

正交试验法优化矿泉水瓶瓶体凹槽结构的形状

宋卫生, 卢芳芳

(河南牧业经济学院, 郑州 450046)

摘要: **目的** 研究矿泉水瓶体凹槽结构形状的优化设计。**方法** 在有限元显式分析软件 LS-DYNA 中, 通过不同厚度分布的实常数, 建立厚度可连续变化的瓶体壳模型。针对影响瓶体垂直载压能力的凹槽形状参数, 包括凹槽内高度、深度以及拔模角度, 设计正交试验。在正交试验的基础上, 利用单因素试验优化外部拐角处的倒角半径。**结果** 通过正交试验的极差分析, 确定凹槽内高度 2 mm, 槽深度 1 mm, 拔模角度 2° 为最优方案。在单因素试验的基础上, 综合美学和生产方面的考虑, 确定倒角半径 1 mm 为最优方案。**结论** 以矿泉水瓶体垂直载压能力所受影响最小为目标, 得到了凹槽形状参数的最优组合方案, 并为其他参数的优化提供了一种方法。

关键词: 凹槽结构; 矿泉水瓶; 形状参数; 正交试验; 有限元

中图分类号: TB487; TS206.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)19-0137-05

Optimization of the Shape of the Groove Structure on the Mineral Water Bottle With Orthogonal Test Method

SONG Wei-sheng, LU Fang-fang

(Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450046, China)

ABSTRACT: The work aims to study the optimized design of the groove structure on the mineral water bottle. The bottle shell model of which the thickness continuously varied was established through the real constant with different thickness distribution by use of explicit dynamic software LS-DYNA. A orthogonal test was designed according to the shape parameters of the groove which influenced the top load capacity, including the internal height, depth and draft angle of the groove. The outside fillet radius was optimized using single-factor test based on the result of orthogonal test. The parameter combination of internal height of 2 mm, depth of 1 mm, draft angle of 20 was the optimal solution, which was got by the range analysis of orthogonal test. Fillet radius of 1 mm was the optimal solution which was got by single-factor test as well as considering the factors such as aesthetics and producing. In conclusion, the optimal shape parameters combination for the groove is obtained according to the lowest influences to the top load capacity of the mineral water bottle. It offers a way to optimize other parameters.

KEY WORDS: groove structure; mineral water bottle; shape parameter; orthogonal test; finite element

垂直载压能力是矿泉水瓶设计和生产中一项重要的评价指标, 在 QB 2357—1998 聚酯(PET)无汽饮料瓶中明确规定, 无汽饮料瓶的垂直载压能力要大于等于 100 N^[1]。为了提高瓶子的抓握性能和瓶体周

向的抗挤压能力, 往往在瓶体上设计一些凹槽结构, 但这种结构会降低瓶体的垂直载压能力^[2]。陈亚慧、卢立新基于屈曲原则分析了凹槽结构对饮料瓶轴压性能的影响, 研究证实了凹槽结构确实会明显降低

收稿日期: 2016-03-25

作者简介: 宋卫生(1980—), 男, 河南西华人, 硕士, 河南牧业经济学院副教授, 主要研究方向为包装工程与仿真分析。

瓶体的垂直载压能力^[3]。郑玉卿采用有限元显示分析的方法模拟分析了饮料瓶顶部静压和侧部挤压,并通过实际实验进行对比分析,验证了有限元显示分析在评价饮料瓶力学性能方面的可行性^[4]。笔者在《凹槽结构对饮料瓶力学性能的影响》一文中也通过有限元显示分析的方法研究了凹槽结构对瓶体垂直载压能力和周向抗挤压能力的影响^[5]。以上研究均未涉及对凹槽结构的优化设计,这里通过正交试验法和有限元显示分析的方法对 500 mL 常规形状矿泉水瓶瓶体凹槽结构的形状进行了优化。

1 有限元建模

由于在试验过程中,需要使用多种不同参数的试样,所以文中仍采用试样和压力施加装置分开建模的方法进行建模。

1.1 厚度连续变化的试样壳模型建模

文中使用的试样为壳模型,采用自下而上的方式建模,单元类型为 shell 163。由于瓶子在成型后各部位的厚度是不一致的,所以在相关研究中,采取的基本方式是首先设置不同厚度的实常数,然后在划分网格时,利用相应的实常数给予不同部位不同的厚度值^[6]。以往的研究中没有考虑瓶颈、瓶底等部位厚度的连续过渡变化,因此模拟效果往往和现实存在差异。

文中采取以下措施:在设置实常数时不是设置均匀厚度的实常数,而是根据实际厚度变化情况在实常数不同节点厚度值输入框中设置相应的厚度;在建模过程中,根据实际厚度分布与实常数厚度值的设置,对壳模型相关部位进行分割,见图 1;按预先计划在不同部位选用不同的实常数对瓶体相应部位进行网格划分,这样就能得到厚度连续变化的壳模型^[7],见图 2。

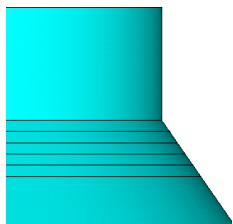


图 1 厚度连续变化的有限元模型
Fig.1 Splitted shell model

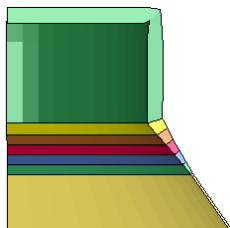


图 2 被分割的壳模型
Fig.2 Finite element model with continuously varying thickness

瓶体用 PET 材料的属性设置如下:密度为 0.85 g/m^3 ,泊松比为 0.44,弹性模量为 4 GPa,屈服应力为 0.2 GPa,切线模量为 $50 \text{ MPa}^{[8-11]}$ 。文中所用瓶体模型的瓶身半径为 35 mm,高度为 210 mm,瓶口高度为 10 mm,瓶口半径为 14 mm。由于这里着重研究凹槽形状的优化,为了排除凹槽分布位置及数量的干扰,试样模型中只在瓶体单独设置 1 个凹槽,由于距瓶底 130 mm 处是饮用时人手常握的部位,所以选择在距瓶底 130 mm 处设置凹槽,见图 3。每个试样建好模型后,写出 cdb 格式的有限元模型文件以备用。

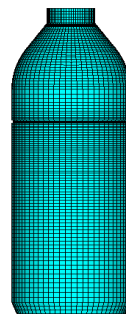


图 3 瓶体有限元模型
Fig.3 Finite element model of the bottle

1.2 施压装置的建模

文中的施压装置采用刚性材料模型,上部施压板和下部支撑板均为截面是边长 100 mm 的正方形,厚度均为 10 mm 的方板,中间的间距为瓶子的高度。约束底部支撑板的所有位移和旋转的自由度,而上部施压板也只保留轴向的位移自由度,并赋予上压板 0.1 m/min 向下压缩的速度^[12-13]。设置求解控制条件,以节省每次试验的参数设置时间,提高工作效率。写出 cdb 格式的有限元模型文件以备用^[14]。

在模拟分析中,瓶底放置在试验台下侧支撑板上,而瓶口放置在上侧施压板下侧,设置输出瓶口处的支反力,就可以得到瓶口处所受载荷随时间变化的曲线,由于上侧施压板是匀速下压,将时间乘以速度,就能将时间转换为位移,即可得到在施压过程中的载荷位移曲线。根据 QB 2357—1998 聚酯(PET)无汽饮料瓶的规定,取载荷位移曲线中第 1 次最大载荷作为瓶体的瓶体垂直载压能力。

2 正交试验设计

对于瓶体部位的单个凹槽结构来讲,其变化的因素主要包括凹槽的内高度、深度、拔模角度以及

外部拐角处倒角的圆弧半径^[15]，见图 4。由于相同半径的倒角在不同拔模角度的凹槽中存在较大差异，所以在正交试验中只考虑凹槽的内高度、深度、拔模角度 3 个因素及其之间的交互作用。以最高垂直载压能力为目标确定最优的方案后，再通过单因素试验确定该方案所对应的最优倒角半径。

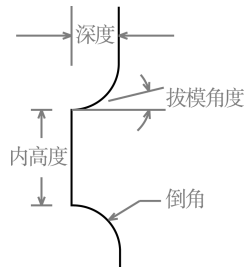


图 4 凹槽结构的变化因素
Fig.4 Changing factors of groove structure

基于以上分析，在文中采用 3 因素 2 水平正交试验设计，选用正交表来安排试验，研究各因素及交互作用对瓶体垂直载压能力的影响。凹槽内高度(A)的水平选择 2 和 4 mm；凹槽内深度(B)的水平选择 1 和 2 mm；根据实际工程需要，最低的拔模角度不能为 0，考虑凹槽深度值较小，选用 2°作为最

小拔模角度。将拔模角度分别设为 0°，30°，45°，60°，并进行单因素实验，研究发现 2°与 45°相对 30°和 60°是较优的。在正交试验中，凹槽外侧的拔模角度(C)水平分别选择 2°与 45°。

3 结果与分析

试验方案、结果及极差分析见表 1，可见 B 是影响力最大的因素，其次分别为 A，C，BC，AC，AB。从表 1 可以看出，B₁A₁C₁ 就是优方案，但从因素主次可以看出交互作用 BC 对垂直载压能力的影响也较大。要确定 B 和 C 的优水平，还要根据因素 B 和 C 各水平搭配好坏来确定。对因素 B 和 C 的 2 个水平进行排列组合，分别为 B₁C₁，B₁C₂，B₂C₁，B₂C₂。在表 1 中选择符合某项组合的 2 个试验值，对其求算术平均值。B₁C₁ 对应的平均值为 279.01 N，B₁C₂ 对应的平均值为 271.325 N，B₂C₂ 对应的平均值为 232.82 N，B₂C₁ 对应的平均值为 193.175 N。以上 4 个值中仍是 B₁C₁ 所对应的值最大，因此优方案仍是 B₁A₁C₁。

表 1 试验方案、结果及极差分析
Tab.1 Test scheme, results and range analysis

试验号	凹槽内高度 (A)	凹槽内深度 (B)	拔模角度 (C)	AC	BC	AB	瓶体垂直载 压能力/N
1	1	1	1	1	1	1	286.52
2	1	1	2	2	2	1	287.66
3	1	2	1	1	2	2	268.9
4	1	2	2	2	1	2	189.04
5	2	1	1	2	1	2	271.5
6	2	1	2	1	2	2	254.99
7	2	2	1	2	2	1	196.74
8	2	2	2	1	1	1	197.31
k ₁	1032.12	1100.67	1023.66	1007.72	927.86	968.23	
k ₂	920.54	851.99	929	944.94	1008.29	984.43	
极差 R	111.58	248.68	94.66	62.78	80.43	16.2	

从表 1 可以看出优方案正好是 1 号试验，但从试验结果可以看出，2 号试验的结果比 1 号试验结果还要略高，但不明显。这说明正交试验极差分析的结果仅为较优方案而已。

1 号试验和 2 号试验中所得到的载荷位移曲线见图 5。从图 5 可以看出，1 号试验在 0.0165 min 时瓶口处的支反力，也就是上侧压板下压的载荷达到了最大值；而 2 号试验在 0.0127 min 时上侧压板下压的载荷达到了最大值；1 号结构和 2 号结构在受最大顶压载荷时的等效应力分布云图见图 6，可

以看出在垂压过程中，最大的等效应力均集中在凹槽部位，也就是说凹槽在垂压过程中是薄弱环节，凹槽的设计对瓶体垂压是有负面影响的。

从图 5 曲线的对比可以看出，1 号试验相对 2 号试验在达到最高载荷时所发生的变形要大一些，也就是说 1 号结构比 2 号结构能够承受更大的变形量。1 号试验对应的结构应该是优于 2 号试验所对应的结构。通过正交试验的极差分析可以确定凹槽内高度 2 mm，槽深度 1 mm，拔模角度 2°时为最优方案。

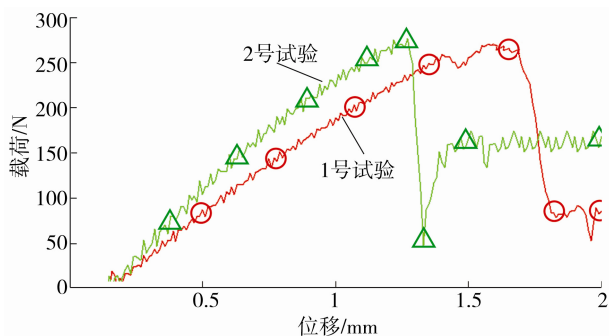


图 5 1 号试验和 2 号试验的载荷位移曲线
Fig.5 Load-displacement curves of test 1 and test 2

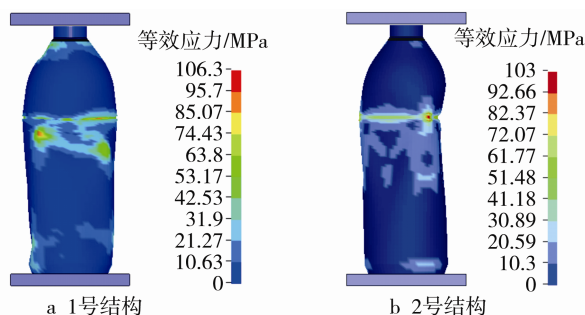


图 6 1 号结构和 2 号结构在受最大顶压载荷时的等效应力分布

Fig.6 Equivalent stress distribution of structure 1 and structure 2 under maximum load

在确定凹槽内高度、槽深度、拔模角度的最优方案后,需要进一步通过单因素试验的方式确定凹槽外部拐角处的倒角半径的最优值。在单因素试验中,这里选取了 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 mm 这 5 个值作为倒角半径进行模拟分析,这种方案得到的载荷峰值的变化趋势见图 7。从变化趋势可以看出,整个走势呈 V 形结构,也就是说倒角半径最大和最小时的垂直载压能力都会增加,而处于中部水平时垂直载压能力最弱。从美学角度和生产角度来说,圆弧半径大一些是较好的选择,因此 1.0 mm 的圆弧半径对于上文所述形状与规格尺寸的矿泉水瓶体的凹槽结构来讲,是较优的选择。

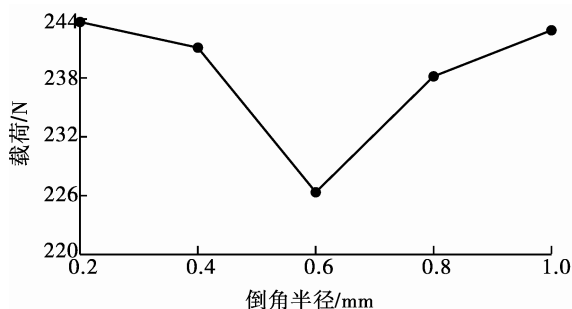


图 7 不同倒角半径瓶子的载荷峰值变化趋势

Fig.7 The changing trend of peak load for bottles having different fillet radius

4 结语

凹槽结构的基本形状对瓶体的垂直载压能力有明显的影 响,影响因素包括槽的内高度、深度、拔模角度以及外部拐角的倒角半径。通过正交试验可以看出在这些因素中拔模角度的影响是最明显的,其次是内高度,最后是深度。由于外部拐角的倒角半径的影响是通过单因素试验得到,所以其影响程度无法与其余 3 个因素比较。通过极差分析确定凹槽内高度 2 mm,槽深度 1 mm,拔模角度 2° 为最优方案。在此基础上通过单因素试验及在美学角度和生产角度方面的综合分析得出外部拐角的圆弧半径最佳值为 1.0 mm。文中只是在凹槽形状方面进行了优化,今后会进一步研究凹槽位置及分布等方面的优化。

参考文献:

- [1] QB 2357—1998, 聚酯(PET)无汽饮料瓶[S]. QB 2357—1998, Polyester (PET) Free Beverage Bottle [S].
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 郑玉卿, 别俊. 基于 Lsdyna971 显式算法的饮料包装设计评价方法[J]. 包装工程, 2014, 35(5): 31—34.
ZHENG Yu-qing, BIE Jun. Evaluation Method of Beverage Packaging Design Based on the Lsdyna971 Explicit Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(5): 31—34.
- [5] 宋卫生. 凹槽结构对矿泉水瓶力学性能的影响[J]. 包装工程, 2016, 37(5): 68—72.
SONG Wei-sheng. Effect of Groove Structure on Mechanical Properties of Mineral Water Bottle[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(5): 68—72.
- [6] KARAC A, IVANKOVIC A. Modeling the Drop Impact Behavior of Fluid-filled Polyethylene Containers[J]. European Structural Integrity Society, 2003, 32(2): 253—264.
- [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] KARALEKAS D, KAKOUDAKIS J. Predictive Mechanical Performance Evaluation of Consumer Food Cans Using Stereo lithography Models[J]. Packaging Technology and Science, 2003(6): 37—45.
- [9] 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.
- [10] KARALEKAS D, RAPTIS D, PAPAIOANNOU G. Numerical and Experimental Investigation of the Deformational Behavior of Plastic Containers[J]. Packaging Technology and Science, 2001, 14(5): 185—191.
- [11] 刘斌, 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): 52—54.
LIU Bin, WU Xue. Application of Pro/E Behavioral in Packaging Containers Design[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(4): 52—54.
- [12] REED P E, BREEDVELD G, LIM B C. Simulation of the Drop Impact Test for Molded Thermoplastic Containers[J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24(2): 133—153.
- [13] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword User's Manual Volume1 (Version 971)[M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- [14] 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.
- [15] 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.