

高硼硅玻璃沙拉碗缓冲包装跌落仿真分析

刘静

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: **目的** 研究高硼硅玻璃沙拉碗跌落冲击时的应力和变形情况, 为沙拉碗安全包装提供参考。**方法** 运用 Pro/E 软件和 Ansys 软件建立沙拉碗及其缓冲包装三维有限元模型, 对有无缓冲包装以及不同跌落高度和跌落姿态分别进行跌落仿真模拟, 获取沙拉碗跌落冲击过程的应力、变形和加速度分布及变化规律。**结果** 沙拉碗跌落冲击时, 最易损坏的部位在上部边缘、底部缓冲包装棱边及角的冲击部位; 无缓冲包装时最大应力和脆值分别为 76 MPa 和 $1.84 \times 10^5 g$, 有缓冲包装时的最大应力和脆值分别为 0.139 MPa 和 73.5g。**结论** 对沙拉碗进行包装设计时, 应加强对上部碗口边缘部位和缓冲垫边角的保护; 缓冲包装结构对沙拉碗起到了明显的保护作用, 该研究为高硼硅沙拉碗缓冲包装的理论研究和结构优化设计提供了参考。

关键词: 高硼硅玻璃; 沙拉碗; 跌落仿真; 缓冲包装; Ansys

中图分类号: TB484.3; TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)13-0166-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.13.024

Drop Simulation of Borosilicate Glass Salad Bowl Cushioning Packaging

LIU Jing

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: This research aims to study the stress and deformation of borosilicate glass salad bowl during dropping, and provide reference for safe packaging of salad bowls. The 3-D finite element models of the salad bowl and cushioning package were built with Pro/E and Ansys. Dropping tests of the salad bowl were simulated under different conditions: without or with cushioning package and from different dropping height and with different dropping angles, to get the simulation results of stress, deformation and acceleration of the salad bowl during the dropping tests. The upper part near the brim and the bottom near the shocking position were most likely to be broken. The maximum stress and fragility were 76 MPa and $1.84 \times 10^5 g$ without cushioning package and 0.139 MPa and 73.5g with cushioning package. More protection should be given to the upper brim and the bottom border and corner areas during packaging design for the salad bowl. The cushioning package can give effective protect to the salad bowl. The work provides valuable reference for the cushioning packaging theory and structure optimization of the borosilicate glass salad bowl.

KEY WORDS: borosilicate glass; salad bowl; dropping simulation; cushioning packaging; Ansys

高硼硅玻璃器皿因膨胀系数低、化学稳定性好、硬高度、透光率高等优点, 在餐具产品领域有广泛的

应用。在物流运输过程中, 跌落和冲击是造成玻璃包装件破损的重要原因。若通过试验方法对高硼硅沙拉

收稿日期: 2019-03-05

基金项目: 上海市高校选拔培养优秀青年教师科研专项 (354103)

作者简介: 刘静 (1977—), 女, 博士, 上海理工大学讲师, 主要研究方向为虚拟样机技术、CAD/CAE 技术、包装设计仿真。

碗的包装进行跌落研究,其研究成本较高,且跌落碰撞过程发生的时间非常短,远小于 0.1 s,且跌落冲击的过程复杂,难以控制,因此传统的试验无法完整地展现跌落碰撞全过程^[1]。随着有限元技术的发展,计算机模拟仿真分析已逐渐成为研究构件跌落的重要手段^[2],可以很好地解决上述难题。目前,国内外的研究机构已做了多个领域的研究探索^[3-10]。文中研究运用有限元方法研究分析高硼硅沙拉碗包装的跌落冲击动态,建立高硼硅沙拉碗模型,模拟产品实际运输流通环境下模型的跌落过程,并分析冲击时物体的结构变形与应力变化以及冲击瞬间的脆值^[11-12],经过运算比较得到对缓冲包装结构全面而精确的评定。

运用 Ansys LS-DYNA^[13]动力学模块对高硼硅沙拉碗缓冲包装件进行跌落过程的仿真分析,得出影响产品包装的因素,提高缓冲包装的保护效果,为沙拉碗的安全运输提供前提条件。整个分析过程包括前处理、计算求解、后处理等 3 个阶段^[14-15]。

1 模型的建立及前处理

1.1 沙拉碗及缓冲包装三维模型建立

分析对象为一款透明高硼硅玻璃沙拉碗,容量为 1400 mL,口部直径为 20 cm,碗高 9 cm。缓冲包装采用适合网购包装的保利龙泡沫缓冲衬垫,高硼硅沙拉碗卡套在衬垫凹槽中。用 Pro/Engineer 三维建模软件创建三维模型,随后导入 Ansys 软件,见图 1。

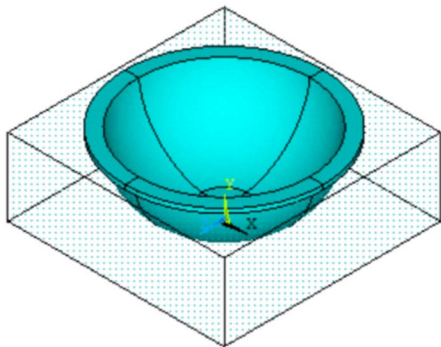


图 1 沙拉碗及缓冲包装的三维模型

Fig.1 3-D model of salad bowl and cushioning packaging

1.2 材料设置

1) 高硼硅玻璃材料参数设置^[16]。密度为 2230 kg/m³,弹性模量为 64 GPa,泊松比为 0.2。

2) 缓冲泡壳材料设置^[4]。密度为 11.18 kg/m³,弹性模量为 1.52 MPa,泊松比为 0.3,泡壳最薄部位厚度为 5 mm。

1.3 接触设置

定义高硼硅沙拉碗与缓冲泡沫之间的接触为面-面接触,静态摩擦因数设为 0.1,动态摩擦因数设为

0.1。

刚性目标板参数按如下设置,弹性模量为 25 GPa,密度为 2500 kg/m³,泊松比为 0.2,静、动摩擦因数为 0.2。

1.4 模型网格

创建高硼硅沙拉碗 Shell163 单元,缓冲泡沫为 Solid164 单元,对沙拉碗和缓冲包装进行自由网格划分。划分之后共有 9458 个网格,见图 2。

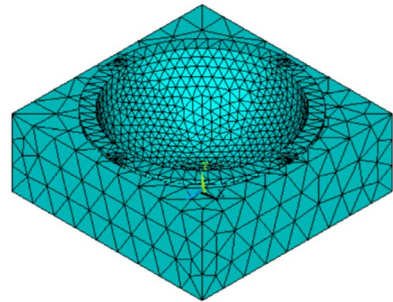


图 2 沙拉碗及缓冲包装结构的网格划分

Fig.2 Meshing of salad bowl and cushioning packaging

2 无缓冲包装跌落仿真分析

为了比较沙拉碗有无缓冲包装的跌落冲击响应,先对沙拉碗不加缓冲件,运行跌落仿真分析,得到最大冲击加速度和最大应力值。

沙拉碗从距离地面 1 m 的位置,开口朝上做自由落体运动。沙拉碗落地冲击瞬间应力分布见图 3。最大冲击应力出现在沙拉碗底部,最大应力值为 76 MPa。由于材料的许用应力为 65.3 MPa,因此裸摔时,最大应力值超过许用应力,产品因强度不够而失效。

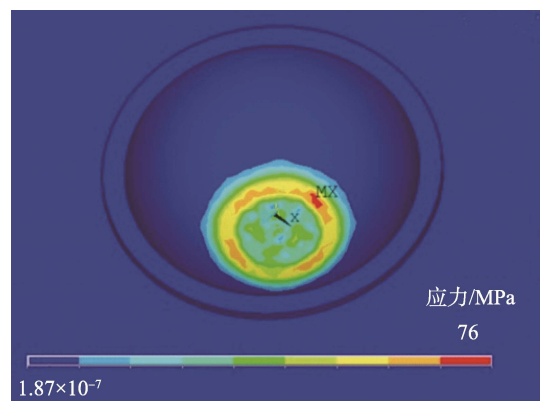


图 3 无缓冲跌落的冲击应力分布

Fig.3 Drop impact press without cushion

无缓冲时,沙拉碗整个跌落冲击过程的加速度变化见图 4。由图 4 可知,最大加速度出现在刚和地面接触的瞬间,最大加速度为 1.8×10^6 m/s²,脆值为 $1.84 \times 10^5 g$,远超许用脆值 80g,因此会出现冲击破坏。

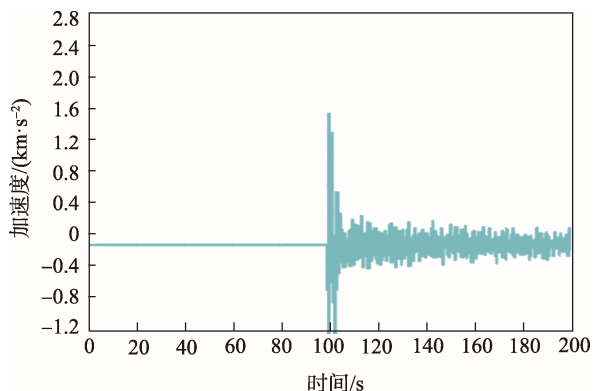


图4 无缓冲跌落过程的加速度变化曲线
Fig.4 Drop acceleration without cushion

3 加缓冲包装跌落仿真分析

从上述分析可知，不加缓冲包装时沙拉碗很容易发生跌落破坏，因此，为了保证沙拉碗运输安全，需要合理选材和设计缓冲包装结构。泡沫材料在易碎品包装领域应用广泛，因此文中采用保利龙泡壳作为缓冲包装材料。同时为了防止沙拉碗和地面直接碰撞，设计凹槽式泡壳结构，沙拉碗整体卡套在泡沫的凹槽中。

为了分析添加缓冲包装后，不同跌落高度和跌落姿态对沙拉碗包装跌落冲击的影响，对不同跌落高度（1，0.76 m）以及3种跌落姿态（面跌落、棱跌落、角跌落），即1点3线6面的跌落冲击分别进行模拟仿真分析。

3.1 不同跌落高度的仿真分析

为了分析跌落高度对跌落冲击的影响，将沙拉碗以开口朝上、水平姿态分别从1，0.76 m的跌落高度做自由落体，得到不同跌落高度下的应力、应变和加速度变化情况。

不同跌落高度冲击瞬间的应力分布见图5。由图5可知，加缓冲包装后，水平位置跌落时，冲击瞬间最大应力比沙拉碗裸摔时大大降低。当跌落高度为1 m时，最大冲击应力为-0.193 MPa；当跌落高度为0.76 m时，最大冲击应力为0.139 MPa，最大应力出现在沙拉碗的下半部。这表明泡壳吸收了大部分的冲击能量，起到了很好的缓冲作用。跌落高度越小，最大冲击应力也会越小，结构越安全。

不同跌落高度跌落冲击瞬间的应变分布见图6。由图6可知，加缓冲泡壳后，冲击引起的变形主要由泡壳吸收，沙拉碗的应变很小，最大值出现在沙拉碗的下部和碗顶部凸缘处。根据应变图可以看出，跌落高度为1 m时沙拉碗的最大应变为 2.99×10^{-6} ，跌落高度为0.76 m时，沙拉碗的最大应变为 2.05×10^{-6} 。

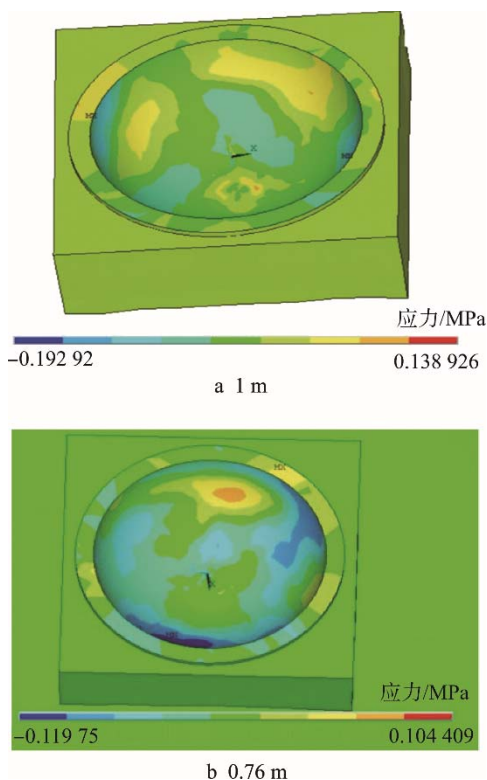


图5 不同跌落高度的最大冲击应力
Fig.5 Maximum impact stress with different drop height

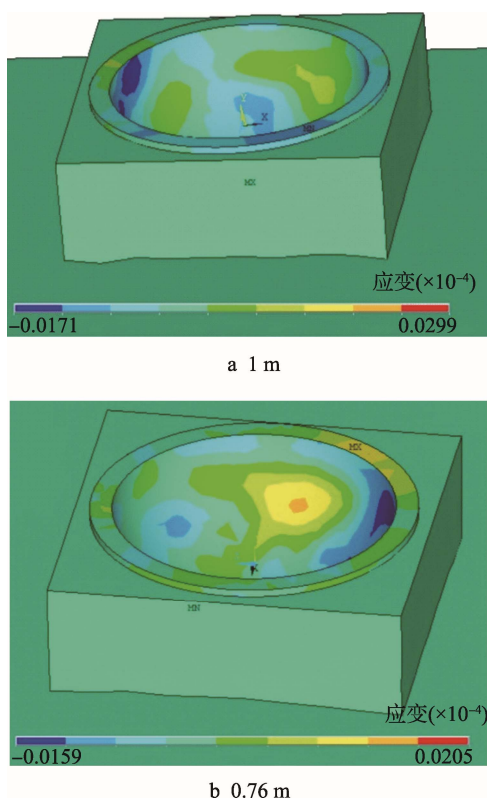


图6 不同跌落高度的最大冲击应变
Fig.6 Maximum impact strain with different drop height

不同跌落高度跌落冲击过程加速度的变化见图7。由图7可知，加缓冲泡壳后，冲击过程最大加速度大大降低。当跌落高度为1 m时，沙拉碗的最大

加速度为 720 m/s^2 ；当跌落高度为 0.76 m 时，沙拉碗的最大加速度为 680 m/s^2 ，脆值分别为 73.5g 和 69.4g ，都在材料的许用脆值范围内，此外跌落高度越大，最大冲击加速度也越大。

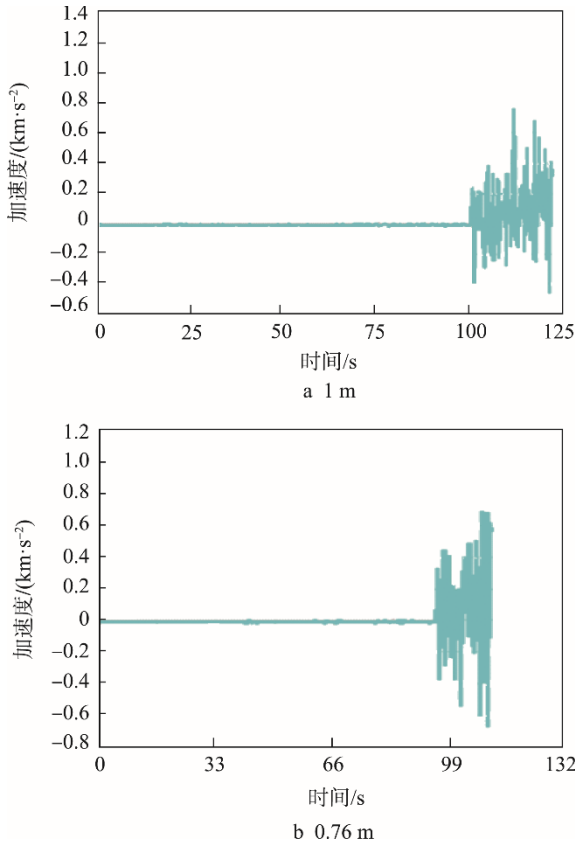


图 7 不同跌落高度的跌落加速度变化
Fig.7 Acceleration with different drop height

加上缓冲包装后，面跌落姿态下，虽然跌落高度越大，产品变形、应力和冲击加速度越大，但这些数值都在材料的许用强度和脆度范围之内，表明缓冲包装件对产品起到了很好的保护作用。同时，包装件的最大形变发生在缓冲垫的下部和产品口部边缘部位，说明在包装件跌落的瞬间，缓冲垫的下方和产品口部边沿下方是吸收冲击变形能的主要部分。

3.2 不同跌落姿态的仿真分析

为了更全面地分析影响跌落冲击响应的因素，也为了给更好的包装设计提供参考，对另外 2 种跌落姿态（棱跌落、角跌落）进行了跌落高度为 1 m 的仿真模拟。

棱跌落和角跌落时冲击应力分布见图 8，棱边接触地面时最大应力发生在上部靠近边缘处，最大值为 -0.025 MPa ；角接触地面时最大应力发生在靠近冲击角处、沙拉碗上部边缘位置，最大值为 -0.0199 MPa 。这 2 种跌落姿态的应力都远小于面跌落时的应力，这是因为棱边和角处泡壳较厚，吸收了更多的冲击，对沙拉碗起到了更好的保护。

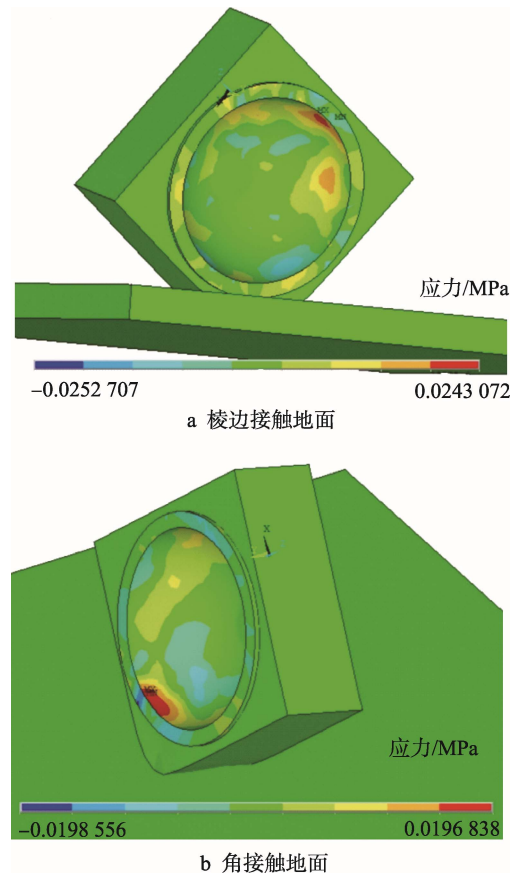


图 8 不同跌落姿态的冲击应力分布
Fig.8 Impact stress with different drop angles

棱跌落和角跌落时冲击应变分布见图 9。棱跌落时最大应变发生在泡壳的冲击棱边处，最大值为 -0.274 ；角跌落时最大应变发生在泡壳的冲击角处，最大值为 -0.259 。棱跌落冲击引起的泡壳变形远远大于角跌落冲击引起的变形，同时这 2 种姿态跌落时泡壳的应变都远远大于面跌落时泡壳的应变，这是因为这 2 种跌落方式接触面比较小，吸收了更多的应变能，缓冲包装变形比较大。

棱跌落和角跌落时加速度变化见图 10。由图 10 可知，棱跌落时最大冲击加速度为 140 m/s^2 ；角跌落时最大冲击加速度为 -70 m/s^2 。脆值分别为 14.3g 和 7.14g ，都远远小于面接触时的脆值，这是因为棱边或角接触时，接触部位泡壳的厚度更厚，吸收的冲击变形能大，因此产品的脆值小，更安全。

综上仿真结果，缓冲包装结构虽起到了明显的保护作用，但高硼硅沙拉碗上口边沿处应变较大，为损伤及破坏的危险区域，应采取加强措施。高硼硅沙拉碗包装件面跌落、棱跌落以及角跌落等 3 种状态的模拟结果表明，包装件棱跌落时冲击应力小于面跌落时的应力，而角跌落时的应力又小于棱跌落时的应力。这是因为角跌落或棱跌落时，缓冲衬垫变形大，能吸收更多的冲击能量，对其内装产品起到了极大的保护作用。

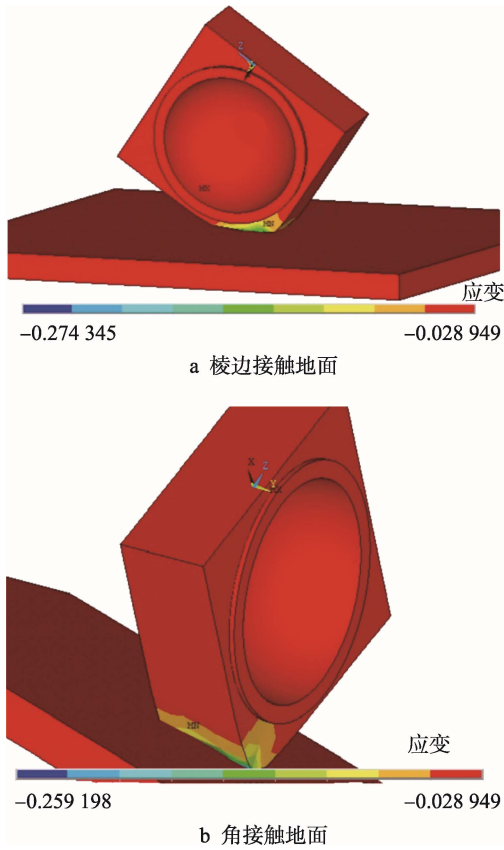


图9 不同跌落姿态的冲击应变分布
Fig.9 Impact strain with different drop height

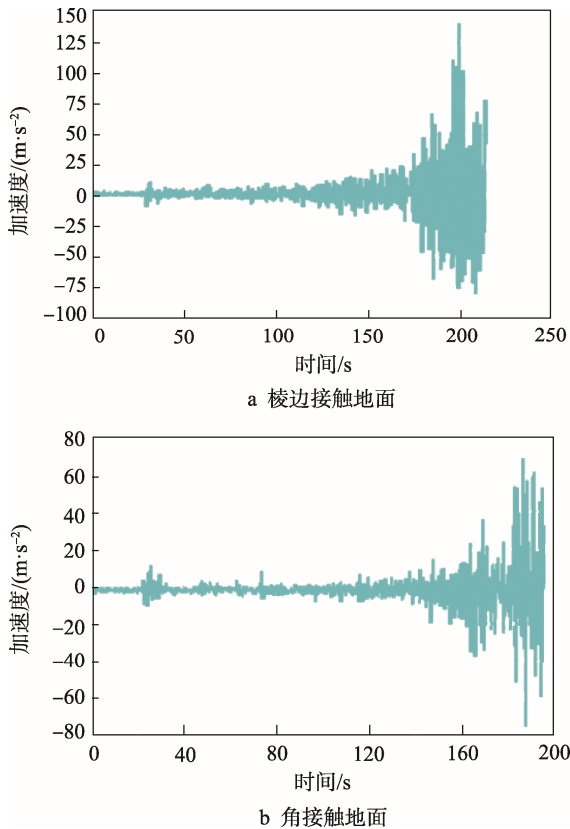


图10 不同跌落姿态跌落加速度变化
Fig.10 Acceleration with different drop angles

4 结语

文中应用有限元软件对高硼硅沙拉碗及缓冲包装进行了有限元建模和跌落模拟,分析了不同跌落高度和姿态下跌落冲击引起的应力、应变和加速度的变化情况,得出以下结论。

1) 从仿真分析结果可以看出,缓冲包装、跌落高度和跌落姿态都会影响跌落冲击响应。

2) 裸摔时,危险部位位于沙拉碗底部。

3) 有缓冲包装时,危险部位位于口部边缘和碗的边角冲击部位,因此在后期搬运和运输时要注意保护沙拉碗上部碗边缘及缓冲垫角部。

文中采用有限元方法,对高硼硅玻璃沙拉碗的跌落和防护性能进行了初步的探索,研究结果具有一定的指导意义。

参考文献:

[1] 付秋莹. 基于 ANSYS Workbench 对玻璃杯包装的跌落分析[J]. 上海包装, 2018(6): 14—16.
FU Qiu-ying. Drop Analysis of Glass Based on ANSYS Workbench[J]. Shanghai Packaging, 2018(6): 14—16.

[2] 丁玉平, 钱怡. 包装件跌落仿真分析与结构优化[J]. 包装与食品机械, 2014,32(4): 44—47.
DING Yu-ping, QIAN Yi. Drop Simulation Analysis and Structure Optimization of the Overall Package[J]. Packaging and Food Machinery, 2014, 32(4):44—47.

[3] 门超, 李光. 红酒包装跌落仿真分析及优化设计[J]. 包装工程, 2018, 39(3): 38—42.
MEN Chao, LI Guang. Drop Simulation Analysis and Optimization Design of Red Wine Package[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(3): 38—42.

[4] 丁玉平, 钱怡. 包装件跌落仿真分析与结构优化[J]. 包装与食品机械, 2014, 32(4): 44—47.
DING Yu-ping, QIAN Yi. Drop Simulation Analysis and Structure Optimization of the Overall Package[J]. Packaging and Food Machinery, 2014, 32(4): 44—47.

[5] 刘艾, 赵英芹, 王玉龙, 等. 白酒包装件跌落有限元分析与优化设计[J]. 包装工程, 2014, 35(17): 22—26.
LIU Ai, ZHAO Ying-qin, WANG Yu-long, et al. Finite Element Analysis of Wine Bottle Drop and Optimal Design[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(4): 22—26.

[6] 王春霖, 张丽强, 王振林. 基于 ANSYS 的啤酒瓶跌落仿真应力分析[J]. 包装工程, 2006, 27(4): 23—25.
WANG Chun-lin, ZHANG Li-qiang, WANG Zhen-lin. Stress Analysis of the Glass Beer Bottle by Dropping Simulation Based on ANSYS[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(4): 23—25.

[7] 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]. *Mechanics*, 2008, 14(2): 71—73.
- [8] 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.
- [9] MILLS N J, MASSO-MOREU Y. Finite Element Analysis (FEA) Applied to Polyethylene Foam Cushions in Package Drop Tests[J]. *Packaging Technology and Science*, 2005(18): 29—38.
- [10] 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.
- [11] GB/T 9174—1988. 一般货物运输包装通用技术条件[S].
GB/T 9174—1988. General Specification for Transport Package of General Cargo[S].
- [12] 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 Transportation Packaging Design*[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2012.
- [13] 郝好山, 胡仁喜, 康士廷. ANSYS 12.0 LS-DYNA 非线性有限元分析从入门到精髓[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
HAO Hao-shan, HU Ren-xi, KANG Shi-ting. *ANSYS 12.0 LS-DYNA Nonlinear Finite Element Analysis from Entry to Mastery*[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2010.
- [14] 张建伟, 白海波, 李昕. ANSYS 超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.
ZHANG Jian-wei, BAI Hai-bo, LI-Xin. *ANSYS Super Learning Manual*[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2013.
- [15] KOICHIRO A, KAWORU Y, HIROSHI O. Ultra-large Scale Fracture Mechanics Analysis Using a Parallel Finite Element Method with Submodel Technique[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2015(5): 44—55.
- [16] 王德宪, 郭利娅. 溶胶-凝胶镀膜技术综述(连载6)[J]. *玻璃*, 2003(4): 28—33.
WANG De-xian, GUO Li-ya. Sol-gel Coating Film Technology Review[J]. *Glass*, 2003(4): 28—33.