新型转轮式红酒包装结构设计及其跌落有限元分析

田　野[1,2]，赵雪微[1]，智　慧[1]，张　莉[1]，杨　飞[2]，丁　亮[2]，邓宗全[2]

（1.哈尔滨商业大学，哈尔滨 150030；2.哈尔滨工业大学，哈尔滨 150001）

摘要： 针对目前市场上单一的红酒包装结构，提出了一种新型转轮式包装结构。通过计算得到了转轮式包装结构尺寸，并采用 Pro/E 软件对其进行了三维建模，导入到 ANSYS/LS-DYNA 环境中进行了跌落状态仿真模拟。通过仿真模拟结果与产品脆值的对比分析，对转轮包装结构进行了优化。

关键词： 红酒包装；转轮式；有限元分析；跌落

中图分类号： TB482.2　**文献标识码：** A　**文章编号：** 1001-3563(2013)19-0051-04

Design of Propeller Type Red Wine Packaging Structure and Drop Finite Element Analysis

TIAN Ye[1,2], *ZHAO Xue-wei*[1], *ZHI Hui*[1], *ZHANG Li*[1], *YANG Fei*[2], *DING Liang*[2], *DENG Zong-quan*[2]

(1. Harbin University of Commerce, Harbin 150030, China; 2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A new propeller type packaging structure for red wine was put forward aiming at the single packaging structure on the market. Sizes of the propeller type packaging structure were obtained by calculation. 3D modeling of the packaging structure was established using Pro/E software. Drop simulation was carried out by introducing to 3D model into ANSYS/LS-DYNA environment. The packaging structure was optimized through comparing simulation results with the product fragility analysis.

Key words: red wine packaging; propeller; finite element analysis; drop test

随着红酒文化的逐渐普及，红酒的包装越来越受到重视。文中提出的转轮式红酒结构设计已获得 2012 年第三届全国大学生包装结构大赛一等奖，其实用新型专利的注册正在申请中。目前已与相关企业合作，通过论证后可投入批量生产。

国内外许多学者[1-3]对于包装件的跌落动态特性作了相关研究。加速度是表征流通过程中冲击或振动负荷的基本参数之一，包装件在冲击载荷下的最大加速度是反映包装件缓冲性能的重要指标之一[4]。目前国内的大部分跌落试验都是使用包装跌落机对产品实物进行跌落试验。为了控制成本，最大限度地减少产品实物的试验次数，并取得可靠性试验数据，可采用计算机模拟仿真，对包装件进行跌落研究。

笔者提出了一种新型可盛装 3 支红酒瓶，并循环使用的转轮式包装桶。通过计算其结构和缓冲衬垫尺寸，对其进行跌落仿真分析，以满足酒桶包装防护要求，达到在运输、搬运、装卸过程中保护产品安全的目的。

1　酒桶结构设计

1.1　酒桶尺寸设计

包装对象选用 355 mL 的红酒酒瓶进行结构设计，目前国内外针对木材包装设计尚无成熟设计公式和规范，由于瓦楞纸属于木材纤维结构，如复合板等木材纤维压制材料，与木材纤维的物理化学性质相似，因此参考瓦楞纸箱结构设计[5]公式对其结构参数进行计算。

1）红酒酒桶内尺寸设计

$$X_i = x_{max} n_x + d(n_x - 1) + T + k' \tag{1}$$

式中：X_i 为酒桶内尺寸；x_{max} 为内装物最大外尺寸；n_x 为内装物排列数目；d 为内装物公差系数；T 为

收稿日期： 2013-06-25

基金项目： 黑龙江省教育厅科技项目(12531165)

作者简介： 田野(1981-)，男，黑龙江人，硕士，哈尔滨商业大学讲师，主要研究方向为包装机械设计及仿真分析。

缓冲件总厚度;k'为内尺寸修正系数。

2）红酒酒桶制造尺寸

$$X=X_i+k \quad (2)$$

式中:X 为制造尺寸;X_i 为内尺寸;k 为制造尺寸修正系数。

3）红酒酒桶外尺寸设计

$$X_0=X_{max}+K \quad (3)$$

式中:X_0 为酒桶外尺寸;X_{max}为酒桶最大制造尺寸;K 为酒桶外尺寸修正系数。

经计算得到酒桶的各项尺寸,见表 1。

表 1 酒桶尺寸

Tab. 1 Barrel size

mm

	内径	高度
内尺寸	83	262
制造尺寸	94	288
外尺寸	97	293

1.2 衬垫尺寸设计

1)承受跌落的承载面积计算[6]

$$A=mG/\sigma_m \quad (4)$$

式中:A 为产品的承载面积;m 为质量;G 为最大加速度;σ_m 为冲击时最大应力。

厚度公式为 $T_0=CH/G$ (5)

式中:T_0 为原设计厚度;C 为缓冲系数;H 为跌落高度。

蠕变补偿为 $T=T_0(1+C_r)$ (6)

式中:C_r 为蠕变系数。

经计算得到衬垫的各项尺寸,见表 2。

表 2 衬垫尺寸

Tab. 2 Buffer pad size

	承载面积 / mm^2	厚度 / mm
瓶底衬垫	8100	40
瓶身衬垫	1000	83

2 跌落模型建立

ANSYS 中的 LS-DYNA 求解器是一个以显示为主,隐式为辅的非线性有限元求解器。其显式动力分析的特点是:用中心差分法在时间 t 时刻求加速度。其碰撞方程为:

$$[M]\{a_t\}=([F_t^{ext}]-[F_t^{int}]) \quad (7)$$

加速度: $\{a_t\}=[M]^{-1}([F_t^{ext}]-[F_t^{int}])$ (8)

式中:M 为质量矩阵;F_t^{ext} 为施加外力和体力矢量;F_t^{int} 为内力矢量。

节点的速度与位移可以通过式(9)和式(10)得到:

$$\{v_{t+\Delta t/2}\}=\{v_{t-\Delta t/2}\}+\{a_t\}\Delta t_t \quad (9)$$

式中:$\Delta t_{t+\Delta t/2}=0.5(\Delta t_0+t_{t+\Delta t})$

$$\{u_{t+\Delta t}\}=\{u_t\}+\{v_{t+\Delta t/2}\}\Delta t_{t+\Delta t/2} \quad (10)$$

新的几何构型由初始构型加上位移增量获得:$\{x_{t+\Delta t}\}=\{x_0\}+\{u_{t+\Delta t}\}$。

应用显示积分算法求解碰撞问题时,还要特别注意的问题就是时间步长不能超过临界时间步长[5]。保证收敛的临界时需满足公式(11):

$$\Delta t\leqslant\Delta t_{cr}=2/\omega_{max} \quad (11)$$

式中:Δt_{cr}为临界时间步长;ω_{max}为系统的最高阶固有振动频率。

3 跌落仿真及结果分析

3.1 三维模型建立

通过在 Pro/E 软件中建模,将红酒桶模型导入 ANSYS 中进行模拟分析。酒桶模型结构见图 1。

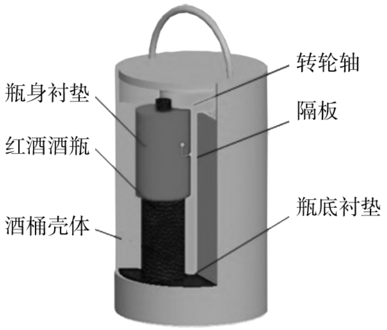

图 1 酒桶结构

Fig. 1 Barrel structure

因该酒桶为体单元,故采用的是 solid164 单元类型,设定其主要材料及其参数:质量为 4.5 kg,脆值 G 为 40 ~60。为了便于计算,对实体模型及有限元模型进行简化,可将它视为一个形状较为规则的圆柱形物体,材料模型采用双线性随动模型[7]。具体参数设置见表 3。

重力加速度取值为 9.81 m/s^2,根据人因学设计原理,成年搬运工人运输产品时搬运高度约为 1.2 m,因此仿真实验的跌落高度应大于该值才以获取足够的设计裕度值,则将仿真的极限跌落高度定为 2 m。

表3　参数设置

Tab.3 Parameters setting

参数	数值	参数	数值
弹性模量	10 GPa	阻尼系数	0.1
极限应力	24 MPa	切线模量	0.5 GPa
密度	500 kg/m^3	泊松比	0.3

将运行时间定为发生变化后的0.05 s,整个实验的帧数定为100帧[8]。酒桶模型的生成见图2。

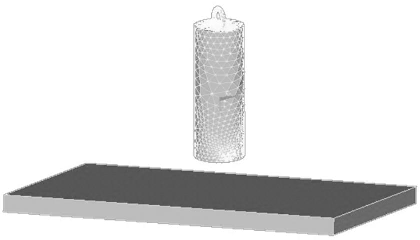

图2　模型生成

Fig.2 Model generation

3.2　结果分析

图3表示产品在2 m跌落高度情况下水平跌落过程中易损点的加速度变化曲线。从图3中可知,在y方向的加速度曲线在整个跌落过程中所受到的冲击最大。加速度响应最大值一旦超过产品脆值,产品就容易破损。在缓冲衬垫不起保护作用的情况下,产品会因跌落冲击发生破损。酒桶的脆值$G=40\sim60$[6]。酒桶接触地面时受到的冲击力最大,达到峰值280 m/s^2,G值为28.6,符合防护要求。加速度为负数方向与规定方向相反,随后酒桶弹起,受到反方向加速度,此后微幅震荡,出现小幅波动。

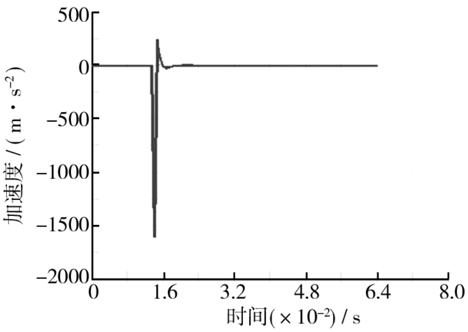

图3　2 m水平跌落y方向加速度

Fig.3 y direction acceleration in 2 m horizontal drop

图4为酒桶模型的水平跌落过程,从等效应力云图中可以看出酒桶在水平跌落过程中所受到的最大冲击力为38.8 MPa,超过产品的屈服应力24 MPa,在与地面接触的瞬时,可以看出临地一侧受力明显增大,尤其是酒桶上身95 mm处,因此处由酒桶瓶身过渡为酒桶瓶颈,空出空间较大,所以出现最大值,故应在瓶身处加入适量的缓冲衬垫,尽量避免出现此种情况。

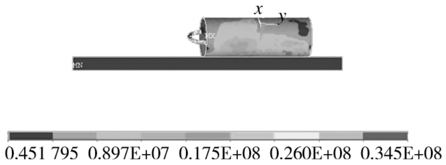

图4　模型2 m跌落水平应力云图

Fig.4 Horizontal stress nephogram of the model in 2 m drop

3.3　模型优化设计

酒桶在2 m无衬垫跌落仿真分析时,水平跌落方向受力最大,若产品水平方向受到最大冲击力仍在极限应力范围内,则产品的其他方向受到的最大冲击力也符合产品的防护要求。2 m跌落应力云图见图5。

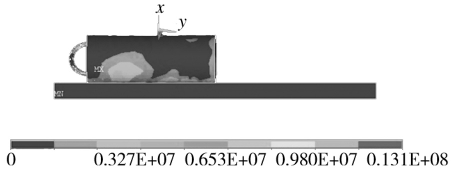

图5　酒桶2 m水平跌落云图

Fig.5 Horizontal stress nephogram of the barrel in 2 m drop

由图5可知,与2 m水平跌落无缓冲衬垫的模型相比较,产品在缓冲衬垫的保护下,水平方向跌落碰撞产生的应力经缓冲后减少,与地面接触的瞬间达到了最大应力11.5 MPa,小于极限应力24 MPa,酒桶上部临地一侧受力明显增大,但仍在产品的极限应力范围内,符合防护要求。

为防止在搬运和堆码过程中酒桶不慎出现跌落造成产品损伤的情况,因此需在酒桶底部和侧面增加适当的缓冲衬垫以达到防护要求。

4　结语

1)通过在2 m高度水平跌落的仿真,可以得到该转轮式包装结构的冲击瞬间时等效应力最大值为11.5 MPa,小于极限应力24 MPa,G值为16.31,在产品容许脆值范围内。

2）通过对仿真结果进行分析可知，该转轮式包装结构能够有效地对内装酒瓶进行防护，且在底部和瓶身部位加装缓冲衬垫，可有效提高其在 2 m 高度上跌落时的抗冲击性能。

参考文献：

[1] GAO De, XI De-chang. Dynamic Modeling of the Corrugated Board and Parameter Identification[C]//11th IAPRI World Conference on Packaging, 1999:105-108.

[2] 高德，王振林，陈乃力. B 楞双层瓦楞纸板衬垫平压缓冲动态性能建模[J]. 振动工程学报，2001，14(2)：52-58.
GAO De, WANG Zhen-lin, CHEN Nai-li. B Flute Corrugated Liner Platen Double Buffering of Dynamic Performance Modeling[J]. Journal of Vibration Engineering, 2001, 14(2):52-58.

[3] 高德，胡洪志，奚德昌. 瓦楞纸板的动态压缩性能建模及应用[J]. 非线性动力学学报，1998，5(增刊)：202-208.
GAO De, HU Hong-zhi, XI De-chang. Corrugated Board Dynamic Compression Performance Modeling and Application[J]. Journal of Nonlinear Dynamics, 1998, 5(s):202-208.

[4] 奚德昌. 包装动力学中的若干问题[J]. 包装工程，1999，20(3)：52-58.
XI De-chang. Some Issues of Packaging Dynamics[J]. Packaging Engineering, 1999, 20(3):52-58.

[5] 孙诚. 包装结构设计[M]. 北京：中国轻工业出版社，2012：1-3.
SUN Cheng. Packaging Design[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2012:1-3.

[6] 汤伯森，向红. 包装动力学[M]. 长沙：湖南大学出版社，2001：141-282.
TANG Bo-sen, XIANG Hong. Packaging Dynamics[M]. Changsha: Hunan University Press, 2001:141-282.

[7] 何涛，杨竞，金鑫. ANSYS10.0/LS-DYNA 非线性有限元分析实例指导教程[M]. 北京：机械工业出版社，2007：5-7.
HE Tao, YANG Jing, JIN Xin. ANSYS10.0 /LS-DYNA Nonlinear Finite Element Analysis Instances Tutorial[M]. Beijing: China Machine Press, 2007:5-7.

[8] 叶勇，郝艳华，张昌汉. 基于 ANSYS 的结构可靠性分析[J]. 机械工程与自动化，2004(6)：63-65.
YE Yong, HAO Yan-hua, ZHANG Chang-han. The Structural Reliability Analysis Based on ANSYS[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2004(6):63-65.

(上接第 41 页)

参考文献：

[1] 金宗哲. 无机抗菌材料及应用[M]. 北京：化学工业出版社，2004.
JIN Zong-zhe. Inorganic Antibacterial Materials and Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.

[2] 魏华，许文才，李东立. 抗菌技术及其在包装行业中的应用[J]. 包装工程，2008，29(10)：131-133.
WEI Hua, XU Wen-cai, LI Dong-li. Anti-bacteria Technology and Its Application in Packaging Industry[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(10):131-133.

[3] 张文钲，张羽填. 载银抗菌材料的研究与开发[J]. 化工新型材料，1997(6)：20-22.
ZHANG Wen-zheng, ZHANG Yu-tian. Research and Development of Antibacterial Material for Sliver-loaded[J]. New Chemical Materials, 1997(6):20-22.

[4] 张冬梅，王承智，黄相国. 天然沸石及其应用进展研究[J]. 环境保护科学，2008，34(1)：30-33.
ZHANG Dong-mei, WANG Cheng-zhi, HUANG Xiang-guo. Study on Natural Zeolite and Its Applied Progress[J]. Environmental Protection Science, 2008, 34(1):30-33.

[5] LI Z J, FLYTZANI M. Stephanopoulos. Selective Catalytic Reduction of Nitric Oxide by Methane over Cerium and Silver Ion-exchanged ZSM25 Zeolite[J]. App Catalysisa A: General, 1997, 165:15-34.

[6] 严建华，封孝信，郝挺宇，等. 银离子法制备载交换银天然斜发沸石及产品抗菌性能研究[J]. 非金属矿，2001，24(5)：19-21.
YAN Jian-hua, FENG Xiao-xin, HAO Ting-yu, et al. Ion-exchanging Prepare Silver-loaded Zolite Antibacterial Agent and Its Antibacterial Performance[J]. Non-Metallic Mines, 2001, 24(5):19-21.

[7] 张毅，汪明礼. 聚乙烯醇及其应用[J]. 黄山学院学报，2004，6(3)：71-74.
ZHANG Yi, WANG Ming-li. Polyvinyl Alcohol and Its Application[J]. Joumal of Huangshan University, 2004, 6(3):71-74.

[8] WANG Hong-shui, QIAO Xue-liang, WANG Xiao-jian, et al. Influence of High Temperature on Antibacterial Property of Sliver Loaded Zeolite[J]. Journal of Chinese Ceramic Society, 2006, 34(2):171-174.