

## 缓冲与隔振

## 基于 Johnson-cook 本构模型的 EPE 包装跌落冲击模拟

雷鹏, 付志强, 张莉伟, 陈明芬, 张蕾

(天津科技大学 包装创新设计实验室, 天津 300222)

**摘要:** **目的** 将聚乙烯泡沫塑料在动态压缩试验下得到的力学性能引入有限元中, 创建材料模型, 并应用于跌落冲击仿真分析, 以提高仿真的精确度。**方法** 通过聚乙烯泡沫塑料在不同速率下的压缩试验, 得到真实的应力-应变曲线, 并基于 Johnson-cook 本构模型在有限元中建立 EPE 的材料模型。最后用 Ansys Workbench 中的 LS-DYNA 模块对聚乙烯泡沫缓冲包装的跌落过程进行仿真分析, 用 LS-PREPOST 软件进行后处理。在此基础上, 对比分析仿真结果和实验结果。**结果** 仿真结果的误差分别为 0.85%, 1.6%, 2.97%, 与实验结果基本一致。**结论** 基于 Johnson-cook 本构模型构建的聚乙烯泡沫塑料有限元材料模型能有效提高低速冲击的仿真精度, 为非线性材料和应变率敏感材料的有限元动态冲击分析提供了参考。

**关键词:** 发泡聚乙烯; 冲击; 有限元; 精度

**中图分类号:** TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)19-0070-05

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.19.013

## EPE Package Drop Impact Simulation Based on Johnson-cook Constitutive Model

LEI Peng, FU Zhi-qiang, ZHANG Li-wei, CHEN Ming-fen, ZHANG Lei

(Packaging Innovative Design Laboratory, Tianjin University of Science &amp; Technology, Tianjin 300222, China)

**ABSTRACT:** The work aims to introduce the mechanical properties of polyethylene foams obtained by dynamic compression experiments into the finite element to create material model and apply them to drop impact simulation analysis to improve the accuracy of the simulation. The actual stress-strain curves were obtained through compression experiments at different rates of polyethylene foam, and a material model of EPE was established in finite element based on the Johnson-cook constitutive model. Finally, the LS-DYNA module in the Ansys Workbench was used to simulate the drop process of the polyethylene foam cushioning package and LS-PREPOST software was used for post-processing. On this basis, the simulation results and experimental results were compared and analyzed. The errors of simulation results were respectively 0.85%, 1.6% and 2.97%, which were basically consistent with the experimental results. The finite element material model of polyethylene foam constructed based on the Johnson-cook constitutive model can effectively improve the simulation accuracy of low-velocity impact, which provides a reference value for the finite element dynamic impact analysis of nonlinear materials and strain rate sensitive materials.

**KEY WORDS:** foamed polyethylene; impact; finite element; accuracy

聚乙烯泡沫塑料有着优良的耐化学性和缓冲保护性, 被广泛用于电子产品、精密仪器仪表、家用电器、食品、军工等行业<sup>[1]</sup>, 其力学性质是进行缓冲包装设计的重要依据, 得到国内外专家学者的大量研究。卢子兴<sup>[2]</sup>等对前人泡沫塑料力学性能研究的主要

理论和实验结果进行了综述, 表明相对密度、应变率和温度会影响泡沫塑料的力学性能。高德<sup>[3]</sup>等建立了发泡聚乙烯的动态非线性本构模型, 为包装的优化设计提供了参考。Tateyama<sup>[4]</sup>等对聚乙烯泡沫进行了不同速率的压缩试验, 表明聚乙烯泡沫应变率敏感

收稿日期: 2018-06-12

基金项目: 天津科技大学青年创新基金 (2016LG27)

作者简介: 雷鹏 (1993—), 男, 天津科技大学硕士生, 主攻包装动力学。

通信作者: 付志强 (1982—), 男, 博士, 天津科技大学讲师, 主要研究方向为运输包装数值模拟技术。

性受泡沫中气体流动的影响。Zhang<sup>[5]</sup>等用实验表明聚合物泡沫塑料力学性能依赖于应变速率和温度，并提出了一种关于应变速率与温度的弹塑性泡沫本构模型。

近年来，随着有限元技术的发展，其在包装行业得到广泛应用<sup>[6-8]</sup>。Wang<sup>[9]</sup>等通过对有限元分析结果和实验的对比，表明应变率对纸浆模产品承载能力、能量吸收有显著影响。Yeh 等<sup>[10]</sup>基于 Ansys/LS-DYNA 模块，采用各项同性线弹性材料模型对电子元件进行跌落分析。对比实验和仿真结果的加速度峰值、冲击时间来进行仿真结果可靠性验证。陈马旭<sup>[11]</sup>等基于 ABAQUS 软件，采用 Crushable Foam 模型对带泡沫缓冲的导弹进行跌落仿真，以验证包装的可靠性。

许多专家和学者基于有限元软件对泡沫塑料跌落冲击进行仿真分析，取得了一定的成果，但在跌落仿真中并没有考虑应变率对结果的影响。由此，这里将聚乙烯泡沫塑料的应变速率和非线性属性引入有限元中来创建材料模型变得极为必要。

## 1 聚乙烯泡沫塑料力学性能

### 1.1 仪器与方法

主要仪器：美国 instron 电子万能试验机，产品编号为 3369，规格为 3 kN，最大速度为 500 mm/min，见图 1；DY-2 型跌落试验机，Lansmont 公司 PCB 三向传感器及数据采集系统，用于收集包装跌落碰撞过程中的加速度-时间曲线等相关数据，见图 2。主要材料：长宽均为 100 mm、高为 55 mm 的 EPE 缓冲垫，聚乙烯泡沫塑料包装的红酒瓶。实验方法：分别在 12 mm/min 的准静态与 100 mm/min 的动态条件下压缩，每隔 10 ms 取 1 个数据点，以对比不同应变速率下聚乙烯发泡材料的力学性能；红酒瓶的跌落高度选择 300，400，500 mm，在跌落过程中，PCB 三向传感器能直接得到  $x$ ， $y$ ， $z$  等 3 个方向的加速度-时间曲线。

### 1.2 实验结果

不同压缩速率下的应力-应变曲线见图 3，在相同密度的条件下，压缩速率对聚乙烯发泡塑料力学性能有着显著的影响。在线性阶段，压缩速率对应力-应变曲线影响较小，但在屈服强化阶段影响则较大。有限元材料模型的构建必须要考虑应变速率的影响，这对提高有限元动态冲击的仿真精度有重要的意义。

跌落加速度曲线见图 4，跌落高度为 300 mm 时， $z$  方向和总加速度的最大值出现在 14.3 ms 处，分别为 61.73g 和 62.42g。跌落高度为 400 mm 时， $z$  方向

和总加速度的最大值出现在 13.55 ms 处，分别为 76.74g 和 78.81g。跌落高度为 500 mm 时， $z$  方向和总加速度的最大值出现在 13.6 ms 处，分别为 94.65g 和 94.97g。

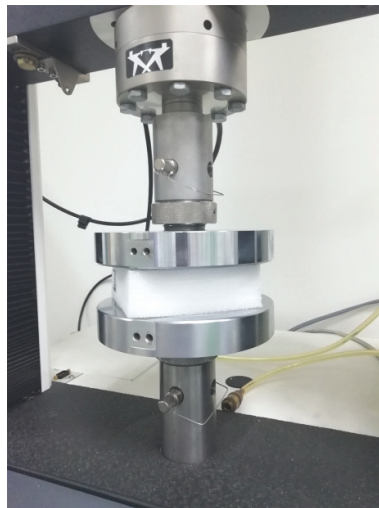


图 1 万能材料试验机

Fig.1 Universal material testing machine



图 2 跌落试验机

Fig.2 Drop testing machine

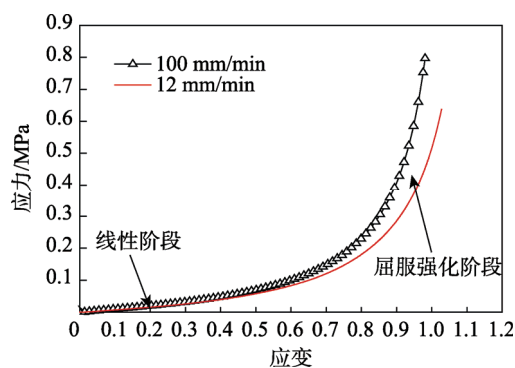


图 3 不同压缩速率下的应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves at different compression rates

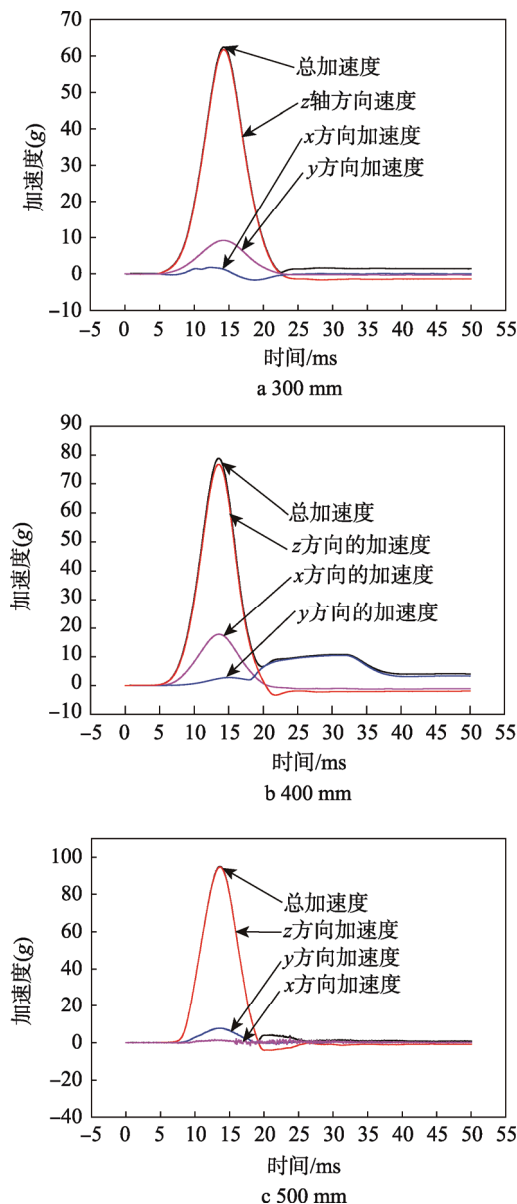


图4 不同跌落高度的加速度曲线  
Fig.4 Acceleration curves at different drop heights

## 2 建立 EPE 材料模型与有限元模型

### 2.1 建立 EPE 材料的 Johnson-cook 模型

国内,许多专家基于 Johnson-cook 模型在有限元中构建金属高速冲击下的材料模型<sup>[12-13]</sup>,并用实验证明了有限元模型的可靠性。

Johnson-cook 模型公式为:

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\varepsilon'}{\varepsilon'_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中:  $A$  为屈服强度;  $B$  为硬化常数;  $n$  为硬化指数;  $C$  为应变率常数;  $m$  为热化指数;  $T_m$  为材料熔融温度;  $T$  为实验温度,取  $T=293\text{ K}$ ;  $T_r$  为参考温度,一般  $T_r=293\text{ K}$ ;  $\varepsilon'$  为材料真实应变率;  $\varepsilon'_0$  为准静态

条件下材料的应变率;  $\varepsilon$  为塑性应变。该本构模型中采用热激活机制的模型  $1 + C \ln \left( \frac{\varepsilon'}{\varepsilon'_0} \right)$  表示应变速率对材料力学性能的影响。为增加参数求解精度,基于最小二乘法原理用 Matlab 求解参数  $B$  和  $n$ 。最小二乘法原理为:

$$Q_{\min} = \sum_{i=1}^n (B\varepsilon_i^n - \sigma_i)^2 \quad (2)$$

式中:  $\sigma_i$  为试验结果的真实应力值。

分析准静态 ( $12\text{ mm/min}$ ) 下的实验数据, EPE 在压缩过程中屈服应力为  $10.18\text{ kPa}$ , 所以参数  $A=10.18\text{ kPa}$ 。塑性阶段, 基于最小二乘法原理用 Matlab 求解参数, 得  $B=0.3423$ ,  $n=2.686$ 。此外, 取相同应变下  $100\text{ mm/min}$  对应的压缩应力与  $12\text{ mm/min}$  对应的压缩应力的比值作为函数值  $y$ , 应变作为自变量  $x$ 。用 Matlab 线性拟合, 拟合结果为  $y=1.3265$ , 在此基础上可得  $C=0.154$ 。该实验在室温条件下进行, 因此不考虑温度对仿真结果的影响, 令  $m=1$ 。由此得到的参数见表 1。

表1 本构模型参数

Tab.1 Constitutive model parameters

| 模型参数  | 数值                  |
|-------|---------------------|
| $A$   | $10.18\text{ kPa}$  |
| $B$   | $0.3423\text{ kPa}$ |
| $C$   | $0.154$             |
| $n$   | $2.686$             |
| $T_m$ | $393\text{ K}$      |
| $m$   | $1$                 |

线性阶段弹性模量  $E=1.6\text{ MPa}$ , 泊松比  $\mu=0.4$ <sup>[1]</sup>, 配合聚乙烯线性阶段材料属性构建 EPE 显示动力学材料模型。

将本构方程拟合结果与  $100\text{ mm/min}$  速率下的实验数据进行对比, 见图 5。由图 5 可知, 当应变

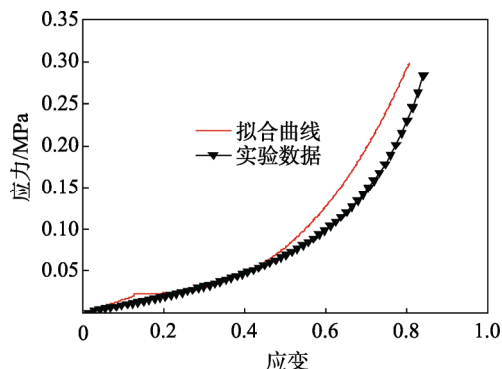


图5 本构方程拟合曲线与实验数据的对比  
Fig.5 Comparison between the constitutive equation fitting curves and experimental data

小于 0.5 时, 本构方程拟合曲线与实验数据有良好的一致性; 应变大于 0.5 时, 拟合曲线与实验数据差距较大。这说明, 该本构方程适用于 EPE 材料的低应变条件。

2.2 建立 EPE 材料有限元模型

运用 SolidWorks 进行全尺寸建模, 模型分为红酒瓶、EPE 缓冲结构、地面等 3 个部分, 导入 Ansys 中的 LS-DYNA 模块进行跌落分析<sup>[14-15]</sup>。为了提高计算速度, 简化瓶身四周的缓冲结构。

1) 定义材料。赋予 EPE 弹塑性材料属性, 并在 "Johnson Cook Strength" 输入表 1 中的参数。设定地面、瓶子为线弹性材料属性, 输入其他材料参数<sup>[15]</sup>, 见表 2。

| 表 2 材料属性<br>Tab.2 Material property |          |       |                              |
|-------------------------------------|----------|-------|------------------------------|
| 材料                                  | 弹性模量/GPa | 泊松比   | 密度<br>/(kg·m <sup>-3</sup> ) |
| 红酒瓶                                 | 90.3     | 0.243 | 2530                         |
| 金属地板                                | 200      | 0.3   | 7850                         |

2) 接触设置。缓冲结构与瓶身接触方式采用 "bonded", 缓冲材料与地面接触方式采用 "frictionless"。

3) 网格划分。网格划分见图 6, 使用 "Sphere of influence" 网格划分方式, 将瓶底 50 mm 半径范围内的网格尺寸设置为 2 mm。缓冲材料采用 "Hex Dominant" 六面体主导网格划分, 单元尺寸设为 2 mm, 共划分 27 500 个单元。

4) 边界条件设置。根据公式  $v = \sqrt{2gh}$  计算出 300, 400, 500 mm 跌落高度下, 接触速度分别为  $v_a=2.45$  m/s,  $v_b=2.83$  m/s,  $v_c=3.16$  m/s, 并为整个模型施加重力场 ( $g=9.8$  m/s<sup>2</sup>)。

5) 结果后处理。在 LS-PREPOST 软件中导出竖直方向上的加速度曲线, 并结合实验结果对仿真进行可靠性分析。

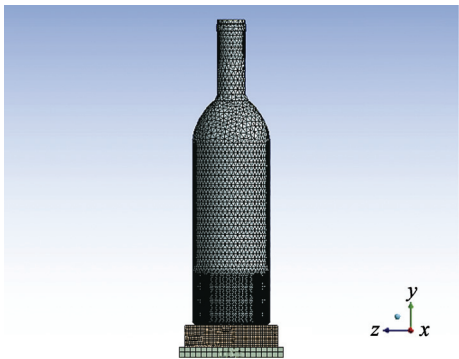


图 6 网格划分  
Fig.6 Grid section

3 仿真结果与实验对比分析

跌落高度为 300 mm 时, 仿真结果  $z$  方向的最大加速度为 612.1057 m/s<sup>2</sup>, 实验结果为 617.35 m/s<sup>2</sup>, 误差为 0.85%, 见图 7a。跌落高度为 400 mm 时, 仿真结果为 767.4046 m/s<sup>2</sup>, 误差为 1.6%, 见图 7b。跌落高度为 500 mm 时, 仿真结果  $z$  方向的最大加速度为 918.3708 m/s<sup>2</sup>, 实验结果为 946.48 m/s<sup>2</sup>, 误差为 2.97%, 见图 7c。由此可见, 有限元结果和实验结果基本一致。

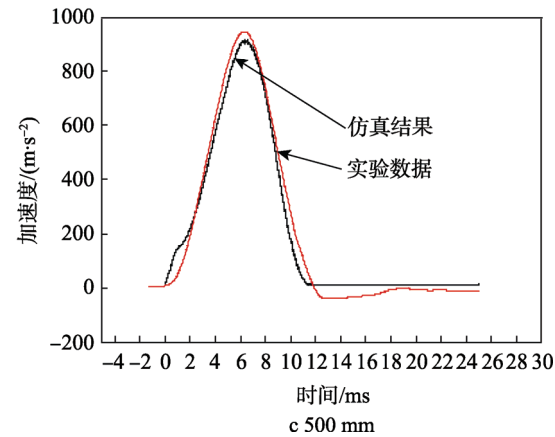
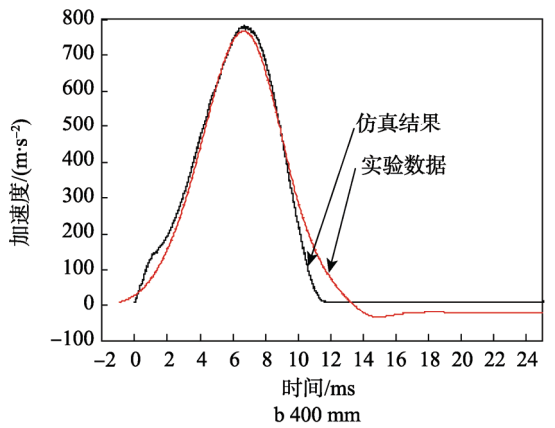
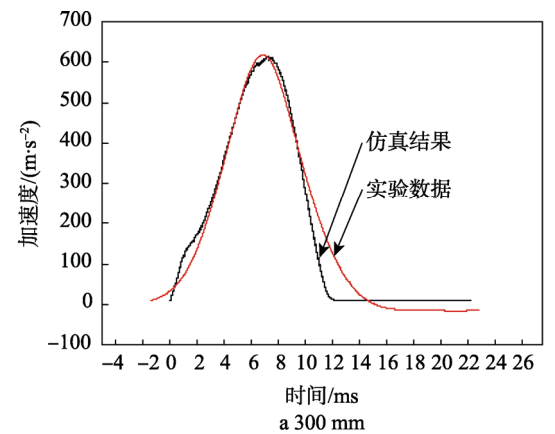


图 7 不同高度下的仿真结果与实验对比  
Fig.7 Comparison of simulation results and experiments at different heights

在分析跌落冲击过程中,冲击加速度峰值和冲击持续时间是两大主要参数。仿真分析中,赋予物体初速度代替跌落高度,因此加速度曲线从仿真开始就发生变化,但在实验过程中,物体先经过一段下落过程,接触地面时加速度才开始发生变化,如图 4,大约在 7 ms 时加速度曲线才开始变化。整个冲击过程持续 12~13 ms 左右,与仿真结果几乎一致。

## 4 结语

1) 由实验可知,聚乙烯发泡塑料是典型的非线性和应变率敏感材料,因此动态冲击必须要考虑应变率和非线性属性对结果的影响。

2) 基于 Johnson-cook 模型,建立 EPE 本构方程的拟合曲线,并与实验数据进行对比。当应变小于 0.5 时,拟合曲线与实验数据具有良好的一致性;当应变大于 0.5 时,拟合曲线与实验数据差距较大。

3) 通过 300, 400, 500 mm 这 3 个高度的跌落分析,误差分别为 0.85%, 1.6%, 2.97%。低速冲击下该材料模型有较高的准确性,但随着高度的增加,误差出现递增的趋势,表明 Johnson-cook 本构方程适用于 EPE 低速冲击环境。

## 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.  
LI Jun. Study on the Cushioning Properties of Foamed Polyethylene[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [2] 卢子兴, 王仁, 黄筑平. 泡沫塑料力学性能研究综述[J]. 力学进展, 1996, 26(3): 306—323.  
LU Zi-xing, WANG Ren, HUANG Zhu-ping. Summary of Research on Mechanical Properties of Foam Plastics[J]. Advances in Mechanics, 1996, 26(3): 306—323.
- [3] 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.  
GAO De, LU Fu-de. Optimization Design of Multi-degree-of-freedom Drop Packaging System for Polyethylene Cushioning Material[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(3): 69—72.
- [4] TATEYAMA K, YAMADA H, OGASAWARA N. Effect of Strain Rate on Compressive Properties of Foamed Polyethylene Film[J]. Polymer Testing, 2016, 52: 54—62.
- [5] ZHANG J, KIKUCHI N, LI V. Constitutive Modeling of Polymeric Foam Material Subjected to Dynamic Crush Loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 1998, 21(5): 369—386.
- [6] 付志强, 李芸, 杜昱雯, 等. 纸浆模制波状结构缓冲性能的仿真影响因素[J]. 包装工程, 2016, 37(21): 34—39.  
FU Zhi-qiang, LI Yun, DU Yu-wen, et al. Simulation of the Influence of Simulation on the Buffering Performance of the Pulp Molded Wave Structure[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(21): 34—39.
- [7] FRANO R L, SANFIORENZO A. Demonstration of Structural Performance of IP-2 Package by Simulation and Full-scale Horizontal Free Drop Test[J]. Progress in Nuclear Energy, 2016, 86: 40—49.
- [8] GUI Kun, WANG Xi. Design and Analysis of Cushioning Packaging for Home Appliances[J]. Procedia Engineering, 2017, 174: 904—909.
- [9] WANG Zhi-wei, LI Xiao-fei. Effect of Strain Rate on Cushioning Properties of Molded Pulp Products[J]. Materials & Design, 2014, 57(5): 598—607.
- [10] YEH Meng-kao, HUANG Tzu-heng. Drop Test and Finite Element Analysis of Test Board[J]. Procedia Engineering, 2014, 79: 238—243.
- [11] 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, 33(3): 34—35.  
CHEN Ma-xu, LE Gui-gao. Drop Simulation of Missile with Bubble Buffer[J]. Ordnance Industry Automation, 2014, 33(3): 34—35.
- [12] 董菲, GERMAIN G, LEBRUN J L, 等. 有限元分析法确定 Johnson-Cook 本构方程材料参数[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(11): 1657—1660.  
DONG Fei, GERMAIN G, LEBRUN J L, et al. Finite Element Analysis to Determine the Material Parameters of Johnson-Cook Constitutive Equations[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(11): 1657—1660.
- [13] 贾翠玲, 陈芙蓉. 7A52 铝合金 Johnson-Cook 本构模型的有限元模拟[J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(1): 30—33.  
JIA Cui-ling, CHEN Fu-rong. Finite Element Simulation of the Johnson-Cook Constitutive Model of 7A52 Aluminum Alloy[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2018, 41(1): 30—33.
- [14] 巩雪, 常江, 孙智慧. 高脚杯缓冲包装力学性能有限元分析[J]. 包装工程, 2016, 37(13): 50—53.  
GONG Xue, CHANG Jiang, SUN Zhi-hui. Finite Element Analysis of Mechanical Properties of Goblet Cushion Packaging[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(13): 50—53.
- [15] 石岩, 张括, 王芳, 等. 全瓦楞纸板的红酒包装内衬设计及跌落分析[J]. 包装工程, 2017, 38(9): 135—140.  
SHI Yan, ZHANG Kuo, WANG Fang, et al. Design And Drop Analysis of Red Wine Packaging Lining for Full Corrugated Cardboard[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(9): 135—140.