

技术专论

基于SolidWorks的产品跌落仿真应用

程珮珮, 程梦子, 雷磊, 何朝明

(西南交通大学, 成都 610031)

摘要: **目的** 研究物品跌落时的受力和结构变化,有助于改善物品的抗冲击性能,减小跌落破损概率,减少损失。**方法** 采用基于SolidWorks的产品跌落仿真方法,仿真某型陶瓷水杯的跌落过程,仿真反映了产品跌落过程中各节点的速度、加速度和应力变化。**结果** 杯子在19.365 μs 的垂直跌落过程中,最大应力在5.534 μs 时取得,始终在杯底的中部。在对杯子结构进行改进后,同一跌落高度下最大应力由临界破损应力 $1.720 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 降为 $1.549 \times 10^8 \text{ N/m}^2$,杯子受力得到显著改善。**结论** 结合产品脆值的定义和应用,提出了应用跌落仿真预估产品脆值,指导产品设计和包装,可缩短产品开发周期,节约成本,提高产品质量。

关键词: SolidWorks; 跌落仿真; 脆值; 应力

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)13-0051-05

Application of Drop Simulation Based on SolidWorks

CHENG Pei-pei, CHENG Meng-zi, LEI Lei, HE Zhao-ming

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

ABSTRACT: Objective To analyze the force and structure changes of falling objects, with the purposes of improving the shock resistance as well as reducing the drop breakage probability and damage. **Methods** Product falling simulation based on SolidWorks could vividly simulate the falling process of a certain type of ceramic cup, which showed the speed, acceleration and stress changes of each node during the dropping. **Results** The maximum stress occurred at 5.534 μs of the whole 19.365 μs vertical dropping process and kept acting on the center of the bottom of cup. After the cup structure was improved, the maximum stress was reduced from $1.720 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ of critical stress of breakage to $1.549 \times 10^8 \text{ N/m}^2$. The strain on the cup was greatly improved. **Conclusion** Combining the definition and application of product fragility, product fragility estimation with dropping stimulation can be applied in product design and package guiding, which shortens the development period and reduces the cost while improving the product quality.

KEY WORDS: SolidWorks; drop simulation; fragility; stress

跌落碰撞现象在日常生活中时常发生,如手机跌落、杯子跌落、吊运物跌落等。分析物品的跌落冲击过程,了解跌落冲击时物体的结构和应力变化,可指导对物体跌落易损部分采取保护措施,增大物体的抗冲击性能,减小其跌落损伤概率。包装业采用脆值来衡量产品的抗冲击能力,脆值是产品质量标准的一项

指标,也是缓冲包装设计的一项重要基本参量^[1]。由此,在产品初期进行脆值的相关实验,得到设计产品的脆值,可指导选取最优设计方案;在产品完成后,预估产品脆值,据此选择最优包装运输条件,不仅可以保障产品在流通过程中的完整率,还能节约成本。

收稿日期: 2014-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(51275431)

作者简介: 程珮珮(1989—),女,湖北随州人,西南交通大学硕士研究生,主攻机械设计与理论。

提出在基于 SolidWorks 软件的基础上,对产品模型进行跌落试验,测得产品到达极限应力值时的跌落高度,进而得到产品脆值,指导设计和流通;在设计初期对产品进行改进,避免后期更改方案的人力财力损失,有效提高产品竞争力。

1 SolidWorks 跌落仿真简介

SolidWorks 是达索(Dassault Systemes S.A)下的子公司,主要对机械设计软件进行研发与销售。达索提供涵盖整个产品生命周期的系统,包括设计、工程、制造、管理、流通等各个领域的软件系统。SolidWorks 软件设计遵循易用、稳定和创新三大原则,设计师可大大缩短设计时间,并保证产品快速高效地投放市场。

SolidWorks 跌落仿真需要指定产品和碰撞面力学性能,指定跌落高度或者冲击速度等跌落条件。跌落仿真运行后,软件后台运用显式求解技术迭代求解如下:

$$[M]\{a\}+[C]\{v\}+[K]\{x\}=\{F\}$$

式中: M 为质量矩阵; C 为阻尼矩阵; K 为刚度矩阵; F 为外力向量; a 为加速度向量; v 为速度向量; x 为位移向量。

显式求解技术相对隐式求解算法简单,但需要较小的时间增量才能提供良好可靠的解。以某种陶瓷饮水杯为例,以 0.02 μs 的时间增量研究了跌落仿真在预估产品脆值和指导产品结构设计上的应用。

2 某陶瓷杯产品跌落仿真

2.1 产品建模

仿真是利用模型研究实际系统中发生的本质过程,通过对模型的试验,研究设计中或已存在系统的各项性能。仿真流程包括:建立仿真模型、对模型进行试验、对实验结果进行分析处理。选取某种陶瓷饮水杯作为研究对象,建立了杯子的数学模型,见图 1a。杯子尺寸由实测获得,长、宽、高分别为 70, 70, 240 mm,杯体厚度设定为 2 mm。

杯子材料设置为陶瓷,各项性能参数(由软件材料库获得)见表 1。利用 SolidWorks 的网格划分功能

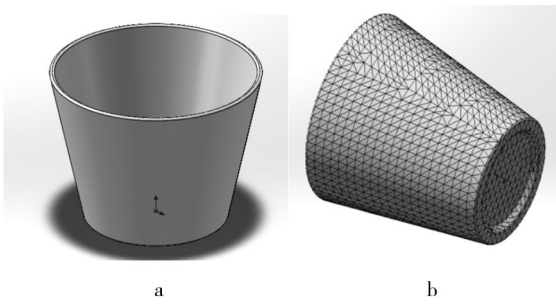


图1 陶瓷杯模型

Fig.1 Model of ceramic cup

对模型进行仿真前处理,将模型网格化^[2]。网格化完成后模型共生成节点数 15 609,单元数 18 176,自由度 数 46 827。最终模型见图 1b。

表 1 陶瓷材料性能参数

Tab.1 Performance parameters of ceramic material

名称	参数
弹性模量($\times 10^{11}$)/(N $\cdot$ m $^{-2}$)	2.2059
泊松比	0.22
抗剪模量($\times 10^{10}$)/(N $\cdot$ m $^{-2}$)	9.000
质量密度/(kg $\cdot$ m $^{-3}$)	2300
张力强度($\times 10^{11}$)/(N $\cdot$ m $^{-2}$)	1.720
压缩强度($\times 10^{11}$)/(N $\cdot$ m $^{-2}$)	5.515

2.2 产品跌落仿真

跌落仿真的目的是获得产品破损时的跌落高度和破损位置。在设置跌落参数时,SolidWorks 提供指定跌落高度和指定冲击时的速度等 2 种跌落设计方法,选择指定跌落高度的方法指定参数。典型冲击速度的等效跌落高度范围为 100 ~ 1200 mm^[3],考虑陶瓷的实际易碎特点,选择首次跌落高度为 100 mm(从杯子最低点计)。仿真跌落目标面为默认的刚性面。仿真结果将显示对应跌落高度下,整个跌落过程杯子各节点的最大应力值,将此值与陶瓷材料许用应力值进行比较,再依次进行增高或减高度的跌落仿真,得到产品的冲击破损临界高度。对产品进行了 5 次跌落仿真,见表 2。

由表 2 可知,杯子达到最大许用应力 1.729 $\times 10^8$ N/m 2 时的跌落高度为 170 mm,此高度的应力云图见图 2,显示为整个跌落过程的最大应力图解。最大应力发生在杯子底部的中间位置,此位置周围应力也相对

表2 杯子跌落高度与最大应力值
Tab.2 Drop height and maximum stress of the cup

算例	跌落高度/mm	最大应力($\times 10^8$)/(N·m ⁻²)
1	100	1.319
2	150	1.616
3	170	1.720
4	175	1.746
5	200	1.866

较大,为垂直跌落时杯子的易损部分,易损部位的应力响应超过其许用应力值时,杯子即破损。

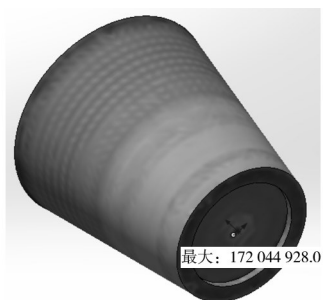


图2 杯子170 mm跌落最大应力图解

Fig.2 Maximum stress diagram of the cup dropping from 170 mm

2.3 仿真结果分析

应用SolidWorks软件的探测功能,测得应力最大点为2055节点,可得到该节点跌落过程中的应力、速度、加速度、位移的时间历程响应。其中,应力时间响应见图3中的节点2055曲线。软件还可得到该节点在整个冲击过程中应力不断波动,存在3个波峰,与SolidWorks软件的默认求解时间相关。软件跌落仿真默认求解时间为应力波^[4-5]穿过模型并返回时间的3/2倍。选取杯子不同部位的节点,得到各节点的应力时间响应图解(见图3)。选取节点分别为:最大应力点,2055节点;杯底外边沿上的点,9898节点;杯底中间面上的点,4479节点;杯体上的点,8816节点;杯子上边沿上的点,9727节点。由图3可知,各点的应力值均是不断波动的,离碰撞接触点越远,应力响应越晚,这与应力波在模型中的传递原理相符合,证明仿真真实反映了跌落冲击时产品内的应力变化,结果可靠。

跌落仿真还可以得到,杯子受到的冲击载荷在19.365 μ s时变为0,而最大应力在5.534 μ s时取得。可见,杯子的最大应力响应发生在跌落冲击过程中,

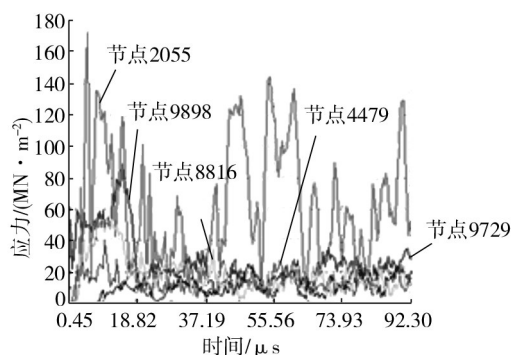


图3 典型位置的应力时间响应

Fig.3 Stress-time response of typical positions

而并不一定是跌落冲击力最大的时候。这也与杯子跌落冲击过程中的最大应力响应规律相符,即跌落冲击过程中的最大应力响应可能发生在碰撞时或者碰撞后物体的反弹期间。

3 基于跌落仿真的产品脆值获取方法

脆值的获取方法通常有冲击试验机法和缓冲材料法等2种^[6]。2种方法都需对产品进行破坏性实验,且存在试验机昂贵、操作性差和精度低等问题。目前,脆值理论还在不断完善,许多学者在这方面进行了研究^[7-13]。结合公式^[14],根据跌落仿真得到的临界破损高度,可得产品的脆值 G 。

$$t = c \frac{H}{G}$$

式中: t 为缓冲垫厚度; c 为缓冲材料的最小缓冲系数; H 为临界跌落高度。

运用此公式,需要将仿真实验的跌落目标由默认的刚性面换成自定义材料的柔性面。需要指定灵活目标的法向刚度、切向刚度、质量密度和厚度。材料的最小缓冲系数只与材料的材质、密度、生产工艺相关^[15],指定材料后即可获得。测出在给定缓冲材料厚度下的产品临界破损高度即得到产品脆值。例如,采用EPS缓冲材料,法向刚度为750 Pa/m,切向刚度为255 Pa/m,质量密度为0.023 g/cm³,厚度取10 mm,最小动态缓冲系数 $c=4.14$ ^[15]。实验得到陶瓷杯最大应力点在 $H=230$ mm时取得最大许用应力 1.720×10^8 N/m²。代入公式得:

$$G_1 = \frac{cH}{t} = 95.22$$

4 基于跌落仿真的产品结构改进

从陶瓷杯的跌落仿真结果可看出,杯子在垂直跌落时,杯底为脆弱部位,受冲击时最易破损。在产品初期,可以对杯子的结构进行适当改进设计,以提高产品的抗冲击能力。将杯子的底部呈弧度的加厚,见图4。

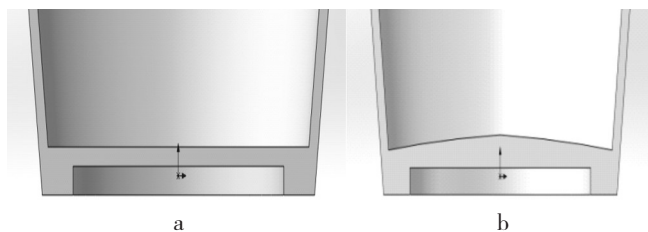


图4 杯子的结构对比

Fig.4 Structure comparison of cups

将改进后的杯子同样从170 mm的高度垂直跌落,得到应力图见图5。可见,应力最大点的位置仍然在杯底中间位置,应力最大值由之前的 $1.720 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 减小为 $1.549 \times 10^8 \text{ N/m}^2$;杯子典型位置的应力响应值也比之前结构小许多。这在原理上验证了一些玻璃、陶瓷器皿底部设计较厚的正确性。

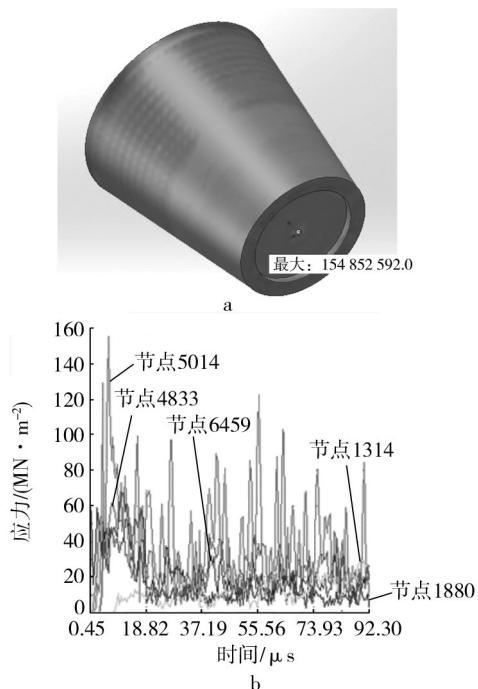


图5 改进后杯子的应力

Fig.5 Maximum stress diagram of the improved cup dropping from 170 mm

采用前述相同的方法,测得采用缓冲材料EPS时,杯子的临界破损高度 $H=260 \text{ mm}$,故脆值:

$$G_2 = \frac{cH}{t} = 107.65$$

比较 G_1, G_2 可见,改变杯子易碎点的结构可有效提高杯子的脆值,改善杯子的抗冲击性能。

5 结语

利用SolidWorks可实现任意产品跌落在任意指定面的跌落过程仿真。通过对某陶瓷杯的跌落仿真,得到了杯子跌落破损的临界高度,并利用相关公式得到产品脆值;利用跌落仿真的应力云图,指导进行产品结构改进,得到抗冲击性能更强的产品。基于SolidWorks的产品跌落仿真可在以下方面加以应用研究。

1) 得到设计产品的跌落应力云图。改变跌落方向,分析产品不同方向跌落时的脆弱位置。在产品初期指导对产品结构进行相应改进,提高产品耐冲击性能。

2) 得到产品跌落在指定面上的临界破损高度,得到产品指定方向上的脆值。为产品的包装设计提供参考,避免过度包装和欠缺包装。

参考文献:

- [1] 徐鹤飞,姚荣生. 产品脆值测量[J]. 中国包装,1985(4): 39—48.
XU He-fei, YAO Rong-sheng. Measurement of Product Fragility[J]. China Packing, 1985(4): 39—48.
- [2] 韩志仁,陶华,黄贺. 机械设计中有限元分析的几个关键问题[J]. 机械设计与制造,2004(2): 58—60.
HAN Zhi-ren, TAO Hua, HUANG He. Main Problem Influenced Error in Element Analysis in Mechanical Design[J]. Machinery Design and Manufacture, 2004(2): 58—60.
- [3] 张慧,王军. 陶瓷餐具多次跌落损伤及其表征[J]. 包装工程,2011,32(5): 36—37.
ZHANG Hui, WANG Jun. Multiple Dropping Damage of Ceramic Tableware and Its Characterization[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(5): 36—37.
- [4] WANG Zhong-Jin, CHENG Li-Dong. Effect of Material Parameters on Stress Wave Propagation During Fast Upsetting[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(5): 1189—1195.
- [5] WEI Tong. Pressure-shear Stress Wave Analysis in Plate Im-

- pact Experiments[J]. International Journal of Impact Engineering, 1996, 19(2): 147—164.
- [6] 黄雪,王卫荣. 产品脆值及其评定方法探析[J]. 机电产品开
发与创新, 2003(2): 33—34.
HUANG Xue, WANG Wei-rong. Product Fragility and Re-
search of Its Evaluation Methods[J]. Mechanical and Electrical
Product Development and Innovation, 2003(2): 33—34.
- [7] WANG Zhi-wei, JIANG Jiu-hong. Evaluation of Product
Dropping Damage Based on Key Component[J]. Packaging
Technology and Science, 2010, 23(4): 227—238.
- [8] JIANG Jiu-hong, WANG Zhi-wei. Dropping Damage Bound-
ary Curves for Cubic and Hyperbolic Tangent Packaging Sys-
tems Based on Key Component[J]. Packaging Technology and
Science, 2011, 25(7): 397—411.
- [9] 宋宝峰. 产品脆值概念的发展及其演进[J]. 包装工程,
2008, 29(5): 22—24.
SONG Bao-feng. Development and Evolution of Product Fra-
gility Concept[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(5): 22—
24.
- [10] 王保升,郝洪艳,寇二刚. 基于冲击响应谱的产品脆值描述
与测试[J]. 包装工程, 2008, 29(12): 27—29
WANG Bao-sheng, HAO Hong-yan, KOU Er-gang. Descrip-
tion and Test of Product Fragility Based on Shock Response
Spectrum[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(12): 27—29.
- [11] WANG Zhi-wei. Shock Spectra and Damage Boundary Curves
for Non-linear Package Cushioning Systems[J]. Packaging
Technology and Science, 1999, 12(5): 207—217.
- [12] 孙德强. 产品脆值的数值计算方法[J]. 株洲工学院学报,
2004, 18(5): 130—134.
SUN De-qiang. Numerical Calculation Methods of Product
Fragility[J]. Journal of Zhuzhou Institute of Technology, 2004,
18(5): 130—134.
- [13] 荆玉焕,张俊坤,高欣宝. 箱装电子仪器安全跌落冲击数值
模拟方法研究[J]. 包装工程, 2012, 33(7): 9—12.
JING Yu-huan, ZHANG Jun-kun, GAO Xin-bao. Study of
Numerical Simulation Method of Electronic Instruments Pack-
aging Drop Impact[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(7):
9—12.
- [14] 靳桂芳,刘占胜. 测量产品脆值的简易方法[J]. 包装工程,
1993, 14(1): 21—23.
JIN Gui-fang, LIU Zhan-sheng. Simple method of Measuring
Product Fragility[J]. Packaging Engineering, 1993, 14(1):
21—23.
- [15] 山静民. 发泡聚苯乙烯缓冲系数的研究[J]. 西北轻工业学
院学报, 1990, 3(8): 14—18.
SHAN Jing-min. Research on Cushioning Coefficient of EPS
[J]. Journal of Northwest University of Light Industry, 1990, 3
(8): 14—18.

(上接第23页)

- Chemical Industry Press, 1988.
- [12] GB/T 26253—2010, 水蒸气阻隔性的测试[S].
GB/T 26253—2010, Water Permeability Measurement[S].
- [13] GB/T 19789—2005, 氧气透过性的测试[S].
GB/T 19789—2005, Oxygen Permeability Measurement[S].
- [14] GB 4789.2—2010, 菌落总数的测定[S].
GB 4789.2—2010, Measurement of Total Bacterial Count[S].
- [15] GB/T 5009.44—2003, 挥发性盐基氮(TVB-N)的测定[S].
GB/T 5009.44—2003, Measurement of TVB-N[S].
- [16] 周祥兴. 高阻隔性薄膜的生产与性能[J]. 中国包装工业,
2001(8): 29—36.
ZHOU Xiang-xing. Production and Function of High-Resis-
tant Film[J]. China Packaging Industry, 2001(8): 29—36.
- [17] 张敏. 不同阻隔性的包装材料对气调包装鲜肉品质变化的
影响[J]. 食品工业科技, 2008(1): 238—240.
ZHANG Min. Effect of Packaging Materials with Different
Barrier Property on Fresh Meat under MAP[J]. Science and
Technology of Food Industry, 2008(1): 238—240.
- [18] 姚艳玲,贺稚非,李洪军,等. 包装材料对高氧气调包装冷
鲜肉品质变化的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(8): 313—317.
YAO Yan-ling, HE Zhi-fei, LI Hong-jun, et al. Effect of
Packaging Materials with Different Barrier Properties on
Quality Changes of High-Oxygen Modified Atmosphere
Packaged Chilled Pork during Cold Storage[J]. Food Science,
2012, 33(8): 313—317.
- [19] GILL C O, BRYANT J. The Contamination of Pork with Spoil-
age Bacteria during Commercial Dressing, Chilling and Cut-
ting of Pig Carcasses[J]. Journal of Food Microbiology, 1992,
16(1): 51—62.