

## 碳酸饮料瓶爪瓣式瓶底结构力学性能研究

宋卫生, 李菲, 李自刚  
(河南牧业经济学院, 郑州 450046)

**摘要:** **目的** 研究碳酸饮料瓶爪瓣瓶底几何形状参数对瓶底应力开裂现象的影响规律。**方法** 通过加速应力开裂测试观察瓶底的应力开裂现象; 通过单因素试验分别分析凹槽底部圆弧直径、凹槽侧壁张角、凹槽深度以及爪瓣数量对最大主应力最大值的影响规律; 通过全因素实验研究对比 4 个几何参数对最大主应力最大值影响的显著性。**结果** 通过单因素试验, 发现随着凹槽侧壁张角、凹槽底部圆弧直径以及爪瓣数量的增大, 最大主应力的最大值均呈现下降的态势, 而表示凹槽深度 4 个数据的分析结果则呈现虽深度增加但最大主应力的最大值均增加的态势。全因素实验证实这 4 个参数中只有槽底圆弧直径、凹槽数量以及凹槽深度对瓶底最大主应力的最大值有显著的影响。另外, 凹槽深度、凹槽数量分别与槽底圆弧直径的交互效应呈现出显著影响。最后拟合了瓶底最大主应力的最大值与影响显著的几何参数之间的回归方程。**结论** 在厚度均匀的前提下研究了了几何结构的相关参数对应力开裂的影响及规律, 厚度变化及厚度分布的变化对应力开裂的影响还需进一步研究。

**关键词:** 爪瓣式瓶底; 应力开裂; 几何参数; 最大主应力

**中图分类号:** TB487; TB489 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)01-0035-05

## Mechanical Properties of the Petaloid Bottom Structure of Carbonated Beverage Bottle

SONG Wei-sheng, LI Fei, LI Zi-gang  
(Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450046, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the influence of geometry parameters of carbonated beverage bottle's petaloid bottom on the bottle bottom's stress cracking. The stress cracking at the bottom of the bottle was observed by accelerated stress cracking test. The influences of the arc diameter at the bottom of groove, the side wall opening angle of the groove, the groove depth and the petaloid number on the maximum value of the maximum principal stress were respectively analyzed through single factor experiment. The significance of the effects of 4 geometrical parameters on the maximum principal stress was studied by means of all-factor experiment. Through the single factor experiment, we found that the maximum value of the maximum principal stress showed a downward trend with the increase of the side wall opening angle of the groove, arc diameter at the bottom of the groove and the number of the petaloid; however, the analysis results of the 4 data indicating the groove depth showed a upward trend of the maximum value of the maximum principal stress although with the increase of the depth. The results of all-factor experiment showed that only the arc diameter at the bottom of the groove, the number of the grooves and the groove depth had a significant influence on the maximum value of the maximum principal stress of the bottle bottom. In addition, the interaction of the groove depth and the number of grooves respectively with the arc diameter at the bottom of the groove also had significant influence. Finally, the regression equation of the relationship between the maximum value of the maximum principal stress at the bottom of the bottle and the geometric parameters with significant influence was fitted. The influence of relevant geometrical parameters on the stress cracking and its law are studied on the condition of uniform thickness. It is necessary to study the influence of thickness change and thickness distribution on the stress cracking subsequently.

**KEY WORDS:** petaloid bottom; stress cracking; geometrical parameter; maximum principal stress

收稿日期: 2017-06-09

作者简介: 宋卫生 (1980—), 男, 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。

通讯作者: 李自刚 (1970—), 男, 博士, 河南牧业经济学院副教授, 主要研究方向为环境生物工程技术。

爪瓣式瓶底结构形式在碳酸饮料用 PET 瓶中广泛使用<sup>[1]</sup>,用以取代带杯状底座的 PET 瓶,由于其结构形式相对原来瓶底的半球状复杂了很多,所以在外部载荷的作用下,更容易出现应力集中现象<sup>[2]</sup>。爪瓣式结构多用于含气饮料的包装,瓶内存在一定的内压,在一定的条件下,瓶底易出现应力开裂现象,对生产效率和消费者的安全造成了一定的影响<sup>[3]</sup>。

PET 瓶应力开裂问题的研究是国内外学者研究的热点。王备战通过研究提出,影响 PET 瓶爆裂、渗漏的原因主要有材料、瓶坯、吹塑工艺及环境这 4 个方面,此外,如果模具底部设计不合理,也会造成爆裂、渗漏<sup>[4]</sup>。刘圣涛所译外文文献提出了一些影响应力开裂的因素,比如灌装线的润滑剂、瓶底复杂的形状等,但未进行深入探讨,主要分析了瓶坯和瓶的加工工艺对瓶底应力的影响,提出了增大瓶坯质量、瓶底收缩量,减薄瓶底厚度以及对瓶底进行水喷雾快速冷却等方法提高瓶体的耐应力开裂性<sup>[5]</sup>。赵雅等选择同一瓶型不同原料、不同瓶型相同原料的包装容器样品展开耐环境应力开裂测试并对数据进行分析比较,结果表明,瓶型和瓶体的厚度分布以及材料对瓶体的耐应力开裂性均有较大影响<sup>[6]</sup>。林金平通过偏光透射法研究 PET 碳酸饮料瓶结晶分布情况,通过稳态与动态流变法研究 PET 树脂的流变性能,探讨 PET 瓶应力开裂的原因,结果表明,瓶身存在结晶分布不均匀、树脂相对分子质量分布窄、有极高相对分子质量存在等现象,这些因素均易造成应力集中或应力残留,使 PET 碳酸饮料瓶耐应力开裂能力变差<sup>[7]</sup>。高卫霞从高分子物理角度进行开裂机理的分析,探讨关键性的根本因素——原料对应力开裂的影响,分析了特性粘度和瓶子加工过程中特性粘度的下降程度对瓶子抗应力开裂能力的影响,研究表明原料特性粘度越高,瓶子抗应力开裂的能力就越强,而特性粘度的下降程度越大,瓶子抗应力开裂的能力就越差<sup>[8]</sup>。

国内外关于 PET 瓶应力开裂问题的研究大部分从材料、瓶坯、吹塑工艺等方面着手开展。这里则通过有限元模拟分析的方法,从爪瓣式结构参数设计优化方面入手,研究瓶底应力开裂现象,以及爪瓣形结构尺寸参数对其影响的规律。

## 1 实验与仿真

### 1.1 加速应力开裂测试实验

将柠檬酸和碳酸氢钠注入 PET 瓶中生成二氧化碳气体<sup>[9]</sup>。二氧化碳气体含量为 8.45 g/L,然后把含有二氧化碳气体的 PET 瓶瓶底放入体积分数为 0.2%的 NaOH 溶液中以模拟开裂过程<sup>[10]</sup>。当气泡通过底部开裂的缝隙出现时,观察并记录出现开裂的位置<sup>[11]</sup>。

### 1.2 仿真分析实验设计

这里用有限元显示算法分析凹槽侧壁张角、凹槽底部圆弧直径、凹槽深度以及爪瓣数量这 4 个因素对最大主应力分布及最大值的影响,因此首先需要建立相应参数的有限元模型。

#### 1.2.1 不同凹槽底部圆弧直径的实验设计

在分析凹槽底部圆弧直径时,选取 5, 6, 7, 8, 9, 10 mm 这 6 个不同凹槽底部圆弧直径参数进行分析。凹槽侧壁张角为 70°,爪瓣数量为 5,是当前市面常用的爪瓣数量,凹槽深度在建模过程中是变量,这里用靠近瓶底中心处凹槽起始点截面形状下部的圆弧圆心与坐标原点之间的距离( $s$ )来表示深度。靠近瓶底中心处凹槽起始点截面形状下部的圆弧圆心与坐标原点之间的距离越小,凹槽深度越大,反之亦然,这里设定该距离  $s$  为 4 mm。

#### 1.2.2 不同凹槽侧壁张角的实验设计

选取 60°, 70°, 80°, 90°这 4 种不同凹槽侧壁张角进行分析,凹槽底部圆弧直径设定为 8 mm,爪瓣数量为 5,表达凹槽深度的距离  $s$  设定为 4 mm。

#### 1.2.3 不同凹槽深度的实验设计

选取  $s$  为 4, 4.5, 5, 5.5 mm 来表示不同的凹槽深度进行分析,凹槽侧壁张角为 70°,爪瓣数量为 5,凹槽底部圆弧直径设定为 8 mm。

#### 1.2.4 不同爪瓣数量的实验设计

在分析爪瓣数量变化的影响时,选取 3, 4, 5, 6, 7 这 5 种不同爪瓣数量进行分析,凹槽侧壁张角为 70°,表达凹槽深度的距离  $s$  设定为 4 mm,凹槽底部圆弧直径设定为 8 mm。

#### 1.2.5 全因素实验设计

为了分析影响最大主应力分布及最大值的关键结构参数,并建立各参数与最大主应力最大值之间的关系式,这里以凹槽侧壁张角、凹槽底部圆弧直径、凹槽深度以及爪瓣数量这 4 个结构参数为因子,以最大主应力最大值为响应来设计二水平四因子的全因素实验,

### 1.3 有限元模拟分析

在 ProE 中建立瓶底模型,在 Ansys Workbench 中进行模拟分析。虽然实际的瓶底厚度分布不均匀<sup>[12]</sup>,但这里只分析结构参数对瓶底力学性能的影响,瓶底的厚度变化及厚度分布的影响暂不考虑<sup>[13]</sup>。模型的厚度设为 1 mm,弹性模量为 1.4 GPa,屈服应力为 81.4 MPa,密度为 0.85 g/m<sup>3</sup>,泊松比为 0.44<sup>[14]</sup>。固定瓶底模型的顶边施加 30 kPa 的内压载荷<sup>[15]</sup>,在后处理中选择最大主应力和反映 3 个主应力方向的矢量主应力选项。有限元

模型见图 1，文中采用四边形网格进行划分，由于分析中不同实验的瓶底结构存在差异，网格数量不尽相同，网格数量在 9300~9600 范围之间。

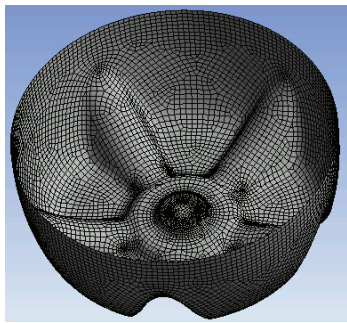


图 1 瓶底的有限元模型

Fig.1 The finite element model of the bottle bottom

## 2 结果与讨论

### 2.1 加速应力开裂测试实验

在加速应力开裂测试中一种典型的瓶底开裂类型为周向开裂，开裂部位位于瓶底中心周围，方向为沿着周向蔓延。最终导致泄露的开裂都位于爪瓣形瓶底的凹槽部位，一般在凹槽的 2 个端部，其开裂方向均为周向。

### 2.2 瓶底开裂现象的有限元模拟

瓶底的主应力分布情况见图 2，可以看出最大主应力分布在瓶底中心处，呈现向外发散的状态，并且在凹槽部位的上端部位出现明显的应力集中现象。同时也是最大主应力最大值所处的部位，这些现象和典型的开裂现象是吻合的，因此可以认为最大主应力在开裂过程中起着关键作用。

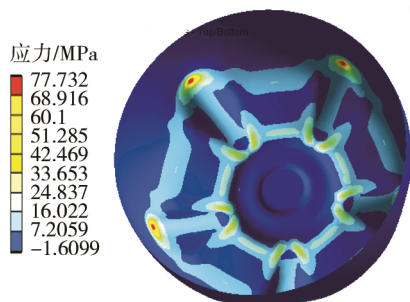


图 2 瓶底的最大主应力分布

Fig.2 Maximum principal stress distribution at bottle bottom

### 2.3 瓶底结构参数对最大主应力分布的影响

经以上分析可以看出，最大主应力为影响开裂的关键因素，因此在设计过程中，应以降低最大主应力为目标进行优化。这里首先通过单因素试验研究爪瓣形瓶底结构各个几何参数对最大主应力的影响，之后通过全因素实验对比分析各个几何参数对最大主应力的影响，并

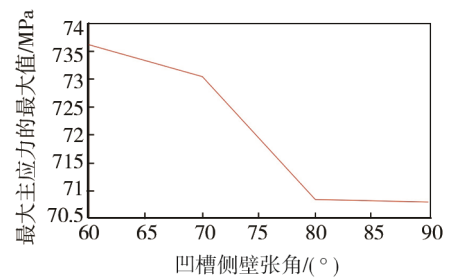
建立各参数与最大主应力之间的关系式。

#### 2.3.1 各参数与最大主应力的关系曲线（见图 3）

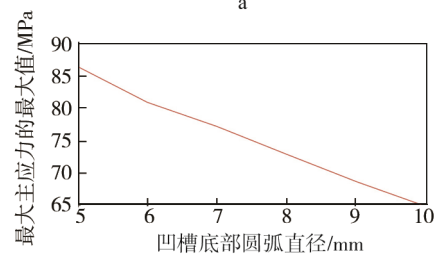
1) 侧壁张角。瓶底最大主应力的最大值与凹槽侧壁张角之间的关系曲线见图 3a，可以看出随着侧壁张角的逐渐增大，最大主应力的最大值趋向降低，因此可以通过增加侧壁张角的大小来降低最大主应力的最大值。

2) 凹槽底部圆弧直径。底部圆弧直径与最大主应力的关系曲线见图 3b，可以看出，随着底部圆弧直径的逐渐增大，最大主应力的最大值也具有降低趋势，因此可以通过增加圆弧的直径来降低最大主应力的最大值。

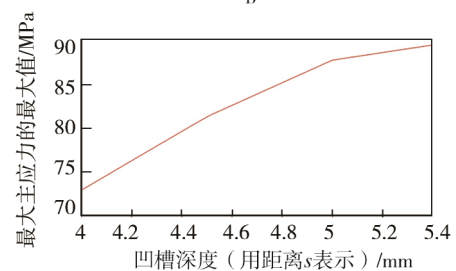
3) 凹槽深度。最大主应力的最大值与表示凹槽深度的距离  $s$  之间的关系见图 3c，可以看出，随着凹



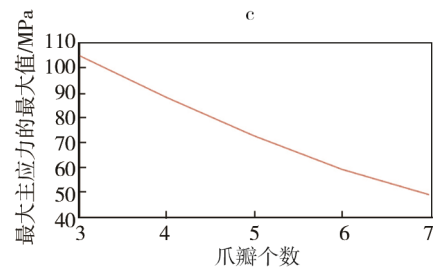
a



b



c



d

图 3 各结构参数与最大主应力的关系曲线

Fig.3 Curve of relationship between the structural parameters and maximum principal stress

槽深度的增加,最大主应力的最大值趋向增加,因此可以通过降低凹槽深度来降低最大主应力的最大值。

4) 爪瓣数量。爪瓣数量与最大主应力的关系曲线见图 3d,随着爪瓣个数的增加,最大主应力的最大值均降低,可以看出爪瓣数量对瓶底的耐应力开裂性能有很大关系。在设计中可以通过增加爪瓣的个数,减小瓶底的最大主应力,提高瓶底的耐应力开裂性能。

### 2.3.2 各参数对最大主应力最大值的影响规律

响应为最大主应力的标准化效应的 Pareto 图见图 4,可以看出,选定的 4 个参数中只有槽底圆弧直径、凹槽数量以及凹槽深度对瓶底最大主应力的最大值有显著影响。其中槽底圆弧直径影响最为显著,凹槽数量与凹槽深度的影响次之,凹槽侧壁张角的影响不显著,另外,凹槽深度、凹槽数量分别与槽底圆弧直径的交互效应也呈现出显著的影响。

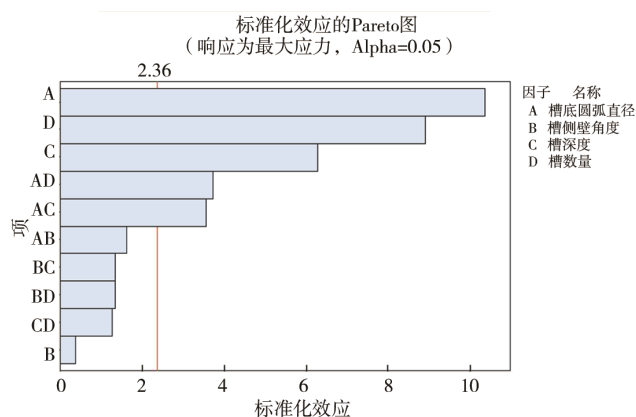


图 4 响应为最大主应力的标准化效应的 Pareto 图

Fig.4 The Pareto diagram in response to the normalized effect of the maximum principal stress

在方差分析中,主效应对应的概率  $P$  值为 0,小于显著性水平 0.05,说明回归总效果显著;失拟项对应的  $P$  值为 0.162,可认为回归方程没有因为漏掉高阶交互作用项而产生失拟现象;弯曲项对应的  $P$  值为 0.044,说明该模型没有弯曲。此外,  $R$ -Sq 值(回归模型误差占总误差的比例)99.79%与  $R$ -Sq 调整值 99.47%非常接近,也说明回归良好。最大主应力的估计系数分别为:常量为 3.5888,槽底圆弧直径对应的系数为-0.60064,槽数量对应的系数为 1.39211,槽深度对应的系数为-2.64828,凹槽深度与槽底圆弧直径的交互效应对应的系数为 0.607350,凹槽数量分别与槽底圆弧直径的交互效应对应的系数为-0.317375。

用  $Y$  表示凹槽上端点最大主应力的最大值,  $A$  表示槽底圆弧的直径,  $B$  表示槽侧壁角度的大小,  $C$  表示圆弧中心离坐标原点的距离(槽深),  $D$  表示凹槽的数量。根据所得系数可以得出表达最大主应力的最大值与 4 个几何参数之间关系的回归方程:  $Y=3.5888-0.60064A-2.64828C+1.39211D+0.607350AC-0.317375AD$ 。

## 3 结语

经过对有限元模拟分析和加速应力开裂测试实验结果对比分析后发现,最大主应力在开裂过程中起着重要的作用。然后以爪瓣结构的 4 个几何参数,即凹槽深度、凹槽侧壁张角、凹槽底部圆弧直径以及爪瓣的数量为变量,分别进行了单因素试验和全因素实验。通过单因素试验,发现随着凹槽侧壁张角、凹槽底部圆弧直径以及爪瓣数量的增大,最大主应力的最大值均呈现下降的态势,而表示凹槽深度的 4 个数据的分析结果出现中部下凹的曲线状态。全因素实验证实了这 4 个几何参数对于最大主应力的最大值均有显著的影响,其中爪瓣的数量以及凹槽底部圆弧直径带来的影响最为显著。最后拟合了瓶底最大主应力的最大值与 4 个几何参数之间关系的回归方程。这里只是在厚度均匀的前提下研究了几何结构的相关参数对应力开裂的影响及规律,厚度变化及厚度分布的变化对应力开裂的影响还需进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 王华山, 吴崇峰, 高雨苗. PET 瓶的常见质量缺陷分析[J]. 中国塑料, 2001, 15(4): 44—47.  
WANG Hua-shan, WU Chong-feng, GAO Yu-zhuo. Analysis of Common Quality Defects in PET Bottles [J]. China Plastics, 2001, 15(4): 44—47.
- [2] 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.
- [3] KARALEKASD D, RAPID D, PAKALIAKIS G. Numerical and Experimental Investigation of the Deformational Behavior of Plastic Containers[J]. Packaging Technology and Science, 2001, 14(5): 185—191.
- [4] 王备战. PET 吹塑瓶爆裂渗漏原因分析[J]. 工程塑料应用, 2001, 29(3): 25—26.  
WANG Bei-zhan. Cause Analysis of Explosion and Leakage of PET Blowing Bottle[J]. Application of Engineering Plastics, 2001, 29(3): 25—26.
- [5] 刘圣涛. PET 容器应力开裂的科学探讨[J]. 塑料包装, 2007, 17(5): 59—60.  
LIU Sheng-tao. Scientific Study on Stress Cracking of PET Vessel[J]. Plastic Packaging, 2007, 17(5): 59—60.
- [6] 赵雅. 瓶型及容器材料对耐环境应力开裂影响分析[J]. 安阳工学院学报, 2015, 14(2): 13—15.  
ZHAO Ya. An Analysis on ESCR Influence of Container Style and Material[J]. Journal of Anyang Institute of Technology, 2015, 14(2): 13—15.
- [7] 林金平. 碳酸饮料瓶用 PET 结构与性能的研究[D].

- 厦门: 厦门大学, 2008.
- LIN Jin-ping. Study of Poly(Ethylene Terephthalate) (PET) for Carbonated Soft Drink Bottles on Structure and Properties[D]. Xiamen: Xiamen University, 2008.
- [8] 高卫霞. PET 瓶应力开裂原因的探讨及预防[J]. 包装工程, 2005, 26(5): 40—42.
- GAO Wei-xia. Cause and Preventions of Stress Cracking of PET Bottles[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(5): 40—42.
- [9] 卓俊谦. 聚酯瓶应力开裂解决方法[J]. 聚酯工业, 2005, 18(2): 40—42.
- ZHUO Jun-qian. Method for Solving Stress Cracking of Polyester Bottle[J]. Polyester Industry, 2005, 18(2): 40—42.
- [10] WANG H T, PAN B R, DU Q G. The Strain in the Test Environmental Stress Cracking of Plastics[J]. Polymer Testing, 2003(22): 125—128.
- [11] YANG Z J, HARKIN-JONES E M A, ARMSTRONG C G, et al. Finite Element Modelling of Stretch-blow Molding of PET Bottles Using Buckley Model: Plant Tests and Effects of Process Conditions and Material Parameters[J]. Journal of Process Mechanical Engineering, 2004(8): 237—250.
- [12] QBT 1868—2004, 聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 碳酸饮料瓶[S].
- QBT 1868—2004, Polyethylene Terephthalate (PET) Bottle for Carbonation Drink[S].
- [13] YANG Z J, JONES E H, MENARY G H, et al. A Non-isothermal Finite Element Model for Injection Stretch-blow Molding of PET Bottles with Parametric Studies[J]. Polymer Engineering Science, 2004(44): 1379—1390.
- [14] REED P E, BREEDVELD G AND LIM B C, Simulation of the Drop Impact Test for Molded Thermoplastic Containers[J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24(2): 133—153.
- [15] 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.