

聚乙烯泡沫缓冲系统跌落冲击过载仿真分析

申展¹, 陈东², 罗俊杰¹

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039;

2.陆军航空兵军事代表局驻成都地区军事代表室, 成都 610000)

摘要:目的 将聚乙烯泡沫静态压缩特性引入有限元中创建材料, 并应用于跌落冲击进行过载仿真分析。

方法 通过聚乙烯泡沫静态压缩实验, 得到材料真实应力-应变曲线, 并引入基于 Ansys 的 Crushable Foam 模型, 最后仿真分析聚乙烯泡沫缓冲系统的跌落冲击过载, 并与跌落实验结果进行对比分析。**结果** 聚乙烯泡沫缓冲系统的仿真冲击加速度曲线与跌落实验曲线趋势基本吻合。**结论** 基于 Crushable Foam 模型的聚乙烯泡沫静态压缩性能的引入可行、有效, 并为非线性缓冲系统有限元分析提供了参考价值。

关键词: 聚乙烯; 压缩; 跌落; 冲击过载; 缓冲泡沫

中图分类号: TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)19-0128-04

Simulation and Analysis of Dropping Impact Acceleration of Polyethylene Foam Buffer System

SHEN Zhan¹, CHEN Dong², LUO Jun-jie¹

(1.Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China;

2.The Army Aviation Military Agent's Office in Chengdu, Chengdu 610000, China)

ABSTRACT: The work aims to create polyethylene foam material in the finite element by introducing its static compressive property and apply it to the simulation and analysis of dropping impact acceleration. The actual stress-strain curve of the material was obtained by static compressive test of polyethylene foam and used in Crushable Foam model via Ansys. Finally the dropping impact acceleration of polyethylene foam buffer system was simulated and analyzed, and compared to dropping test results. Simulation impact acceleration curve of polyethylene foam buffer system was consistent with dropping test curve on the whole. It is feasible and effective to introduce the static compressive property of polyethylene foam based on Crushable Foam model, and the reference value is provided for the finite element analysis of nonlinear buffer system.

KEY WORDS: polyethylene; compressive; dropping; impact acceleration; crushable foam

产品在运输和使用过程中, 跌落冲击是最为常见且最致命的致损因素, 而缓冲材料则发挥着保护产品的作用, 旨在将冲击对产品造成的影响控制在可接受范围内^[1-3]。聚乙烯泡沫材料是一种交叉键

合的闭孔型塑料, 静态特性为双曲正切型弹性体。基于其闭孔特性, 当材料受到冲击时, 泡孔产生变形, 吸收能量并缓和冲击, 因此聚乙烯泡沫作为缓冲材料被广泛应用^[4-6]。目前国内外均进行了相关

收稿日期: 2016-06-14

基金项目: 申展 (1988—), 女, 重庆人, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为缓冲包装有限元分析。

通讯作者: 陈东 (1983—), 男, 贵州人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航空军械。

研究,例如陈马旭等^[7]对导弹跌落进行了仿真分析, Lim 等^[8]对便携式电子产品的跌落冲击进行了仿真分析。基于有限元的跌落冲击过载仿真分析成为了现代缓冲包装设计的主要手段之一,然而在跌落冲击过程中,聚乙烯泡沫受冲击变形是一个瞬态并伴随着几何非线性、材料非线性的复杂过程,聚乙烯泡沫材料特性的差异,将直接影响产品跌落冲击过载响应^[9-11],因此将聚乙烯泡沫静态压缩特性引入并应用于跌落冲击过载仿真分析变得极其重要。

1 聚乙烯泡沫静态压缩特性

1.1 材料静态压缩实验

材料样品选用 L-2000 型高发泡聚乙烯泡沫,样品截面尺寸为 100 mm×100 mm,厚度为 40 mm,密度为 37 kg/m³。按照 GB/T 8168—2008 包装用缓冲材料静态压缩实验方法进行压缩实验,测得聚乙烯泡沫应力-应变曲线见图 1。从图 1 可以看出,当压缩开始时,聚乙烯泡沫应力、应变呈线性变化,材料处于弹性阶段,泡沫孔壁发生弯曲;当应变达到 0.05 左右,样品应力、应变均呈非线性变化,应变的增量远远大于应力的增量,材料处于屈服阶段,泡沫泡孔塌陷;当应变到达 0.35~0.4 时,应力快速增加,而应变增加相对较缓。

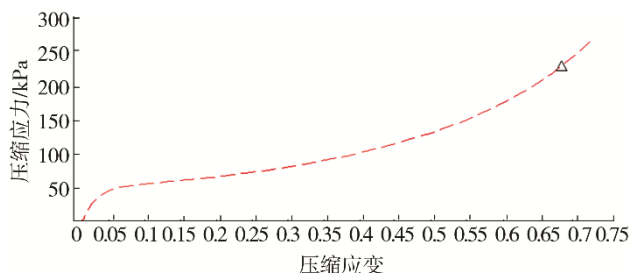


图 1 聚乙烯泡沫压缩应力-应变曲线

Fig.1 Polyethylene foam compressive stress-strain curve

1.2 实验数据处理

选取图 1 位于中间的样品应力-应变曲线作为参考数据,并考虑到实际的跌落冲击过程极短暂,聚乙烯泡沫缓冲材料压缩应变几乎不会超过 0.5,因此实验数据选取压缩应变在 0~0.5 范围内的应力-应变曲线。通过压缩实验得到材料参数为工程应力-应变曲线^[12],在实际应用中需要将其转化为材料真实应力、应变。真实应变转化和真实应力转化的计算公式:

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon) \quad (1)$$

$$\sigma_T = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (2)$$

式中: ε_T 为真实应变; ε 为工程应变; σ_T 为真实应力; σ 为工程应力。

将所选取的试验数据,按式(1)和式(2)转化为材料的真实应力-应变曲线。

1.3 基于 Ansys 的聚乙烯泡沫材料模型

首先在 Ansys 中定义聚乙烯泡沫材料基础的线性参数,定义密度 ρ 为 37 kg/m³,弹性模量为 1.05 MPa,泊松比为 0.18。利用 Crushable Foam 模型引入上述材料的静态压缩特性,该模型主要应用于多孔可压缩泡沫的冲击碰撞,模型方程:

$$\sigma_{ij}^{n+1} = \sigma_{ij}^n + E \dot{\varepsilon}_{ij}^{n+1/2} \cdot \Delta t^{n+1/2} \quad (3)$$

式中: E 为弹性模量; $\dot{\varepsilon}_{ij}^{n+1/2}$ 为应变率; t 为时间; σ_{ij}^n 应力。

在 Crushable Foam 模型中输入聚乙烯泡沫材料的真实应力-应变曲线,见图 2。Crushable Foam 模型通过输入材料的真实应力-应变曲线,能预测出材料在冲击碰撞过程中的近似响应。定义聚乙烯缓冲泡沫的阻尼系数为 0.1,由于缓冲跌落过程中聚乙烯泡沫主要产生压缩变形,因此 Crushable Foam 模型中的最大拉应力值可以忽略。

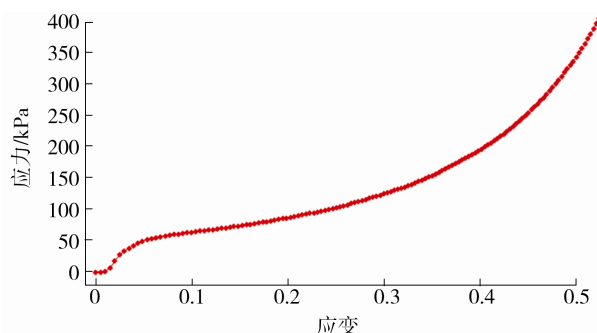


图 2 聚乙烯泡沫真实应力-应变曲线

Fig.2 Polyethylene foam actual stress-strain curve

2 缓冲系统的跌落冲击过载仿真分析

1) 缓冲系统模型。运用 Proe 软件对聚乙烯缓冲泡沫缓冲系统建立模型,并导入 Ansys 有限元仿真分析软件的 Autodyn 模块进行跌落冲击过载的仿真分析,建立的模型见图 3。由图 3 可知,模型由产品和放置于产品前、中、后的 3 个缓冲垫及地

面组成。产品总质量为 50 kg, 缓冲垫总质量为 1.2 kg。在产品的重心位置选取单元 1 作为跟踪点, 用以记录该单元的冲击过载响应曲线。缓冲垫与产品进行距离地面 0.5 m 的自由跌落, 其跌落高度可以换算成缓冲垫与产品接触地面瞬间的初速度, 因此模型中可设置缓冲垫与地面间隙为 0.1 mm, 几乎接触地面。该建模方式可以不考虑跌落过程中的下落过程, 大大缩短了仿真运算时间, 同时提高了仿真分析效率。

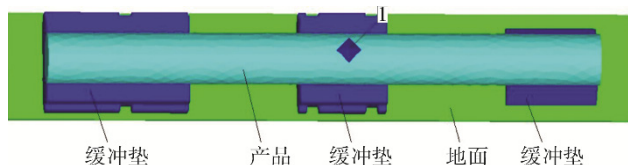


图3 模型结构

Fig.3 Model structure diagram

2) 定义材料属性、设置接触、网格划分。按上述方法在 Ansys 中引入聚乙烯泡沫静态特性, 建立聚乙烯泡沫材料, 并将定义好的材料赋予模型中的缓冲垫。模型中产品材料为 Q235 碳素结构钢, 密度为 7850 kg/m^3 , 弹性模量为 200 GPa, 泊松比为 0.3, 产品设定为刚体; 地面为混凝土, 密度为 2300 kg/m^3 , 弹性模量为 30 GPa, 泊松比为 0.18。模型的接触面为缓冲垫与产品、缓冲垫与地面。接触面为非线性实体接触, 选择 "Pure Penalty" 惩罚函数方法对接触面进行控制, 阻止模型之间出现渗透, 接触面均采用主-从面接触。缓冲垫与产品的接触面设定为 "Bonded", 缓冲垫与地面的接触面设定为 "Frictionless"。在有限元分析过程中, 网格划分的精度直接影响到计算结果的精度, 模型中网格采用 "Element Size" 进行划分, 通过对单元 Size 的设定, 控制网格划分精度。

3) 施加载荷与约束。赋予模型中产品和缓冲垫 3.14 m/s 的初速度, 方向指向地面, 赋予模型重力加速度 9.8 m/s^2 , 方向指向地面, 设置地面为刚性并施加固定约束, 设定仿真分析时间为 55 ms。

4) 分析结果输出。通过 Autodyn 求解得到产品在 0.5 m 高度跌落过程中冲击加速度-时间历程曲线, 见图 4, 可以看出产品在落地瞬间与地面发生碰撞, 并对产品产生冲击过载。产品重心跟踪点处的冲击加速度响应持续时间大约为 12 ms, 冲击加速度峰值为 940 m/s^2 , 即冲击过载为 94g。

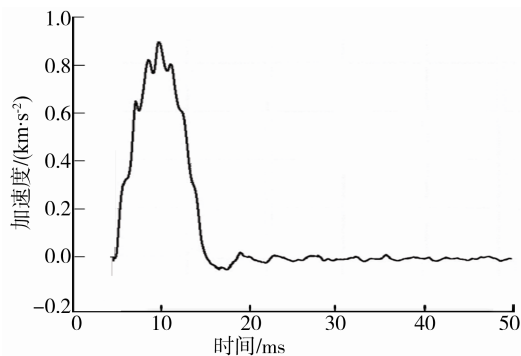


图4 跟踪点的加速度-时间历程曲线

Fig.4 Gauge#1 acceleration-time curve

3 缓冲系统的自由落落实验

3.1 实验原理

将模型中的缓冲垫与产品吊装至距离地面 0.5 m 高度进行自由跌落, 并与水泥地面发生碰撞。跌落冲击过载信号通过安装在产品重心位置处的压电式加速度传感器 (电荷型), 采集信号并传输至信号放大器和动态信号分析仪, 再由动态信号分析仪输出冲击过载-时间历程曲线。压电式加速度传感器将跌落冲击过载信号转换成电荷量, 通过电缆输出。传感器输出的电荷量极其微弱, 通过信号放大器将电荷量放大, 并转换成电压信号。转换后的电压信号经动态信号分析仪输出为冲击过载曲线^[13-14]。

3.2 跌落冲击实验结果

通过动态信号分析仪得到产品重心位置处的跌落冲击过载曲线, 见图 5, 可以看出缓冲包装产品在大约 20 ms 时与地面发生碰撞, 产品重心位置的跌落冲击过载持续时间大约为 10 ms, 冲击过载峰值为 88g。

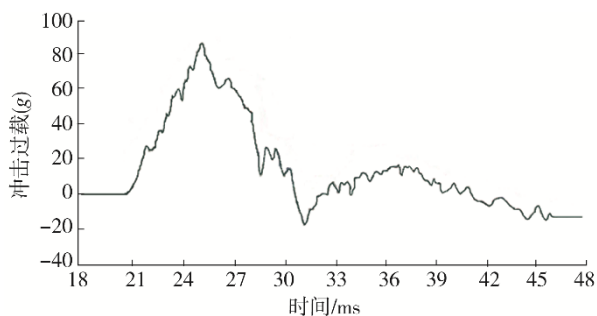


图5 重心位置的冲击过载-时间历程曲线

Fig.5 Centre-of-gravity position acceleration-time curve

4 仿真与实验数据对比分析

在跌落冲击过程中, 冲击过载的峰值和冲击过载持续时间是两大主要参数, 因此将仿真分析得到的加速度曲线和实验得到的冲击过载曲线的峰值、持续时间进行对比分析。由于仿真分析通过赋予缓冲垫与产品初速度来代替跌落高度 0.5 m, 因此跌落过程中无下落时间, 产品与地面碰撞几乎直接开始。由图 4 所示, 冲击加速度曲线几乎从 0 开始。跌落实验则是将其吊装至高度为 0.5 m, 在碰撞地面之前会有一段短暂的下落过程, 在该时间段内产品不会受到冲击过载。由图 5 所示, 大约在 20 ms 处产品才与地面碰撞, 产生冲击过载。图 4 和图 5 中冲击曲线开始时间不一致, 这并不影响曲线波形的比较。图 4 和图 5 中仿真冲击加速度曲线和跌落实验冲击过载曲线持续时间大约都在 10 ~ 12 ms, 即仿真和实验的冲击过载曲线持续时间一致。同时, 仿真分析的冲击过载峰值为 94g, 跌落试验的冲击过载峰值为 88g, 相对误差为 6.4%。误差主要来自于以下 2 个方面: 仿真分析模型为无空气阻力、无摩擦的自由落体理想模型, 而实际实验中存在摩擦和空气阻力, 因此会产生一定的误差; 实际实验的传感器和采集仪存在一定的漂移及噪声, 对于精度要求极高的动态冲击实验也会产生一定的误差。综上所述, 仿真分析跌落冲击过载曲线和跌落实验曲线趋势基本吻合, 仿真数据与实验数据的误差在可接受范围内。

5 结语

以聚乙烯泡沫压缩实验数据为依据, 利用 Crushable Foam 模型将实验数据引入仿真分析软件, 将创建的聚乙烯泡沫材料应用于缓冲系统的跌落冲击过载仿真分析。文中验证了聚乙烯泡沫缓冲系统跌落冲击过载仿真分析的可行性和有效性, 为非线性缓冲系统有限元分析提供了参考价值。

参考文献:

- [1] 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(3): 69—72.
GAO De, LU Fu-de. Optimization Design of MDOF Package Cushioning System Made of Polyethylene[J].

- Vibration and Shock, 2012(3): 69—72.
- [2] YIA J W, PARK B G J. Development of a Design System for EPS Cushioning Package of a Monitor Using Axiomatic Design[J]. Advances in Engineering Software, 2005(3): 273—284.
- [3] KIM W J, KUM D H, PARK S H. Effective Design of Cushioning Package to Improve Shockproof Characteristics of Large-Sized Home Appliances[J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2009, 37(1): 1—14.
- [4] MILLS N J, MASSO-MOREU Y. Finite Element Analysis Applied to Polyethylene Foam Cushions in Package Drop Tests[J]. Packaging Technology and Science, 2005(8): 29—38.
- [5] IRVING S, LIU Y. Free Drop Simulation of Portable IC Package by Implicit Transient Dynamics FEM[C]// Proceedings Electronics Components and Technology Conference, 2004
- [6] 展全伟, 索涛, 项新梅. 多孔材料冲击波效应的数值模拟[J]. 河南科技大学学报, 2012(1): 12—14.
ZHAN Quan-wei, SUO Tao, XIANG Xin-mei. Numerical Simulation of Shock-wave Effects of Porous Material[J]. Journal of Henan University of Science and Technology, 2012(1): 12—14.
- [7] 陈马旭, 乐贵高. 带泡沫缓冲的导弹跌落仿真[J]. 兵工自动化, 2014(3): 34—35.
CHEN Ma-xu, LE Gui-gao. Simulation of Missile Drop with Foam Cushion[J]. Ordnance Industry Automation, 2014(3): 34—35.
- [8] LIM C, TEO Y M, SHIM V. Numerical Simulation of the Drop Impact Response of a Portable Electronic Product[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2002, 25(3): 478—485.
- [9] WANG Y Y, LU C, LI J, et al. Simulation of Drop Impact Reliability for Electronic Devices[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2005(1): 667—680.
- [10] 汤伯森. 冲击动力学[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 2001.
TANG Bo-sen. Impact Dynamics[M]. Changsha: Hunan University Press, 2001.
- [11] 熊建友, 辛勇. Ansys/LS-DYNA 在跌落仿真中的应用[J]. 计算机辅助工程, 2003, 7(2): 46—49.
XIONG Jian-you, XIN Yong. Application of Ansys/LS-DYNA in Drop Simulation[J]. Computer Aided Engineering, 2003, 7(2): 46—49.
- [12] 李俊. 发泡聚乙烯缓冲性能的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
LI Jun. Cushion Properties of EPE[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [13] 朱明武, 李永新. 动态测量原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.
ZHU Ming-wu, LI Yong-xin. Dynamic Measurement Principle[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993.
- [14] 黄俊钦. 测试系统动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
HUANG Jun-qin. Test and Measurement Dynamic[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996.