

缓冲包装跌落仿真误差分析

滑广军, 费伟民, 谢勇

(湖南工业大学 包装新材料与技术重点实验室, 株洲 412008)

摘要: **目的** 研究 Ansys/LS-DYNA DTM 模块跌落仿真分析与经典缓冲包装设计方法之间的误差, 并分析阻尼及摩擦因数对仿真结果的影响。**方法** 基于经典缓冲包装设计方法, 分别设计线弹性与双线性材料为缓冲材料的产品-衬垫系统; 利用 Ansys/LS-DYNA DTM 模块对线弹性与双线性缓冲材料的产品-衬垫系统进行跌落分析, 对比分析理论设计与仿真分析结果。**结果** 对于线弹性材料与双线性缓冲材料的产品-衬垫系统, Ansys/LS-DYNA DTM 模块跌落仿真分析与经典缓冲包装理论设计之间的误差均在 5% 以内。系统阻尼的增加导致所受最大冲击加速度减小; 摩擦因数对所受最大冲击加速度影响较小; 线性粘滞系数的增加导致所受最大冲击加速度增加。**结论** 对于一般的工程应用, Ansys/LS-DYNA DTM 模块跌落仿真分析方法与经典缓冲包装设计方法之间的误差在允许范围内。

关键词: Ansys/LS-DYNA DTM; 缓冲包装设计; 跌落仿真

中图分类号: TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)13-0054-06

Drop Simulation Errors of Cushioning Packaging

HUA Guang-jun, FEI wei-min, XIE Yong

(Key Laboratory of New Materials and Technology for Packaging, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412008, China)

ABSTRACT: This paper aimed to study the error between the Ansys/LS-DYNA DTM module drop simulation analysis and the classical method of cushioning packaging design, as well as the influence of damping and friction coefficient on the simulation result. Based on the classical method of cushioning packaging design, product-liner systems using cushioning material with linear elasticity or bilinearity were designed respectively. By analyzing the drop of the liner systems with Ansys/LS-DYNA DTM module, the theoretical design and the result of simulation analysis were comparatively analyzed. For both liner systems using cushioning material with linear elasticity and bilinearity, the error between the Ansys/LS-DYNA DTM module drop simulation analysis and the classical method of cushioning packaging design was no more than 5%. The increasing damping led to the decrease of the maximum impact acceleration; the friction coefficient had little effect on the maximum impact acceleration; increasing linear viscous coefficient caused the increase of maximum impact acceleration. In conclusion, the error between the drop simulation analysis with Ansys/LS-DYNA DTM module and the classical method of cushioning packaging design was acceptable for general engineering applications.

KEY WORDS: Ansys/LS-DYNA DTM; cushioning packaging design; drop simulation

收稿日期: 2015-12-26

基金项目: 湖南省科技计划 (2015JC3114); 湖南工业大学研究生创新基金 (cx1501)

作者简介: 滑广军 (1975—), 男, 河南人, 博士, 湖南工业大学副教授, 主要研究方向为运输包装技术、CAD\CAE、振动测试与故障诊断、结构动力学。

缓冲包装的作用是吸收流通过程中包装件受到的冲击及振动能量, 并对产品进行可靠固定, 避免产品由于冲击振动而损坏^[1-2]。缓冲包装设计方法主要有基于材料缓冲系数-最大应力曲线进行缓冲结构的设计, 基于材料的最大加速度-静应力曲线进行缓冲结构设计^[3-7]。

按缓冲包装设计五步法, 需对包装件进行破坏性试验, 而许多大型、高危险性、价格昂贵产品及精密仪器是不允许进行破坏性试验的。试验用衬垫的制备需要进行模具设计、制造、产品试制等工作, 试验周期长, 成本高^[8-9]。利用仿真分析技术, 能够在缓冲包装设计前期进行非破坏性试验, 对缓冲包装进行优化, 减少设计周期及设计成本。目前缓冲包装仿真分析已成为新的研究热点, 国内外许多学者在缓冲包装设计方面已开展了许多有成效的工作^[10-15]。

仿真分析的精度是业内非常关注的问题, 错误的仿真分析会造成很大损失。跌落测试模块(DTM)是以显式动力学分析程序 LS-DYNA 为求解器的专业跌落仿真分析软件, 实际应用中发现, DTM 的仿真分析结果与设计结果有一定的误差^[11, 14-15]。实验方式也不能完全验证仿真结果的正确性, 导致试验误差的因素非常多, 如传感器的精度、空气阻力、运动件的摩擦力、材料性能误差、结构设计加工误差等。为研究 DTM 仿真分析的准确性及影响仿真结果的主要因素, 文中基于缓冲系数-最大应力曲线建立准确的线弹性与双线性缓冲材料的产品-缓冲衬垫系统模型, 利用 Ansys 软件建立该产品-缓冲衬垫系统的精确有限元模型, 并利用 Ansys/LS-DYNA DTM 模块进行了跌落仿真分析。

1 缓冲包装设计

1.1 缓冲包装设计理论

基于缓冲系数-最大应力曲线的缓冲结构设计方法利用 $C-\sigma_m$ 曲线(缓冲系数-最大应力曲线)表征材料的缓冲性能, 并以产品的质量 m 、最大冲击加速度 G 及跌落高度 h 为已知条件, 计算缓冲衬垫面积和厚度^[16]。缓冲垫面积及厚度的计算公式如下:

$$A = \frac{Gm}{\sigma_m} \quad (1)$$

$$d = \frac{Ch}{G} \quad (2)$$

式中: h 为包装件在流通过程中的跌落高度; A 为缓冲垫面积; d 为缓冲垫厚度。式(1)和式(2)的物理意义为: 质量为 m 的产品, 若选用缓冲材料的缓冲系数为 C , 最大应力 $\sigma_m=0.2352$ MPa。

材料的 $C-\sigma_m$ 曲线往往呈现高度的非线性, 用解析式不易精确表达, 可用通用函数形式表述:

$$C = f(\sigma_m) \quad (3)$$

对于线弹性材料:

$$C = \frac{\sigma_m}{\int_0^\varepsilon \sigma dx} \quad (4)$$

将式(3)与式(1)和式(2)联立组成方程组。该方程组中有 4 个不确定的参数, 即 h, A, C, σ_m , 未知参数的个数大于方程的个数, 文献[16]讨论了该不定式方程组的求解问题。

1.2 线弹性缓冲材料衬垫设计

若某产品脆值为 60, 产品长宽高均为 0.2 m, 材料为线弹性, 弹性模量为 20 GPa, 密度为 2000 kg/m³, 泊松比为 0.3, 产品质量为 16 kg; 设跌落高度为 0.6 m(包装件底面与地面高度), 重力加速度 g 为 9.8 m/s²; 缓冲材料为线弹性材料, 弹性模量为 0.5 MPa, 密度为 20 kg/m³, 泊松比为 0.3。

若采用全面缓冲设计, 则缓冲面积为 0.04 m²。按前文的计算有 σ_m 为 0.2352 MPa, 缓冲系数 C 为 6.8, 则缓冲垫厚度 d 约为 43 mm。

按文献[1], 包装件碰撞地面的最大加速度为:

$$\ddot{x}_{\max} = \omega \sqrt{2gh} \quad (5)$$

式(5)的推导是基于能量守恒原理, 即产品-衬垫系统的势能全部转换成缓冲衬垫的弹性势能。缓冲衬垫压缩变形最大时储存的弹性势能最大, 缓冲衬垫的最大变形量也应该被计入总的跌落高度。修正后的跌落高度为 0.62 m, 产品-衬垫系统固有频率 $\omega=171$, 修正后产品-衬垫系统跌落最大加速度为 60.62g, 比产品脆值大 1%。这说明将包装件底面与地面的距离作为跌落高度进行设计是不安全的。

1.3 双线性缓冲材料衬垫设计

以线弹性产品为设计目标, 对缓冲衬垫材料进行设计。缓冲材料属性 $\sigma-\varepsilon$ 方程如下:

$$\sigma = \begin{cases} 8 \times 10^5 \varepsilon, \varepsilon \leq 0.25 \\ 7 \times 10^5 \varepsilon + 2.5 \times 10^4, \varepsilon \geq 0.25 \end{cases} \quad (6)$$

基于缓冲系数-最大应力曲线的缓冲结构设计方法,采用全面缓冲方式对产品进行缓冲衬垫设计。对跌落高度进行修正后,分别对缓冲衬垫最大应力、缓冲系数和缓冲衬垫高度进行计算可知:
 $\sigma_m=0.2352$ MPa, $C=6.388$, $d=6.6$ cm。

为了进一步研究缓冲包装理论与跌落仿真分析之间的误差,这里以材料 σ - ε 属性满足式(6)为缓冲材料。通过改变产品密度的方式,研究同一缓冲材料所受最大应力大于、等于、小于材料屈服应力时,经典缓冲包装理论与跌落仿真分析之间的误差关系。

1) 当产品密度为 2000 kg/m^3 时,缓冲材料所受最大应力 $\sigma_m=0.2352$ MPa 大于材料屈服应力 0.2 MPa 时,缓冲衬垫设计在前文已计算。

2) 当产品密度为 1666.7 kg/m^3 时,缓冲材料所受最大应力 $\sigma_m=0.2$ MPa 等于材料屈服应力 0.2 MPa,由式(4)和式(2)可知缓冲系数 $C=8$,衬垫厚度 $d=8.3$ cm。

3) 当产品密度为 1500 kg/m^3 时,缓冲材料所受最大应力 $\sigma_m=0.18$ MPa 小于材料屈服应力 0.2 MPa 时,由式(4)和式(2)可知缓冲系数 $C=8.89$,衬垫厚度 $d=9.2$ cm。

2 Ansys/LS-DYNA DTM 模块跌落仿真分析

2.1 线性缓冲材料跌落仿真分析

基于缓冲系数-最大应力曲线的缓冲结构设计和基于 DTM 的跌落仿真分析均忽略了跌落过程中空气阻力的影响,也没有考虑阻尼及摩擦等机械能损耗因素。利用 Ansys 前处理模块建立产品-缓冲衬垫系统模型见图 1a。选用 Solid164 单元,缓冲材料密度为 20 kg/m^3 ,弹性模量为 0.5 MPa ,泊松比为 0.3 。产品材料弹性模量为 20 GPa ,密度为 2000 kg/m^3 ,泊松比为 0.3 。产品-缓冲衬垫系统的有限元模型见图 1b。利用 Ansys 的 DTM 模块,按模型最低点设置跌落高度为 0.6 m ,目标面材料密度为 20000 kg/m^3 ,目标面弹性模量为 20 GPa ,泊松比为 0.3 ,接触面的摩擦因数均为 0 ,产品-缓冲衬垫系统的跌落模型见图 1c。

仿真分析求解后,可得重心的最大加速度约为 $62.3g$,重心处最大加速度时间历程曲线见图 2。仿真计算最大加速度比产品脆值大 3.83% ,比理论最大冲击加速度值大 2.77% 。对一般的工程应用, 5%

以内的误差是可以接受的。实际应用中,材料缓冲系数-最大应力曲线是在低速加载条件下获得的,而产品实际跌落时的冲击速度较高。大量试验结果表明,对于很多材料来说,其强度或屈服应力会随应变率的提高而提高^[17]。这就意味着,吸收同样的能量,高应变率比低应变率下缓冲材料的应变小,高应变率比低应变率下的应力大,因此可以接受跌落仿真分析的结果,并用于对理论设计结果进行验证及校核。

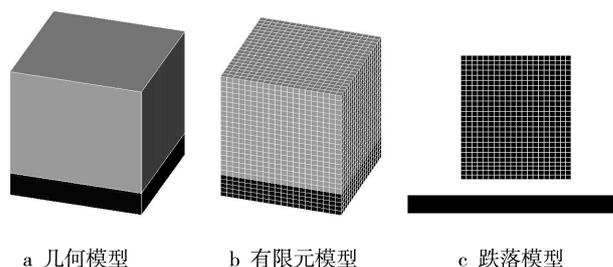


图 1 产品-缓冲衬垫系统
 Fig.1 The product-liner system

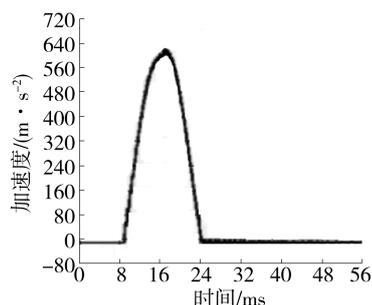


图 2 线性缓冲材料下产品重心加速度时间历程
 Fig.2 The time history of the acceleration of the product under the linear cushioning material

2.2 双线性缓冲材料跌落仿真分析

根据双线性缓冲材料衬垫设计,对缓冲材料所受最大应力大于、等于、小于材料屈服应力这 3 种情况,利用 Ansys/LS-DYNA 前处理分别对产品-缓冲衬垫系统进行建模。选用 Solid 164 单元,产品材料模型为 linear elastic、缓冲衬垫材料模型为 Bilinear Isotropic,产品-缓冲衬垫系统材料的密度为 30 kg/m^3 ,弹性模量为 0.5 MPa ,泊松比为 0.3 ,屈服强度为 0.2 MPa ,切线模量为 0.7 MPa ,产品 1, 2, 3 的材料参数分别为缓冲材料所受最大应力大于、等于、小于缓冲材料屈服应力时所对应的产品材料参数。其他参数设置与线性缓冲材料跌落仿真分析设置一致,分别对不同情况进行求解。

通过仿真分析可得：当缓冲材料最大应力大于材料屈服强度时，产品所受到最大冲击加速度为 621.627 m/s^2 ，约为 $62.2g$ ，其重心最大加速度时间历程曲线见图 3a，仿真分析所受最大冲击加速度比产品脆值大 3.83%；当缓冲材料最大应力等于材料屈服强度时，产品所受到最大冲击加速度为 624.545 m/s^2 ，约为 $62.5g$ ，其重心最大加速度时间历程曲线见图 3b，仿真分析所受最大冲击加速度比产品脆值大 4.17%；当缓冲材料最大应力小于材料屈服强度时，产品所受到最大冲击加速度为 648.790 m/s^2 ，约为 $64.9g$ ，其重心最大加速度时间历程曲线见图 3c，仿真分析所受最大冲击加速度比产品脆值大 8.17%。

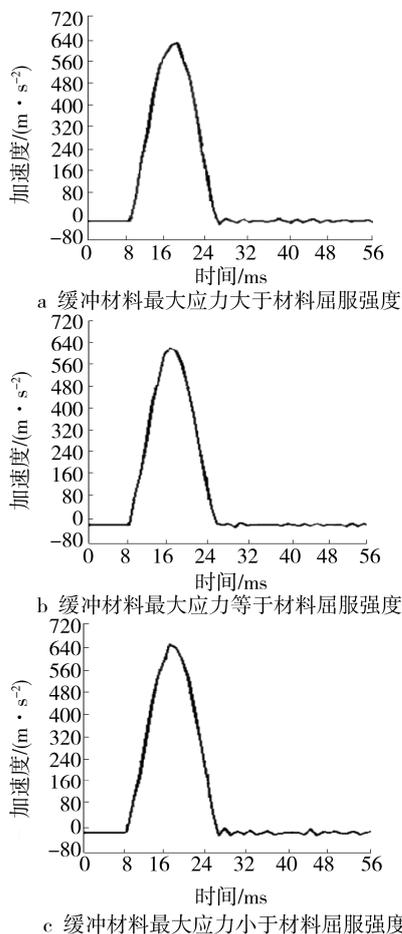


图 3 双线性缓冲材料下产品重心加速度时间历程

Fig.3 The time history of the acceleration of the product under the bilinear buffer

根据仿真分析结果可知，对于双线性材料模型，当缓冲材料所受最大应力大于等于材料屈服应力时，跌落仿真分析误差在 5%以内；当缓冲材料所受最大应力小于材料屈服应力时，跌落仿真分析误差在 10%以内。

2.3 考虑阻尼与摩擦因数对跌落仿真分析的影响

以上研究过程中，缓冲衬垫理论设计与跌落仿真分析并未考虑阻尼及摩擦因数对产品-缓冲衬垫系统的影响。为了研究阻尼及摩擦因数对产品-缓冲衬垫系统跌落仿真的影响，文中通过系统阻尼、摩擦因数、二次粘滞系数(Q_1)、线性粘滞系数(Q_2)这 4 种阻尼参数为研究对象，研究阻尼与摩擦因数对跌落分析的影响，仿真跌落分析结果见表 1，不同工况下产品重心加速度时间历程见图 4。

表 1 阻尼及摩擦因数对跌落仿真结果的影响

Tab.1 The influence of damping and friction coefficient on drop simulation result

工况	体积黏性系数		系统阻尼系数	摩擦因数	重心最大冲击加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
	Q_1	Q_2			
1	1.5	0.06	0	0	622.7
2	1.5	0.06	1	0	592.2
3	1.5	0.06	2	0	581.2
4	1.5	0.06	3	0	571.9
5	1.5	0.06	4	0	554.1
6	1.5	0.06	5	0	558.9
7	1.5	0.06	6	0	538.8
8	1.5	0.06	1	0.01	597.9
9	1.5	0.06	1	0.1	611.5
10	1.5	0.06	1	0.2	615.7
11	1.5	0.06	1	0.3	604.9
12	1.5	0.06	1	0.4	604.9
13	1.5	0.06	1	0.5	629
14	1.5	0.06	1	0.6	648.3
15	1.5	0.06	1	0.7	624.4
16	0.5	0	0	0	615
17	1	0	0	0	611.6
18	1.5	0	0	0	614.2
19	2	0	0	0	610.7
20	0	0.01	0	0	644.4
21	0	0.1	0	0	621.7
22	0	0.2	0	0	617.5
23	0	0.3	0	0	642.8
24	0	0.4	0	0	651.9
25	0	0.5	0	0	674.8
26	0	0.6	0	0	681.7

根据以上仿真结果表明，随着系统阻尼的增大，产品-缓冲衬垫系统所受到最大冲击加速度减小；随着摩擦因数的增加，产品-缓冲衬垫系统所受到最大冲击加速度呈先减小后增加的趋势，且加速度-时间历程曲线伴随着较强震荡；随着二次粘滞系数

(Q_1)的增加,对产品-缓冲衬垫系统所受到最大冲击加速度影响较小;随着线性系数(Q_2)的增加,产品-缓冲衬垫系统所受到最大冲击加速度增加。

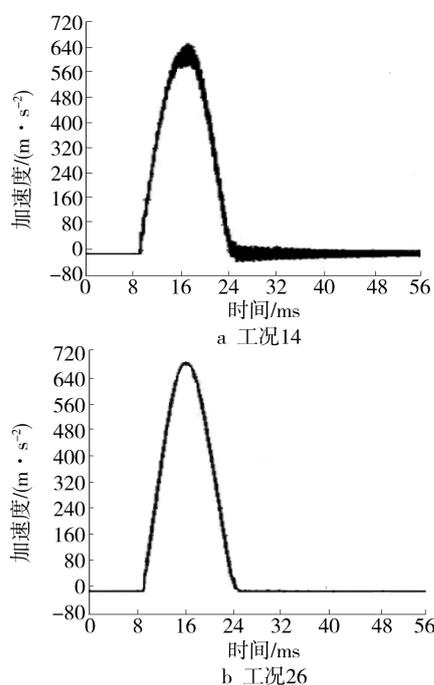


图4 不同工况下产品重心加速度时间历程

Fig.4 The time history of acceleration of gravity center under different working condition

3 结语

这里以线弹性与双线性缓冲材料为例,基于经典缓冲包装设计方法建立了产品-缓冲衬垫系统的精确理论模型,并利用经典动力学进行了修正校核,利用 Ansys/LS-DYNA DTM 模块建立了产品-衬垫系统的有限元模型,并进行了跌落仿真分析。

将包装件底面与地面的距离设为跌落高度是不安全的,跌落高度要加上缓冲衬垫受冲击变形的厚度。基于经典缓冲包装设计理论进行设计的产品-缓冲衬垫系统与利用 Ansys/LS-DYNA DTM 模块进行跌落仿真分析之间存在的误差在 5%以内,对一般工程应用而言,5%的误差是可以被接受的。以双线性材料为缓冲衬垫材料设计的产品-缓冲衬垫系统,当缓冲材料所受最大应力大于、等于材料屈服强度时,仿真分析与理论计算之间的误差在 5%以内;当缓冲材料所受最大应力小于材料屈服强度时,仿真分析与理论计算之间的误差在 10%以内。系统阻尼系数的增加对最大跌落加速度有抑制作用。摩擦因数会使最大跌落加速度增加,但最大加速度随着摩擦因数增加的趋势不明显。二次粘

滞系数对最大跌落加速度没有显著影响。线性粘滞系数有抑制高频震荡的作用,随着该参数增加,最大跌落冲击加速度增加趋势明显。

参考文献:

- [1] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京:印刷工业出版社, 2012.
PENG Guo-xun. Logistics and Transport Packaging Design[M]. Beijing:Printing Industry Press, 2012.
- [2] 高德, 计宏伟. 包装动力学[M]. 北京:轻工业出版社, 2010.
GAO De, JI Hong-wei. Packaging Dynamics[M]. Beijing:Light Industry Press, 2010.
- [3] GB/T 8166—2011, 缓冲包装设计方法[S].
GB/T 8166—2011, Package Cushioning Design Method[S].
- [4] 向红. 包装设计工程基础[M]. 北京:国防科技大学出版社, 2002.
XIANG Hong. Fundamentals of Packaging Design Engineering[M]. Beijing:National Defense Science and Technology University Press, 2002.
- [5] 张华良, 刘乘. 包装材料缓冲特性曲线研究及其在缓冲设计中的应用[J]. 西北轻工业学院学报, 1990, 8(3):45—48.
ZHANG Hua-liang, LIU Cheng. Study on Cushion Curves and Its Using in Cushion Design[J]. Journal of Northwest Institute on Light Industry, 1990, 8(3): 45—48.
- [6] 李连进. 产品隔振缓冲包装结构的设计方法[C]//镇江:中国农业机械学会 2006 年学术年会论文, 2006.
LI Lian-jin. Method of Design of Product Packing Structure of Vibration Isolation and Buffering[C]// Zhenjiang: China Agricultural Machinery Association 2006 Annual Conference Paper, 2006.
- [7] SEK M, MINETT M, ROUILLARD V, et al. A New Method for the Determination of Cushion Curves[J]. Packaging Technology and Science, 2000, 13(6): 249—255.
- [8] 卢富德, 高德. 考虑蜂窝纸板箱缓冲作用的产品包装系统跌落冲击研究[J]. 振动工程学报, 2012, 25(3): 335—341.
LU Fu-de, GAO De. Study on Drop Impact of Packaging System Considering the Cushioning Action of Honeycomb Paperboard Box[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(3):335—341.
- [9] 卢富德, 陶伟明, 高德. 串联缓冲系统冲击响应与结构优化分析[J]. 浙江大学学报, 2012, 46(10):1773—1777.
LU Fu-de, TAO Wei-ming, GAO De. Impact Response of Series Cushioning System and Structure Optimization Analysis[J]. Journal of Zhejiang University, 2012, 46(10):1773—1777.
- [10] 王长智, 陈文革. 基于 Ansys 软件的产品跌落分析与

- 耐跌结构设计[J]. 包装工程, 2013, 34(1):44—46.
- WANG Chang-zhi, CHEN Wen-ge. Drop Simulation Analysis and Structure Design of Product Based on Ansys[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(1):44—46.
- [11] 丁玉平, 钱怡. 包装件仿真跌落分析与结构优化设计[J]. 包装与食品机械, 2014, 32(4):44—47.
- DING Yu-ping, QIAN Yi. Drop Simulation and Structure Optimization on Overall Package[J]. Packaging and Food Machinery, 2014, 32(4):44—47.
- [12] UMUD E O, GUNAY A. Finite Element Analysis of Expanded Polystyrene Foam under Multiple Compressive Loading and Unloading[J]. Materials and Design, 2011, 32(2):773—780.
- [13] 华丽. 基于 Ansys/LS-DYNA 的洗衣机运输包装件的跌落仿真分析[J]. 机电一体化, 2008, 14(2):71—73.
- HUA Li. Dropping Simulation Analysis of the Transport Package of Washing Machine[J]. Mechatronics, 2008, 14(2):71—73.
- [14] 杨书仪, 刘德顺, 赵继云. 基于 LS-DYNA 的移动硬盘跌落冲击耐撞性能分析[J]. 振动与冲击, 2012(9):13—17.
- YANG Shu-yi, LIU De-shun, ZHAO Ji-yun. Drop Impact Crashworthiness Analysis of Mobile Hard Disk Based on LS-DYNA[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012(9):13—17.
- [15] 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.
- [16] 滑广军, 赵德坚, 肖颖喆, 等. 缓冲包装设计方法数学内涵探析[J]. 包装工程, 2013, 34(23):64—67.
- HUA Guang-jun, ZHAO De-jian, XIAO Ying-zhe, et al. Discussion an Analysis on Mathematical Connotation of Cushioning Packaging Design Method[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(23):64—67.
- [17] 于水生, 卢玉斌, 蔡勇. 工程材料的应变率效应及其统一模型[J]. 固体力学学报, 2013(S1):23—27.
- YU Shui-sheng, LU Yu-bin, CAI Yong. The Strain-rate Effect and General Model of Engineering Material[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2013(S1):23—27.