

基于响应面法的塑料微压力容器吹塑成型壁厚优化

张保山, 刘淑梅, 曹 熹

上海工程技术大学材料科学与工程学院, 上海

收稿日期: 2023年7月2日; 录用日期: 2023年8月23日; 发布日期: 2023年8月30日

摘 要

为了改善塑料微压力容器在吹塑成型过程中存在的壁厚均匀度较差的问题, 使用POLYFLOW软件对某一型号塑料微压力容器进行数值模拟。通过设计响应面实验研究芯棒拉伸速度、预吹压力、高吹压力对塑料微压力容器吹塑成型的影响规律, 用制件壁厚方差即壁厚均匀度来作为衡量标准, 达到优化吹塑制件壁厚均匀度的目的。结果表明在芯棒拉伸速度为1.28 m/s, 预吹压力为0.79 MPa, 高吹压力为3.9 MPa时, 塑料微压力容器壁厚分布较为均匀。通过研究对塑料微容器的实际生产提供一定的参考。

关键词

注射拉伸吹塑, 数值模拟, POLYFLOW, 响应面实验

Optimization of Wall Thickness for Blow Molding of Plastic Micro Pressure Containers Based on Response Surface

Baoshan Zhang, Shumei Liu, Xi Cao

School of Materials Science and Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

Received: Jul. 2nd, 2023; accepted: Aug. 23rd, 2023; published: Aug. 30th, 2023

Abstract

In order to improve the poor wall thickness uniformity of plastic micro-pressure containers in the

blow molding process, POLYFLOW software is used to perform numerical simulation of a certain type of plastic micro-pressure container. Through the design response surface experiment, the influence of mandrel tensile speed, pre-blowing pressure and high blowing pressure on the blow molding of plastic micro-pressure containers is studied, and the variance of wall thickness of the parts is used as the measurement standard to achieve the purpose of optimizing the uniformity of the wall thickness of the blow molded parts. The results show that when the mandrel tensile speed is 1.28 m/s, the pre-blowing pressure is 0.79 MPa, and the high blowing pressure is 3.9 MPa, the wall thickness distribution of plastic micro-pressure container is relatively uniform. Through research, the actual production of plastic micro-pressure containers is provided with a certain reference.

Keywords

Injection Stretch Blow Molding, Numerical Simulation, POLYFLOW, Response Surface Experiments

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着现代社会的不断发展,塑料微压容器的需求量越来越大。塑料微压力容器具有体积大、承压能力强、密封性好等特点,可以存储大量的物品[1] [2] [3] [4]。因此,塑料微容器的应用前景非常广阔。然而,在塑料微容器吹塑的过程中,往往会出现厚度不均的问题。厚度不均会导致产品质量下降,从而降低了塑料微容器的使用寿命,甚至可能引起产品失效,带来不必要的损失。塑料成型加工技术作为轻工业装备的重要支撑,已渗透到各行各业中,并得到了广泛的应用和发展。

在拉伸吹塑优化研究方面,目前主要在瓶坯结构、工艺参数和冷却固化等方面进行研究。所用的优化方法有很多,如正交试验、人工神经网络法等。但是采用一些优化方法对拉伸速度、延迟时间、预吹压力和高吹压力等工艺参数进行优化时,并没有考虑到参数之间的交互作用;冷却固化阶段采用的优化方法还不够成熟,在实际应用中都存在较大困难[5]。

注射拉伸吹塑(ISBM)技术具有成型质量高、生产效率高、应用广泛等特点[6] [7]。目前对于吹塑件广大学者研究最多的就是壁厚均匀度问题。课题组针对塑料微压力容器壁厚均匀性问题,利用计算机数值模拟技术研究预吹压力、高吹压力和芯棒拉伸速度 3 个成型工艺参数对制品壁厚的影响,通过响应面法确定最佳成型工艺方案。

2. 模型的建立

利用 solidworks 软件建立了某一型号塑料微压力容器和吹塑坯料三维模型,如图 1 所示。塑料微压力容器总高 500 mm,容器壁直径为 300 mm,材料为 PET。由于口部螺纹不参与吹塑成型过程的变形,在数值模拟过程中对模型进行简化,将口部螺纹替换为光滑直壁,参与吹塑成型塑料微压力容器和吹塑坯料为回转体,在保持精度的前提下,为了减少计算量,加快计算速度,取塑料微压力容器和吹塑坯料对称面进行数值模拟。将建立的模型导入 AnsysWorkbench 软件中,进行网格划分,划分结果如图 2 所示。

在塑件倒角等容易出现起皱破裂等现象的位置,在划分网格的时候对这些区域进行网格细化[8]。

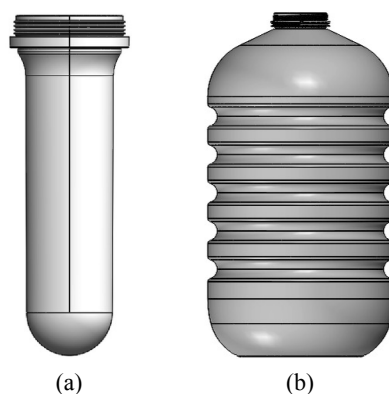


Figure 1. Three-dimensional diagram. (a) Blow molded blanks; (b) Plastic micro pressure containers

图 1. 三维图。(a) 吹塑坯料；(b) 塑料微压力容器

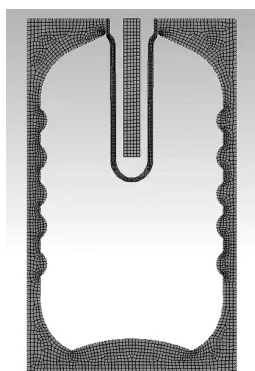


Figure 2. Grid division

图 2. 网格划分

3. 响应面优化模型

响应面分析法通常有响应面中心组合设计法(CCD)和 Box Behnken (BBD) 2 种实验设计方法。其中, BBD 响应面法适合于因素、水平较少的实验设计情况; CCD 响应面法适合多因素多水平, 且存在连续变量情况[9] [10]。采用 BBD 实验设计方法进行数值模拟分析, 设计 3 因素 3 水平实验, 以芯棒拉伸速度 V 、预吹压力 P_1 、高吹压力 P_2 为因素, 以壁厚的均匀度为响应值, 设计响应面因素水平表, 如表 1 所示。

Table 1. Response surface factor level table

表 1. 响应面因素水平表

水平	因素 A 拉伸速度/m/s	因素 B 预吹压力/MPa	因素 C 高吹压力/MPa
-1	1	0.3	2
0	1.5	0.55	3
1	2	0.8	4

以壁厚均匀度为响应值, 在吹塑完成的塑料微压力容器制品上选取 10 个特征点, 以式(1)计算制品壁厚均匀度。

$$F = \frac{\sum_{i=1}^m (t_i - \bar{t})^2}{m} \quad (1)$$

式中： \bar{t} 为所选特征点的平均壁厚； t_i 为特征点壁厚； m 为特征点个数。

选取的 10 个特征点如图 3 所示。

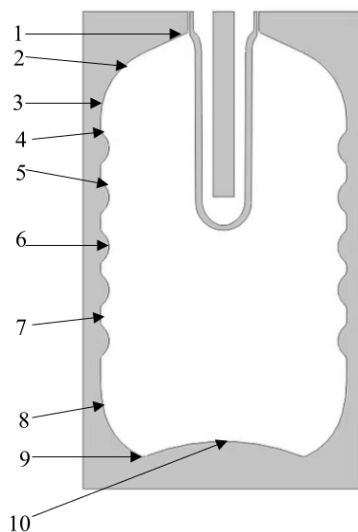


Figure 3. Location of feature points

图 3. 特征点位置

利用 Polyflow 软件对塑料微压力容器 15 组工艺参数的吹塑成型过程进行数值模拟, 在制品上选取十个壁厚特征点。

将制品 10 个特征点的壁厚代入式(1)中, 计算每组工艺参数壁厚均匀度, 表征制品吹塑成型质量。得到的响应面实验结果如表 2 所示。

Table 2. Response surface experimental results of plastic micro pressure containers

表 2. 塑料微压力容器响应面实验结果

项目	因素 A 预吹压力/MPa	因素 B 高吹压力/MPa	因素 C 拉伸速度/m/s
1	2	0.55	2
2	1.5	0.55	3
3	2	0.3	3
4	1.5	0.3	4
5	1	0.55	2
6	1.5	0.3	2
7	2	0.55	4
8	1.5	0.55	3
9	1.5	0.55	3
10	2	0.8	3

Continued

11	1.5	0.8	2
12	1.5	0.8	4
13	1	0.8	3
14	1	0.55	4
15	1	0.3	3

将响应值数据运用最小二乘法进行曲线拟合, 得到响应目标与变量因素 A 芯棒拉伸速度、因素 B 预吹压力, 因素 C 高吹压力之间的响应模型, 函数如式(2)所示。

$$R = 0.9209 + 0.0885A - 0.1395B - 0.1068C - 0.1322AB + 0.1197AC - 0.1329BC - 0.0518A^2 - 0.1425B^2 - 0.0855C^2 \quad (2)$$

通过对实验数据进行方差分析, 验证实验设计参数的准确性和实验设计的可靠性。数据分析结果如表 3 所示。

Table 3. Analysis of variance of regression equation for wall thickness uniformity

表 3. 壁厚均匀度回归方程方差分析

因素	偏差平方和	自由度	方差	F 值	P 值	
模型	0.6077	9	0.0675	38.15	0.0004	显著
A-V	0.0627	1	0.0627	35.42	0.0019	
B-P1	0.1556	1	0.1556	87.92	0.0002	
C-P2	0.0912	1	0.0912	51.53	0.0008	
AB	0.0699	1	0.0699	39.49	0.0015	
AC	0.0573	1	0.0573	32.40	0.0023	
BC	0.0706	1	0.0706	39.92	0.0015	
A ²	0.0099	1	0.0099	5.59	0.0644	
B ²	0.0750	1	0.0750	42.39	0.0013	
C ²	0.0270	1	0.0270	15.26	0.0113	
残差	0.0088	5	0.0018			
纯误差	0.6325	14				
相关系数		修正决定系数		模型预测		信噪比
0.9814		0.9458		0.7569		15.4725

由表可知, 模型的 F 值为 38.15, P 值为 0.0004, 所以该回归模型被噪声因素影响的部分为 0.04%, 说明该模型较为显著。模型中不同设计变量的 P 值均小于 0.05, 这说明这些设计变量对壁厚均匀度的影响显著。模型信噪比 $r = 15.4725 > 4$, 相关系数 R^2 为 0.9814, 这表明模型可靠性达到 97.58%, 壁厚均匀度真实值和该模型对于壁厚均匀度的预测值拟合程度较高, 误差较小, 模型分辨能力足够进行响应目标的预测和评估。

4. 结果与讨论

4.1. 模拟结果分析

初始工艺条件对应的塑料微压力容器吹塑成型模拟结果如图 4 所示。

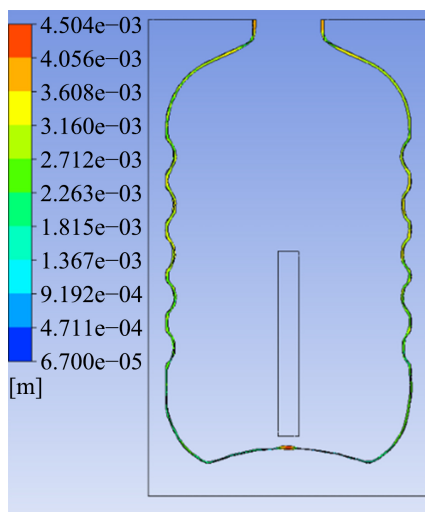
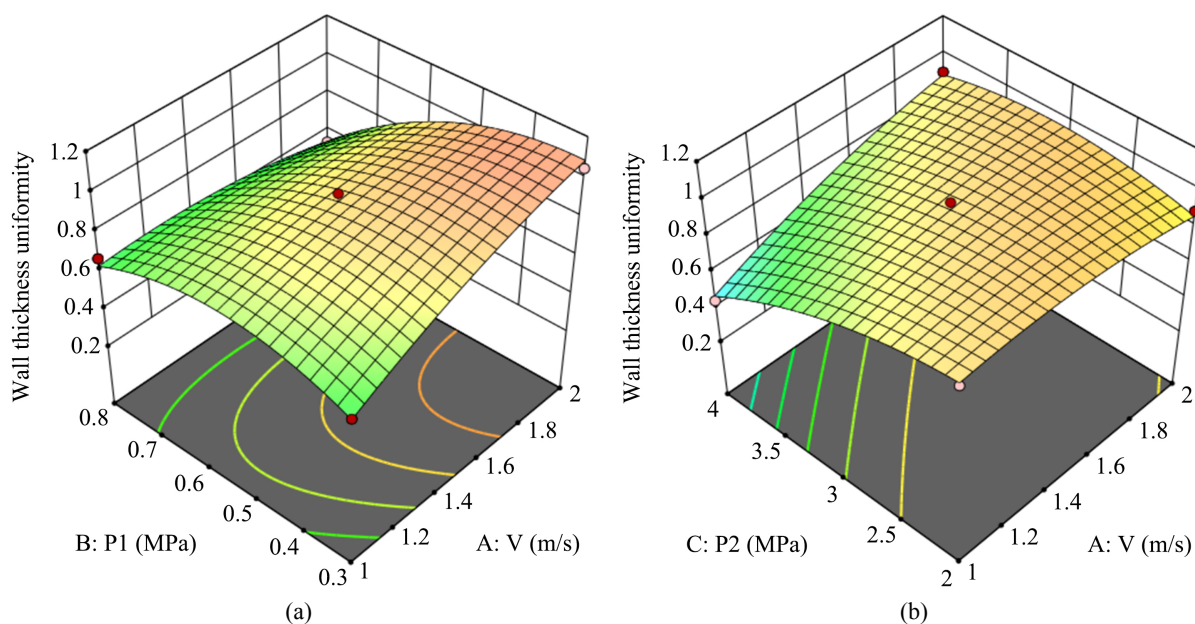


Figure 4. Blow molding simulation results
图 4. 吹塑成型模拟结果

从图 4 可以看出, 在塑料微压力容器颈部和底部位置, 吹塑坯料变形较大, 壁厚较薄, 壁厚均匀度较差, 在塑料微压力容器壁部分, 吹塑坯料变形较小, 壁厚较为均匀, 壁厚均匀度较好。通过选取制品 10 点位置处壁厚数值, 计算壁厚均匀度为 0.84588。

根据设计的响应面实验结果, 得到壁厚均匀度与因素 A 芯棒拉伸速度、因素 B 预吹压力, 因素 C 高吹压力之间的响应曲面如图 5 所示。



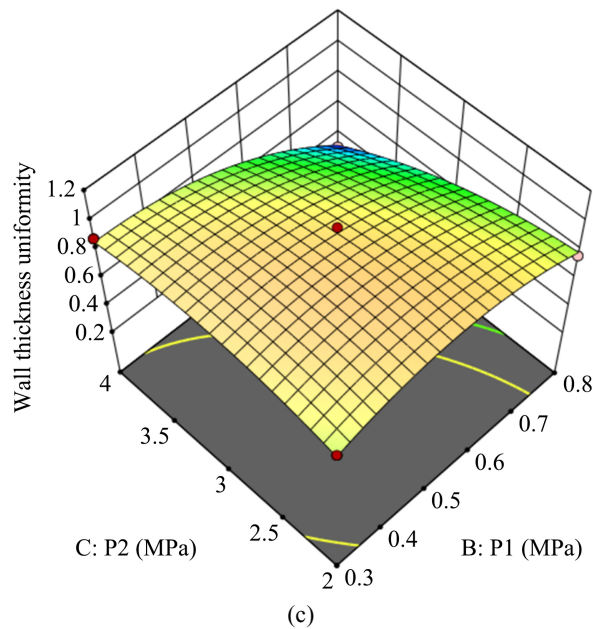


Figure 5. Wall thickness uniformity response surface. (a) A-B response surface; (b) A-C response surface; (c) B-C response surface

图 5. 壁厚均匀度响应曲面。(a) A-B 因素响应曲面；(b) A-C 因素响应曲面；(c) B-C 因素响应曲面

由图 5(a)可知, 当高吹压力 P2 为定值时, 芯棒拉伸速度 V 取最大值, 预吹压力 P1 取最大值, 此时壁厚均匀度最小。由图 5(b)可知, 当预吹压力 P1 为定值时, 芯棒拉伸速度 V 取最小值, 高吹压力 P2 取最大值, 此时壁厚均匀度最小。由图 5(c)可知, 当芯棒拉伸速度 V 为定值时, 预吹压力 P1 取最大值, 高吹压力 P2 取最大值, 此时壁厚均匀度最小。

4.2. 壁厚优化

以响应面实验三个变量因素为设计参数, 结合芯棒拉伸速度、预吹压力、高吹压力对塑料微压力容器制品壁厚均匀度的影响, 通过响应面实验结果对变量参数进行优化, 最优设计组合如表 4 所示。

Table 4. Value of optimal design variable

表 4. 最优设计变量取值

变量	因素 A V/m/s	因素 B P1/MPa	因素 C P2/MPa	响应	期望
最优	1.28	0.79	3.9	0.287	0.94

最终得出最佳的工艺参数, 芯棒拉伸速度为 1.28 m/s, 预吹压力为 0.79 MPa, 高吹压力为 3.9 MPa。

5. 生产验证

通过响应面法获得塑料微压力容器吹塑成型的最佳成型工艺, 优化后的塑料微压力容器壁厚如图 6 所示。

由图 6 可知, 优化后制品最大壁厚为 4.23 mm 相比于优化前制品最大壁厚 4.48 mm 减小了 0.25 mm。优化后制品最大壁厚与最小壁厚差相比于优化前较小。通过选取制品 10 点位置处壁厚数值, 计算壁厚均匀度得到优化后制品壁厚均匀度为 0.26587, 与响应面预测结果相符, 壁厚的均匀度情况显著提高。

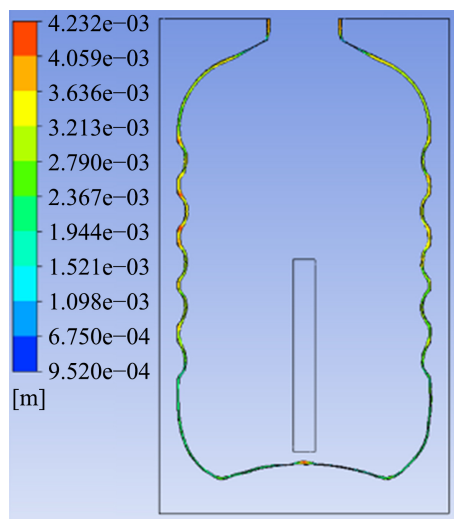


Figure 6. Optimized wall thickness of plastic micro pressure containers

图 6. 优化后塑料微压力容器壁厚

优化结果对比如表 5 所示。

Table 5. Comparison of optimization results

表 5. 优化结果对比

项目	因素 A V/m/s	因素 B P1/MPa	因素 C P2/MPa	壁厚均匀度	壁厚极差
优化前	1.5	0.55	3	0.84588	3.83
优化后	1.28	0.79	3.9	0.26587	3.28

优化完成的塑料微压力容器实际产品如图 7 所示。



Figure 7. Plastic micro pressure container products

图 7. 塑料微压力容器制品

优化后的塑料微压力容器结构充填良好, 表面光滑无凹陷, 塑料微压力容器吹塑成型整体质量符合生产需求。塑料微压力容器实际生产效果与数值模拟优化的结果相近, 表明本文使用的优化方法和数值模拟技术应用于塑料微压力容器中间坯料结构的优化、工艺参数的优化与塑料微压力容器结构、工艺参数的优化模拟具有良好的可靠性。

6. 结论

基于 ANSYS 软件当中的 POLYFLOW 模块, 通过设计响应面实验对塑料微压力容器的吹塑成型进行数值模拟, 对塑料微压力容器吹塑成型进行分析。通过对模拟结果进行分析得出芯棒拉伸速度、预吹压力、高吹压力对塑料微压力容器吹塑成型的影响规律, 对塑料微压力容器吹塑成型过程中的参数控制提供了一定的参考。分析表明该型号塑料微压力容器在芯棒拉伸速度为 1.28 m/s, 预吹压力为 0.79 MPa, 高吹压力为 3.9 MPa 时, 塑料微压力容器壁厚均匀度最佳。

参考文献

- [1] 张智尧. 塑料加工成型技术研究进展[J]. 科技风, 2020(3): 26.
- [2] 王杰. 浅谈高分子材料成型加工技术以及应用前景[J]. 科技风, 2020(5): 164.
- [3] 胡兴军. 国内外食品包装塑料的市场和技术进展[J]. 中国包装, 2006(3): 106-109.
- [4] 黄汉雄. PET 瓶注拉吹技术发展趋势[J]. 塑料包装, 2007(6): 18-22.
- [5] 刘良先. PET 瓶拉伸吹塑过程仿真及优化分析[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州大学, 2020.
- [6] 周焯. 医用 PET 瓶注拉吹成型研究及工艺优化[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2014.
- [7] 肖艳. 参数设计分析及优化模式研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北工业大学, 2004.
- [8] 宋志远, 刘淑梅, 莫壮壮, 等. 基于响应面法的蓄能器壳体工艺优化[J]. 轻工机械, 2020, 38(2): 90-94.
- [9] 李炯城. 挤出吹塑制品壁厚迭代优化与控制的建模及策略[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2005.
- [10] 吴其晔, 巫静安. 高分子材料流变学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.