

基于 Lsdyna971 显式算法的饮料包装设计评价方法

郑玉卿¹, 别俊²

(1. 湖州师范学院, 湖州 313000; 2. 三环集团公司, 武汉 430074)

摘要: **目的** 研究饮料包装的仿真设计评价方法。 **方法** 以酷儿饮料包装为研究对象, 基于 Pro/E 5.0 和 Hypermesh 10.0 软件建立 3D 模型和有限元动力学仿真模型, 然后调用 Lsdyna971 显示算法程序执行顶部静压和侧面挤压等多工况动力学仿真计算, 同时进行相应的实物试验验证。 **结果** 数值仿真结果与试验结果的对比分析得出两者的结果偏差不超过 15%, 能够满足工程学上的设计要求。 **结论** 基于 Lsdyna971 显式算法的虚拟设计评价方法完全适用于饮料包装设计研发, 且可大幅缩减实物试验费用和新饮料包装设计周期。

关键词: 饮料包装; 显式算法; 数值仿真; 实物试验

中图分类号: TB485.9; TP319

文献标识码: A

文章编号: 1001-3563(2014)05-0031-04

Evaluation Method of Beverage Packaging Design Based on the Lsdyna971 Explicit Algorithm

ZHENG Yu-qing¹, BIE Jun²

(1. Huzhou Normal College, Huzhou, Zhejiang 313000, China; 2. Tri-Ring Group Corporation, Wuhan 430074, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the simulation design evaluation method for the beverage packaging. **Methods** The Qoo beverage packaging was selected as the research object, and the 3D and finite element dynamic simulation models were built with softwares Pro/E 5.0 and Hypermesh 10.0, respectively. Then dynamic simulation & calculations with the multiple cases, such as top loading and side extruding were executed via the Lsdyna971 explicit algorithm, and corresponding physical tests were conducted to verify the virtual simulation results. **Results** All result deviation rates were below 15%, which met the design requirement from standpoint of engineering through the comparison of the numerical simulation results with those of lab tests; deviation rate < 15%. **Conclusion** The virtual design evaluation method based on the Lsdyna971 explicit algorithm can be well applied to the development of beverage packaging design. It can also dramatically reduce the physical test cost and the design cycle of new beverage packaging.

KEY WORDS: beverage packaging; explicit algorithm; numerical simulation; physical experiment

近年来,虚拟仿真分析技术无论在计算精度还是软硬件的运算效率方面都有了长足的进步。譬如在 20 世纪 90 年代,对一个结构简单的模型进行动力学分析至少需要花费一天时间,然而现在更加复杂的结构模型只需要几小时就能完成。美国和欧洲的工程师 20 世纪 90 年代开发了众多专业有限元软件,例如

Marc, Ansys, Lsdyna, Abaqus 等,均能满足新产品虚拟设计数值仿真分析的要求,但限于当时国内网络不畅通、工程经验较少和操作界面复杂,一直未被国内企业研发部门广泛采用。如今伴随着 CAD/CAE 计算机软硬件的快速发展,软件操作界面更加友好,建立基于有限元显式算法的虚拟包装设计评价方法来缩

短产品上市时间是完全可行的,而且它能合理地反映饮料新包装的结构力学性能是否满足设计要求,在新产品开发设计阶段可大大降低试验成本,实现快速最优设计^[1]。

显式算法的最大优点是具有较好的稳定性,它采用动力学方程的中心差分公式,不直接求解切线刚度,不需要进行平衡迭代,也不存在收敛控制问题,计算速度快,需要的内存也比隐式算法少,且数值计算过程可以很容易地进行并行计算,程序编制也相对简单。文中利用 Lsdyna971 显式算法,着重对一款在售的酷儿饮料包装设计进行结构仿真评价,通过等条件下的实物试验测试来验证该饮料包装虚拟设计评价方法的可行性和合理性。

1 建立仿真模型

酷儿饮料瓶身采用热罐装 PET(聚对苯二甲酸乙二酯)材料经吹塑成形^[2-4],其标称容量为 470 mL,质量为 26 g,高度为 207 mm,瓶身最大外径为 68 mm,见图 1。首先在 Pro/E 5.0 中创建 3D 实体模型^[5-8],然后以 stp 格式导入 Hypermesh 10.0 进行网格划分。瓶身采用壳体 Shell63,材料模型选用弹塑性本构模型 Mat3,弹性模量为 1500 MPa,泊松比为 0.422^[9],密度为 $0.87 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$,且不同位置的厚度根据测绘瓶身实际尺寸所得的数值分别赋予。瓶体内部空腔采用 Tetramesh 自由网格划分为实体单元填充,采用流固耦合 ALE 算法^[5]。饮料的粘性系数设为 $1.1 \times 10^{-8} (\text{N} \cdot \text{s})/\text{mm}^2$,波速为 $1.45 \times 10^6 \text{ mm/s}$,密度为 $1.01 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ 。顶部和底部压板均采用 Shell63 单元,厚度设为 3 mm,材料模型均设定刚性材料 Mat20。瓶身材料 PET 非线性应力-应变曲线由单向轴向拉伸试验测试获得,其屈服应力为 81.412 MPa^[10-12]。



图 1 酷儿饮料瓶

Fig. 1 Qoo beverage bottle

有限元模型边界条件:固定下压板,上压板根据实际载荷加载。上下压板分别与瓶身上下表面接触,均建立自动单面接触类型,整个模型设置了重力加速度,压板下压速度根据实际情况而定,设置求解控制卡片。有限元仿真模型完全建立后直接调用 Ansys/Lsdyna 971 进行求解计算,其中模型中单元划分总数为 26 582 个,节点数为 37 216 个^[13]。

2 仿真计算和实物试验

根据公司对饮料包装的工程设计要求,文中按照不同的设计边界条件进行了 3 种工况的仿真计算,其中包括满瓶顶部静压、空瓶顶部静压和满瓶侧面加载分析。

2.1 满瓶静压分析

满瓶静压仿真分析是将瓶子底部固定,瓶内空腔充满饮料至标称容量,然后将压板垂直于瓶子顶部,将瓶子头部匀速往下压,下压距离为 6.35 mm,观察瓶身的变形过程和最大变形位置,最后测量瓶身变形量。将仿真计算等效变形图(图 2a)与静压试验实际变形图(图 2b)进行对照可以看出,两者均在同一处即瓶子中间最大外径处出现了最大屈曲变形,且变形趋势和变形方位完全吻合^[14]。

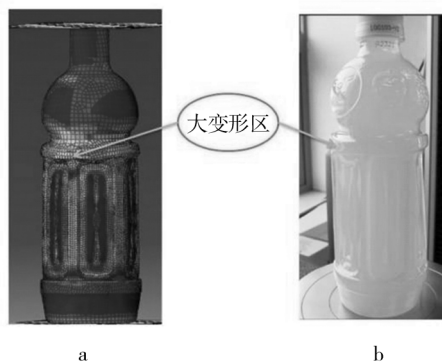


图 2 满瓶静压仿真和试验后变形量对照

Fig. 2 Comparison of deformations for filled bottle via simulation & test

顶部载荷力变化曲线见图 3,可以看出,满瓶静压仿真计算过程中,瓶子顶部载荷力为 233 N,而静载试验过程中的最大载荷力为 212 N,两者偏差率为 9.9%,这属于可接受的工程设计误差容许范围,且顶部载荷力变化趋势完全一致。

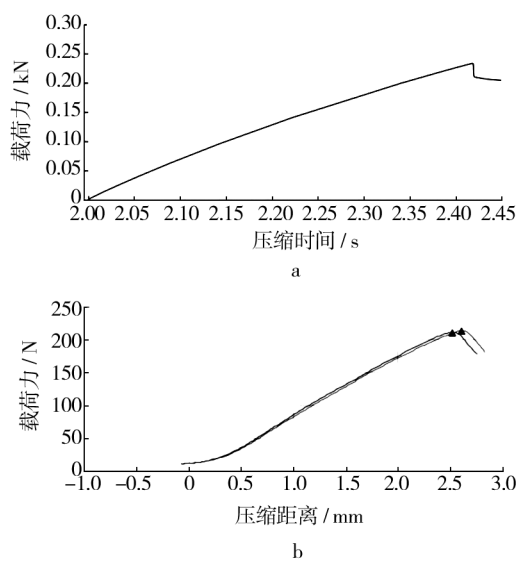


图 3 满瓶静压过程中顶部载荷力变化对照
Fig. 3 Comparison of top loading force for empty bottle during static loading

2.2 空瓶静压分析

空瓶静压的原理和压缩距离见 2.1 节,但此时饮料瓶中无任何填充物,所以仿真模型中删除了瓶内的四面体实体网格。比较空瓶静压仿真和静压试验变形后的瓶子形状见图 4,瓶子的两处大变形区均发生在同样位置,且发生的时间节点也几乎相同,瓶子变形幅度和变形趋势完全一致。从顶部载荷力变化曲线中可以看出,空瓶静压仿真计算过程中,瓶子顶部载荷力为 138 N,而静压试验过程中的最大载荷力为 162 N,两者偏差率为 14.8%,该偏差稍稍偏大,见图 5。这主要源于为了节省 CPU 求解时间,将空瓶静压仿真过程中压板的压缩过程按照准静态仿真算法进

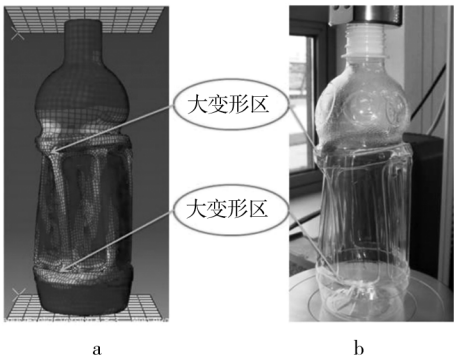


图 4 空瓶静压后变形量对照
Fig. 4 Comparison of deformations for empty bottle during static loading

行,未考虑压缩过程中 PET 材料本身仿在不同塑性变化率下的强化效应,所以与真实静压试验过程相比,真过程中的 PET 材料显示抵抗变形能力稍有减弱。由于空瓶静压仿真和试验的变形结果趋势完全一致,故仿真计算结果仍然是可信的。

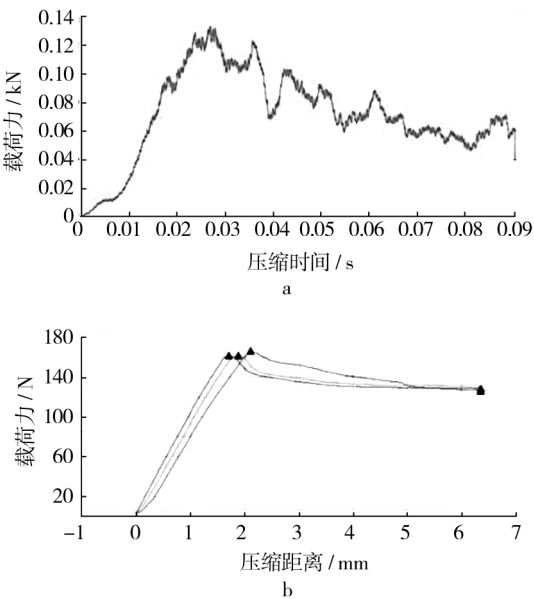


图 5 空瓶静压过程中顶部载荷力变化曲线
Fig. 5 Curves of top load for empty bottle during static loading

2.3 满瓶侧面挤压分析

当瓶子中填充饮料至标定容量后,将瓶子横向放置,在瓶子正上方施加一个竖直向下的作用力,作用力大小相当于 6 kg 重物(工程设计要求)。满瓶侧面挤压仿真后的等效变形见图 6,模型中固定下压板和左压板,在上压板节点上均匀施加作用力,压板与瓶身之间 3 个接触面类型均采用自动单面接触设置。仿真结束后提取瓶子侧面节点的最大位移值为 3.59 mm,而 3 次试验测试均值为 3.64 mm。从表面上看两者结果非常接近,但文中 3 次试验测试值的离散度较大,最大为 3.93 mm,最小为 3.26 mm,这很可

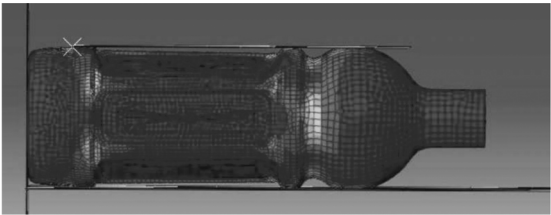


图 6 满瓶侧面挤压后等效变形
Fig. 6 Equivalent deformation for filled bottle after side extruding

能因摆放位置、饮料瓶身厚度差异和试验测量点不同所致^[15]。

3 结语

上述数值仿真计算和实物试验结果表明,基于有限单元法显式算法的虚拟包装设计评价方法是可靠和合理的,它完全适用于饮料包装结构力学性能的精确评估和结构优化,可大幅度缩短产品从研发到上市的时间,同时可减少以往昂贵的设计—开模具—试验—错误—再设计的恶性循环次数。

未来需要深入研究的工作有:试验研究 PET 材料在不同拉伸速度下的变形模式,动力学分析过程需充分考虑材料在不同应变率下的强化效应;逐步将有限元显式算法引入到其他液体饮料包装结构设计评估,如玻璃瓶和易拉罐等新产品的开发。

参考文献:

- [1] 王勖成,邵敏.有限单元法基本原理与数值方法[M].北京:清华大学出版社,1988.
WANG Mao-cheng, SHAO Min. Finite Element Principle and Numerical Method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988.
- [2] 郑仁德. PET 瓶在热灌装饮料中的应用[J]. 包装工程, 2007, 28(3): 51—54.
ZHENG Ren-de. Application of PET Bottles in Hot-filled Drinks[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(3): 51—54.
- [3] 扈静晗. PET 瓶在碳酸饮料中的应用[J]. 饮料工业, 2006, 9(9): 29—32.
HU Jing-han. Application of PET Bottle in Carbonated Drinks[J]. Beverage Industry, 2006, 9(9): 29—32.
- [4] 陈俊,刘正英,黄锐,等. PET 改性研究进展[J]. 中国塑料, 2003, 17(6): 20—25.
CHEN Jun, LIU Zheng-ying, HUANG Rui, et al. Advances in Studies of Modification of PET[J]. China Plastics, 2003, 17(6): 20—25.
- [5] 王训杰. 基于 Pro/E 行为建模技术的定容积液体瓶设计[J]. 包装工程, 2010, 31(3): 89—91.
WANG Xun-jie. Fixed Volume Liquid Bottle Design Based on Pro/E Behavioral Modeling[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(3): 89—91.
- [6] 刘斌,白晶,吴雪. Pro/E 行为建模技术在包装容器设计中的应用[J]. 包装工程, 2009, 30(4): 71—75.
LIU Bin, BAI Qiao, WU Xue. Application of Pro/E Behavioral in Packaging Containers Design[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(4): 71—75.
- [7] 王峥,史智斌. Pro/Engineer 在刚性塑料包装容器设计中的应用[J]. 包装工程, 2010, 31(23): 73—76.
WANG Zheng, SHI Zhi-bin. Application of Pro/Engineer in Design of Rigid Plastic Package Container[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(23): 73—76.
- [8] 郭太松. PET 饮料瓶轻量化设计研究及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
GUO Tai-song. Research and Application on PET Beverage Bottle Lightweight Design[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [9] 李炎辉,胡青春. PET 瓶基于 ABAQUS 的轴压分析[J]. 包装工程, 2009, 30(10): 18—20.
LI Yan-hui, HU Qing-chun. Analysis of Axial Pressure of PET Bottle Based on ABAQUS[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(10): 18—20.
- [10] 袁玮,许文才. PET 啤酒瓶有限元分析及其结构参数的确定[J]. 包装工程, 2010, 31(12): 24—26.
YUAN Wei, XU Wen-cai. Finite Element Analysis of PET Beer Bottle and Determination of Structural Parameters[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(12): 24—26.
- [11] 李强,刘淑莲,应光耀,等. 考虑流固耦合作用的 PET 瓶跌落碰撞数值仿真[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(6): 980—986.
LI Qiang, LIU Shu-lian, YING Guang-yao, et al. Numerical Simulation for Drop Impact of PET Bottle Considering Fluid-structure Interaction[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(6): 980—986.
- [12] 陈亚惠,卢立新. 凹槽结构对 PET 瓶轴向承载性能的影响[J]. 包装工程, 2012, 33(23): 65—67.
CHEN Ya-hui, LU Li-xin. Influence of Groove Structure on Axial Load Performance of PET Bottle[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(23): 65—67.
- [13] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword User's Manual Volume I (Version 971) [M]. California: LSTC, 2007.
- [14] 张媛,刘玉德,刘斌. 基于 FEM 的聚酯碳酸饮料包装瓶强度和结构分析[J]. 包装工程, 2010, 31(1): 42—44.
ZHANG Yuan, LIU Yu-de, LIU Bin. FEM Analysis of Strength and Structure of PET Aerated Water Bottle[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(1): 42—44.
- [15] KARALEKAS D, RAPTI D, PAKALIA TAKIS G. Numerical and Experimental Investigation of the Deformational Behaviour of Plastic Containers[J]. Packaging Technology and Science, 2001, 14(5): 185—191.