

红酒包装跌落仿真分析及优化设计

门超, 李光

(天津科技大学, 天津 300222)

摘要: **目的** 研究红酒包装跌落状态下的应力和变形情况, 对缓冲衬垫进行优化设计。**方法** 运用 Ansys Workbench 建立红酒包装的实体模型, 并进行跌落的仿真模拟, 根据结果分析包装的受力以及变形情况。以衬垫底座厚度和衬垫壁高度为设计变量, 以整体变形、衬垫质量为优化目标, 对红酒包装进行多目标优化设计。**结果** 包装件的最大变形量为 137.01 mm, 优化后的衬垫底座厚度为 23.06 mm, 衬垫壁高度为 183.1 mm。**结论** 在衬垫质量基本不变的前提下, 找到了最优方案, 进一步提高了对红酒的保护能力, 降低了红酒在跌落时的破损率。

关键词: 红酒包装; 跌落仿真; 多目标优化

中图分类号: TB485.1; TB484.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)03-0038-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.03.008

Drop Simulation Analysis and Optimization Design of Red Wine Package

MEN Chao, LI Guang

(Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

ABSTRACT: The work aims to study the stress and deformation of the red wine package in the process of dropping and optimize the design of buffering cushion. Ansys Workbench was used to build the physical model of the red wine package. Moreover, the stress and deformation of the package were analyzed according to the results of drop simulation. A multi-objective optimization design of the red wine package was carried out, with the thickness of cushion base and the cushion wall height as the design variables, and the overall deformation and cushion mass as the optimization objectives. The maximum deformation of the package was 137.01 mm, the thickness of the optimized cushion base was 23.06 mm, and the cushion wall height was 183.1 mm. The best scheme was found under the premise that the cushion mass remains basically unchanged. The scheme further improves the protection capability of the red wine and reduces the breakage rate of the red wine when it falls.

KEY WORDS: red wine package; drop simulation; multi-objective optimization

在红酒的整个流通过程中存在着各种可能导致其破损泄露的可能, 特别是在商品到达消费者手中之后, 因为其失去了瓦楞纸箱的保护, 一旦从手中滑落极易发生由垂直冲击导致的破损。有限元分析法被应用于各个领域, 如生物医学、物流运输、机电工程以及建筑等^[1]。Esser 将扩展有限元应用于悬浮液滴问题^[2]; Li 将有限元应用于旋转工具的优化设计^[3]; 蔡斌等将有限元分析应用于材料^[4]。有限元分

析在包装领域同样得到应用。Hao 等利用有限元模拟了包装中水分对饼干寿命的影响^[5]; Roduit^[6], Hicks^[7]以及 Koichiro^[8]同样将有限元方法应用于包装的研究中。

对于红酒的包装, 若采用实验方法研究跌落, 其研究成本较高, 随着有限元技术的发展, 计算机仿真分析已逐渐成为研究构件跌落的重要手段^[9]。这里运用 Ansys Workbench 瞬态动力学模块对红酒整体包装

收稿日期: 2017-06-07

基金项目: 天津市自然科学基金 (17JCTPJC54900)

作者简介: 门超 (1992—), 男, 天津科技大学硕士生, 主攻包装设计与仿真优化、包装机械与虚拟仿真。

通信作者: 李光 (1975—), 男, 天津科技大学副教授, 主要研究方向为包装机械与虚拟仿真、包装动力学。

件进行跌落过程的仿真分析,而整个分析过程大致包括前处理、计算求解、后处理等 3 个阶段^[10-11]。这里在借鉴前人研究的基础上设置跌落高度为 1.2 m,对红酒包装进行跌落分析后,再对缓冲衬垫进行多目标的优化设计,对比多个优化方案后得出最优的优化方法,以求在控制成本的前提下提升设计的保护性。

1 模型的建立及前处理

1.1 建立模型

分析对象为市面上所售的一款红酒,净含量为 750 mL。整个包装包含红酒玻璃瓶 1 个,红酒软木塞 1 个,缓冲衬垫 1 对,白卡纸层合纸盒 1 个,共 5 个部分,另加 1 块 50 mm 厚水泥地面。因主要在跌落时对缓冲衬垫进行考察,故建模时忽略瓶口的倒角、加强环等。模型采用 Ansys Workbench 中的 DesignModeler(DM)模块建立,见图 1。



图 1 红酒包装件跌落分析模型
Fig.1 Drop analysis model of red wine package

外包装纸盒材质为白卡纸,外裱铜版纸,因铜版纸为印刷层,不起支撑作用,故忽略。整个纸盒外尺寸为 125 mm×125 mm×350 mm,厚度为 0.28 mm,由 7 层定量为 300 g/m²、厚度为 0.4 mm 的白卡纸层合而成。内部红酒瓶材质为无铅玻璃,直径为 70 mm、高为 315 mm,缓冲衬垫分为镜面对称的 2 个部分,其总体尺寸为 119 mm×119 mm×200 mm,其中底座高 25 mm,衬垫壁高 175 mm,两者为相连结构。

1.2 材料设置

为接近真实跌落过程效果,需要对包装件不同部分设置不同的工程数据,具体操作是赋予材料密度、弹性模量和泊松比,其中酒和空气无弹性模量,这里主要取其质量参数。包装件的材料涉及无铅玻璃、软木、EPS20、白卡纸以及水泥,其中除水泥外,其他 4 种材料工程数据需要用户自行添加,定义材料的密度、弹性模量以及泊松比等参数^[12]。其中,由于白卡纸特殊的多层结构,储信庆^[13]等对其相关性能参数进行了专门研究,以上所涉及的各种材料的具体参数见表 1。

表 1 各材料的物理参数
Tab.1 Physical parameters of each material

种类	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
无铅玻璃	250	70 200	0.22
软木塞	240	500	0
EPS20	20	5.114	0.28
白卡纸	750	209.09	0.312

1.3 各个部件的接触设置

软件中提供了 6 种接触的类型,其中 Boned(绑定)使用后在接触面或者接触边之间不存在切向的相对滑动或者法向的相对分离,这是一种缺省的接触类型,适应于所有的接触区域。因为衬垫粘于纸盒上,所以衬垫与纸盒、酒瓶与软木塞设置为 Boned(绑定)。瓶身和衬垫方面,为了便于取放红酒,在建模时瓶身与衬垫壁间存在一定间隙;瓶底和底部衬垫有接触,软件可以自动侦测各部的接触,并可识别瓶底与底部衬垫的接触。由于跌落时为垂直跌落,两者可分离,所以接触设置为 frictionless(无摩擦)。同理,纸盒与水泥地面也设置为 frictionless(无摩擦)。

1.4 模型网格的划分

网格的划分影响着分析计算的精度及速度。网格数量少,计算速度相对较快,随着网格数量增加,计算精度就会升高,同时耗时也会成倍增加。划分网格时,根据实际情况应做到划分时间尽量短、网格尽量小^[14]。Ansys 网格划分的方法有 5 种,即自由网格划分、映射网格划分、体扫描生成网格、面拖拉生成网格以及过渡网格划分。自由网格划分对实体模型无特殊要求,当划分对象为面时,网格形状可以是三角形、四边形或两者组合^[15]。为保证精度与求解速度,这里在网格划分时对瓶身和纸盒采用自由网格划分,对水泥地面、缓冲衬垫等其他部件采用以六面体为主体的划分。划分之后共有 30 469 个网格,划分结果见图 2。

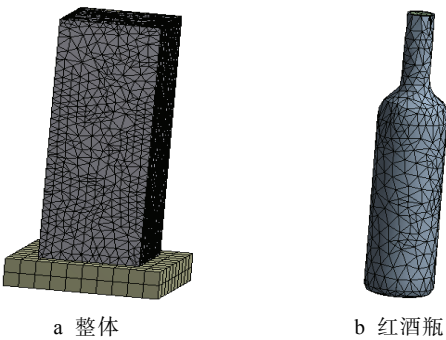


图 2 实体模型的网格划分
Fig.2 Meshing of the physical model

2 跌落仿真分析

2.1 定义跌落速度与约束

这里主要模拟红酒包装件从人手中滑落的情况,从手中滑落时一般为底部着地。另外,考虑到后续优化工作的可实施性,这里研究的跌落情况为垂直跌落。根据人体学设计原理,成年搬运工人运输产品时搬运高度约为 1.2 m,正常拿取时会低于这个高度,为保证缓冲效果,跌落高度设置为 1.2 m。固定约束选取的面为所画水泥地面的下方,这里模拟跌落过程与地面接触瞬间的情况,计算得到该瞬间的速度为 4.85 m/s,方向为 x 轴负方向。计算公式为:

$$|v| = \sqrt{2gH}$$

式中: g 为重力加速度,这里取 9.81 m/s^2 ; H 为设计跌落的高度,为 1.2 m; v 为与水泥地面接触瞬间的速率。时间设为 0.03 s。

2.2 总体变形情况

跌落后的变形情况见图 3,可知包装件的最大变形量为 137.01 mm,发生在包装件盒身的下方,而上方的变形量很小,甚至为 0 mm。整个缓冲衬垫下部发生了扭曲,衬垫的形变主要发生在这里,缓冲衬垫的最上方没有形变的发生。在包装件跌落的瞬间,缓冲衬垫的下方是吸收冲击力的主要部分,整个包装件承受力的部位集中在下方,盒身形变的产生也由其内部缓冲衬垫下方的形变所造成。

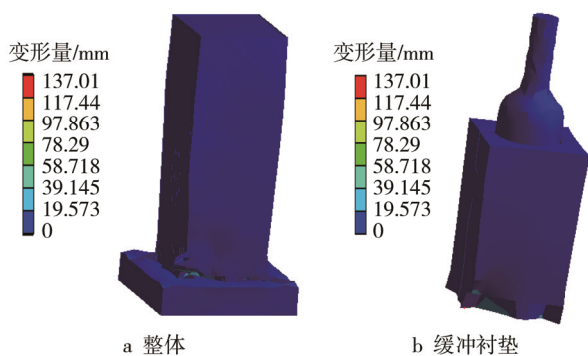


图 3 红酒包装件的变形情况
Fig.3 Deformation of red wine package

2.3 等效应力情况

体系的应力分布情况见图 4。由图 4a 可以看出,等效应力最大的地方发生在水泥地面而并非包装件上,整个红酒包装件所承受的应力都在包装件的下方,并且越往下应力越大。最大应力集中出现在包装件的底部,在 37.109 MPa 左右。整个包装件的形变都在应力云图的受力较小区域,数值为 21.282 MPa 以下,远远小于水泥地面所受的最大等效应力。

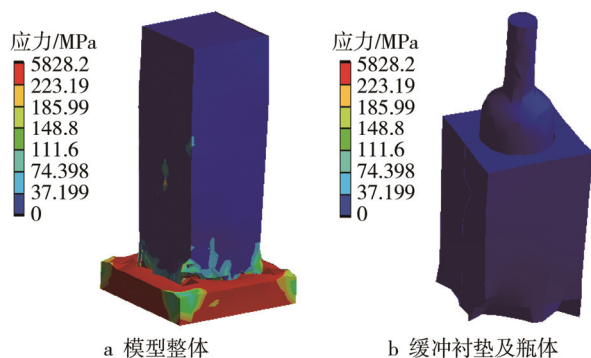


图 4 红酒包装件等效应力云图
Fig.4 Equivalent stress contour of red wine package

经过分析可以发现,整个包装件应力主要集中于下部,这使得纸盒的下部分以及缓冲衬垫成为减小应力的关键。造成这种应力分布的原因也很明显,红酒包装件首先和地面接触的是底部,为了吸收整个包装件的动能,包装件的下部成为应力集中的地方,因此这部分会发生轻微的形变。这也是缓冲衬垫的下部发生较大形变的主要原因,而缓冲衬垫的形变又会进一步从包装件的内部给纸盒造成应力和应变。

由图 4b 可以看出,缓冲衬垫上部所受应力较小,且处在应力最小的区域,其应力值远远低于 37.199 MPa。应力集中在实体下部的中心位置,虽然水泥地面上出现了最大应力,但整个包装件并没有大的应力出现,且玻璃瓶没有破损,说明该红酒的缓冲衬垫具备一定的防护功能。

3 优化设计

Ansys Workbench 提供了多目标优化设计的平台^[16],这里利用 Workbench 多目标优化设计功能对红酒包装件进行优化,在保证红酒安全的前提下,尽可能减少缓冲衬垫的使用,更为重要的是减小整体形变与等效应力。

3.1 设计变量和目标函数的设置

在包装件与地面接触的瞬间,缓冲衬垫所发生的形变是产生纸盒形变和应力的原因之一,因此,在不改变缓冲衬垫材料的前提下,优化衬垫的结构使其形变减小,这样就会减小因缓冲衬垫形变而给纸盒造成的应力、应变。缓冲衬垫可以改变的地方有衬垫底厚度以及衬垫壁的高度,还应保持缓冲的可靠性,最好同时能够减少材料的使用。为找到合适的设计,这里对缓冲衬垫进行优化设计。

在建立 DesignModeler(DM)模块中,选择衬垫底座厚度和衬垫壁高度为设计变量,共设计 25 个样本点。考虑到整个红酒包装盒的高度有限,且整个红酒瓶的高度为 315 mm,因此衬垫底座的厚度不能设得太高,取值范围为 22.5~26.5 mm。衬垫壁虽然不与瓶

体接触，但其具有防止瓶体水平位移的功能，不能设得太矮，因此选在 160~190 mm 之间，目标函数选择为总体形变、等效应力和衬垫质量，目标为最小。

3.2 优化的结果

去除明显计算错误的结果，选取了 3 组最优的设计点，见表 2。可以看出，设计点 1 的衬垫底厚度有所上升，这也导致了衬垫总体质量的上升，但是衬垫壁高度下降了约 1.5 cm，总体变形量降低了一半，等效应力上升了 20%，因此该优化点在等效应力方面不是很出色。设计点 2 衬垫底座厚度下降，而衬垫壁高度上升，这使得衬垫总体质量略微上升，增加了约 1 g，但其改进后的等效应力只有原来的 20%，等效应力下降了约一半。设计点 3 的衬垫总体质量比设计点 2 有所上升，等效应力方面比设计点 2 略微出色，但是总体变形量却约为设计点 2 的 2 倍。

表 2 最优优化结果
Tab.2 Optimal optimization results

名称	衬垫 底厚 度/mm	衬垫 壁高 度/mm	总体 变形 量/mm	等效 应力/ GPa	衬垫 质量/g
原始点	25	175	137.01	5.8282	18.853
设计点1	25.14	161.54	69.907	6.8914	17.695
设计点2	23.06	183.1	25.758	3.93	19.287
设计点3	24.66	181.23	43.901	3.2728	19.35

综合考虑，选取设计点 2 作为优化设计点。采用该优化方案后，虽然衬垫的总质量有所上升，但仅上升不到 1 g，基本上不会造成成本的增加。在性能方面，由于结构的改进，总体变形量与等效应力有明显的下降。在灵敏度方面，因衬垫底的可变范围有限，并未见其与目标函数计算结果之间的灵敏度。在衬垫壁方面，因其在整个跌落冲击瞬间承受力几乎为 0，所以其与整体变形量的灵敏度为 0。衬垫壁与等效应力有着较高的灵敏度，为负相关，与衬垫质量有着更高的正相关灵敏度，其值接近 1。

4 结语

应用 Ansys Workbench 对红酒包装件进行了模型建立和跌落模拟，分析了缓冲衬垫的受力和形变情况。接着对该产品进行了优化分析，选取了最优的缓冲衬垫底座厚度和缓冲衬垫壁高。在质量基本不变的情况下，包装件的整体变形量和等效应力有了显著的下降，提升了包装对红酒的保护效果，降低了红酒的破损率。这里采用基本的研究方法，对红酒包装件的防护性能进行了初步的探索和优化，虽存在不足（如未能进行多角度跌落分析），但研究结果仍具备一定

的指导意义，在接下来的研究中笔者将进一步完善相关的研究方法。

参考文献：

[1] 陈锡栋, 杨婕, 赵晓栋. 有限元法的发展现状及应用[J]. 中国制造业信息化, 2010(11): 6—8.
CHEN Xi-dong, YANG Jie, ZHAO Xiao-dong. Development Status and Application of Finite Element Method[J]. Manufacture Information Engineering of China, 2010(11): 6—8.

[2] ESSER P, GRANDE J, REUSKEN A. An Extended Finite Element Method Applied to Levitated Droplet Problems[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2010, 84(7): 757—773.

[3] LI Zhao-can, XU Kun. Optimal Design of Rotary Tool Based on ANSYS Workbench[J]. International Journal of Plant Engineering and Management, 2017(1): 59—64.

[4] 蔡斌, 周立明. 非均匀材料界面裂纹的 Cell-Based 光滑有限元法[J]. 复合材料学报, 2017(1): 175—182.
CAI Bin, ZHOU Li-ming. Research on Cell-Based Smoothed Finitie Element Method of Inhomogeneous [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017(1): 175—182.

[5] HAO F, LU L, WANG J. Finite Element Simulation of Shelf Life Prediction of Moisture-sensitive Crackers in Permeable Packaging under Different Storage Conditions[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2016, 40(1): 37—47.

[6] RODUIT B, BORGEAT C H, CAVIN S, et al. Application of Finite Element Analysis (FEA) for the Simulation of Release of Additives from Multilayer Polymeric Packaging Structures[J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2005, 22(10): 945—955.

[7] HICKS B J, MULINEUX G, SIRKETT D. A Finite Element-based Approach for Whole-system Simulation of Packaging Systems for Their Improved Design and Operation[J]. Packaging Technology and Science, 2009, 22(4): 209—227.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 李楠, 韩治, 汪军, 等. 新燃料元件运输容器跌落试验的有限元分析[J]. 核动力工程, 2015, 36(5): 18—21.
LI Nan, HAN Zhi, WANG Jun, et al. FEM Analysis for

- Dropping Test of Fresh Fuel Cask[J]. Nuclear Power Engineering, 2015, 36(5): 18—21.
- [11] 陈永当, 鲍志强, 任慧娟, 等. 基于 SolidWorks Simulation 的产品设计有限元分析[J]. 计算机技术与发展, 2012(9): 177—180.
- CHEN Yong-dang, BAO Zhi-qiang, REN Hui-juan, et al. Finite Element Analysis for Product Design Based on SolidWorks Simulation[J]. Computer Technology and Development, 2012(9): 177—180.
- [12] 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(工学版), 2012, 46(10): 1773—1777.
- LU Fu-de, TAO Wei-ming, GAO De. Impact Response of Series Cushion System and Structure Optimization Analysis[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(10): 1773—1777.
- [13] 储信庆, 计宏伟. 灰底白板纸与白卡纸的弹性常数对比[J]. 包装工程, 2015, 36(23): 48—52.
- CHU Xin-qing, JI Hong-wei. Comparison of the Elastic Constants between the Gray Manila Board and Ivory Board[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(23): 48—52.
- [14] ANJANEYULU Y, MANIKANTA K, PRASAD K. Modelling and Optimization of I.C Engine Crank Shaft with Different Materials and Loads by Using Finite Element Analysis[J]. International Journal of Innovative Technologies, 2015, 12: 1994—1998.
- [15] 王宇, 卢玲, 李文韬. 基于 Ansys 的有限元网格划分方法应用研究[J]. 起重运输机械, 2014(3): 53—56.
- WANG Yu, LU Ling, LI Wen-tao. Research on Finite Element Meshing Method Based on Ansys[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2014(3): 53—56.
- [16] QI Xiao-dong, SHEN Xiu-li. Multidisciplinary Design Optimization of Turbine Disks Based on Ansys Workbench Platforms[J]. Procedia Engineering, 2015, 99: 1275—1283.

《智能包装与活性包装》特色栏目征稿函

智能包装与活性包装是包装工程技术领域的发展趋势,也是全球包装行业研发和应用的焦点。智能包装新技术与活性包装新材料的应用,能改善包装物条件的体系(通过释放物质、排除或抑制 SU),延长包装物使用寿命;提高卫生安全性;改善气味和口感特性的同时保证品质不变。利用新型的包装材料、结构与形式对商品的质量和流通安全性进行积极干预与保障,通过信息收集、管理、控制与处理技术完成对运输包装系统的优化管理等。

鉴于此,本刊拟围绕“智能包装与活性包装”这一主线,作系列专项报道。本刊编辑部特邀请相关专家为该栏目撰写稿件,以期进一步提升本刊的学术质量和影响力。稿件以研究论文为主,也可为综述性研究,请通过网站投稿,编辑部将快速处理并优先发表。

编辑部电话: 023-68792294 网址: www.packjour.com

《包装工程》编辑部