更加准确模拟结构的动态反应和失效状态, 不同位置的加速度曲线和实际试验加速度曲线相似度在 90%以上。

3) 不同密度的 EPS 泡沫材料都具有应变率效应, 文中的方法可以应用到不同密度的 EPS 泡沫材料, 同时为其他产品泡沫包装结构的跌落分析提供应用方向。

### 参考文献:

- [1] 李俊. 发泡聚乙烯缓冲性能的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010: 1—3.  
LI Jun. Studies of Buffer Performance for Expanded Polyethylene[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010: 1—3.
- [2] 朱若燕, 李厚民. 空调包装结构的跌落仿真分析[J]. 包装工程, 2006, 27(6): 4—6.  
ZHU Ruo-yan, LI Hou-min. Dropping Emulation Analysis of the Packaging Structure for Air Conditioner[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(6): 4—6.
- [3] 汤伯森. 包装动力学[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 2001: 10—15.  
TANG Bo-sen. Impact Dynamics[M]. Changsha: Hunan University Press, 2001: 10—15.
- [4] 杜骋, 杨军. 聚苯乙烯泡沫(EPS)的特性及应用分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2001, 31(3): 138—142.  
DU Cheng, YANG Jun. Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam: An Analysis to Characteristics and Applications[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2001, 31(3): 138—142.
- [5] 李忠, 郭丽. 聚苯乙烯泡沫(EPS)综述[J]. 四川建材, 2012(5): 10—11.  
LI Zhong, GUO Li. Summarizes of Expanded Polystyrene[J]. Sichuan Building Materials, 2012(5): 10—11.
- [6] HORVATH J S. Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam: An introduction to Material Behavior[J]. Geotextiles and Geomembrances, 1994, 13: 263—280.
- [7] 佟富强, 刘宝璋, 杜金来. 形变速率对聚苯乙烯泡沫材料缓冲性能的影响[J]. 塑料包装, 2000, 12(1): 32—34.  
TONG Fu-qiang, LIU Bao-zhang, DU Jin-lai. The Influence of Deformation Speed for Expanded Polystyrene[J]. Plastics Packaging, 2000, 12(1): 32—34.
- [8] 程志胜, 徐英. 聚苯乙烯泡沫衬垫的缓冲性能研究及建模[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2000, 18(1): 66—70.  
CHENG Zhi-sheng, XU Ying. Research on Buffer Properties about Polystyrene Foam Liner and the Establishment of Model[J]. Journal of Jiamusi University(Natural Science Edition), 2000, 18(1): 66—70.
- [9] SINGH N K, CADONI E, SINGHA M K, et al. Dynamic Tensile Behavior of Multi Phase High Yield Strength Steel[J]. Materials & Design, 2011, 32(10): 5091—5098.
- [10] VERNIKA E, PAUL D, MARKUS F. Nonlinear Viscoelastic Modeling for Foams[C]// 13th International LS-DYNA User Conference, Detroit, America, 2014.
- [11] LSTC. LS-DYNA Keyword User's Manual[M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2007: 304—310.
- [12] TSCHOEGL N W, TSCHOEGL C A. The Phenomenological Theory of Linear Viscoelastic Behavior[D]. Berlin: Springer, 1989: 69—156.
- [13] WILLIAM N, DAVIS F A, ONARAN K. Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials[M]. America: North Holland Publishing Co, 1976: 22—39.
- [14] 刘朝晖, 李轶鹤. 非线性粘弹性本构理论的讨论[J]. 南华大学学报(理工版), 2003, 17(2): 1—8.  
LIU Zhao-hui, LI Yi-he. Discussion on Constitutive Theory of Nonlinear Viscoelasticity[J]. Journal of Central-south Institute of Technology, 2003, 17(2): 1—8.
- [15] GREEN A E, RIVLIN R S. The Mechanics of Non-linear Materials with Memory-Part I[J]. Archive for Rational Mechanics and Analysis, 1959, 3(2): 82—90.
- [16] 陈俊岭, 李哲旭, 舒文雅, 等. 不同应变率下 Q345 钢材力学性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45(6): 1145—1150.  
CHEN Jun-ling, LI Zhe-xu, SHU Wen-ya, et al. Experimental Study on Dynamic Mechanical Behavior of Q345 Steel Under Different Strain Rates[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2015, 45(6): 1145—1150.
- [17] FU S C, SONG Y, LU D X, et al. Unified Constitutive Equations of Foam Materials[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1998, 120(3): 212—217.