

医用泡罩包装容器热成型仿真及工艺参数优化

陈香利, 张锁怀, 韩庆红
(上海应用技术大学, 上海 201400)

摘要: **目的** 通过数值模拟技术, 仿真某医用泡罩包装热成型容器在柱塞辅助热成型工艺过程中, 不同时刻片材的厚度变化规律及分布情况, 并验证有限元仿真模拟结果的可靠性。仿真拉伸头不同预拉伸深度下的热成型容器的壁厚分布情况, 找出使壁厚分布更加均匀的最佳预拉伸深度值, 以优化工艺参数。**方法** 利用 SolidWorks 软件建立了有限元模型, 通过 Ansys Polyflow 软件仿真该医用泡罩包装容器的热成型工艺过程。并通过对实际热成型产品进行热成型实验, 验证了有限元仿真模拟结果的可靠性。**结果** 仿真值与实验值的相对误差约为 2%, 仿真结果与实际情况大体一致, 仿真结果比较可靠。**结论** 通过有限元仿真模拟得到该医用泡罩包装制品的最佳热成型预拉伸深度值为 6.5 mm。

关键词: 医用泡罩包装容器; 热成型; 仿真; 工艺参数优化

中图分类号: TB482.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)11-0127-06

Simulation Study on Thermoforming of a Blister Packaging Container for Medical Use and Process Parameter Optimization

CHEN Xiang-li, ZHANG Suo-huai, HAN Qing-hong
(Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201400, China)

ABSTRACT: Through the numerical simulation technology, a medical blister packaging containers thermoforming, based on sheet thickness variation and distribution at various points, was simulated during the plug-assisted thermoforming process, verifying the reliability of the finite element simulation methods. The simulation presenting vessel wall thickness distribution of the stretching core at different pre-stretching depth was also conducted, finding out the best pre-stretching depth contributing to more uniform values of thickness distribution, resulting in optimization of process parameters. The finite element model was established using SolidWorks software, and Ansys Polyflow software was applied for the simulation of the thermoforming process of medical blister packaging container. Through the experimental study of thermoforming on the actual molding products, the reliability of finite element simulation results was verified. The relative error of the results between the simulation value and test value was about 2%, representing that the simulation results was in accordance with the actual situation, and the simulation was quite reliable. Through the finite element simulation for the medical blister packaging products, the results were verified that the best pre-stretching depth value of this thermoforming was 6.5 mm.

KEY WORDS: blister packaging container for medical use; thermoforming; simulation; process parameter optimization

柱塞辅助热成型也称为柱塞预拉伸热成型, 成 机械力推动柱塞下移, 拉伸预热片材直至柱塞底板
型开始时需将预热过的片材紧压到阴模顶面上, 用 与阴模顶面上的片材紧密接触, 这样片材两侧均成

收稿日期: 2015-09-24

基金项目: 国家自然科学基金 (51475311)

作者简介: 陈香利 (1989—), 女, 河南新乡人, 上海应用技术大学硕士生, 主攻泡罩包装热成型工艺。

通讯作者: 张锁怀 (1962—), 男, 陕西人, 博士, 上海应用技术大学教授, 主要研究方向为机械系统动力学和系统仿真等。

为密闭的气室^[1-3]。若通过柱塞内的通气孔往片材上面的气室内充入压缩空气,使片材再次受到拉伸而完成成型过程,这种方法称作柱塞辅助气压成型^[4-6]。

通过热成型方法成型的塑料制品称为热成型容器,如杯子、盘子和泡罩包装。泡罩包装又称为水泡眼包装,简称为 PTP(Press Through Packaging),是当今制药行业应用最为广泛、发展最快的软包装形式之一,也是目前我国生产的片剂、胶囊、栓剂、丸剂等固体制剂药品的主要包装形式之一^[7]。泡罩包装的产品具有经济性好、直观性好、贮存占用的空间小等优点^[8]。如果成型工艺不当,会出现如泡罩成型不完全,清晰度不够,制品厚度不均匀,拐角处出现裂纹、破裂,材料粘附到模具上等缺陷^[9-10],因此,选择合适的热成型工艺显得非常重要。

文中以温州高格机械科技有限公司生产的 DHC-250P 型铝塑泡罩热成型机作为研究对象,根据某医用泡罩热成型容器的特点及柱塞辅助气压热成型工艺,采用 Ansys Polyflow 软件,模拟热成型过程中不同时刻片材的厚度变化规律及分布情况,以片材厚度作为表征参数,结合实际热成型产品,验证有限元仿真模拟结果的有效性。并通过数值模拟技术,仿真拉伸头不同预拉伸深度下的壁厚分布情况,预测热成型过程中可能存在的成型缺陷,以选择使壁厚分布更加均匀的工艺参数。

1 实验

采用量程为 0~25 mm、精度为 0.001 mm 的电子数显外径千分尺,抽样测量实际生产的医用泡罩热成型制品的片材厚度值,见图 1。

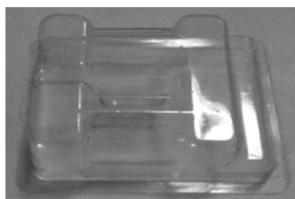


图 1 泡罩制品
Fig.1 Blister products

1.1 热成型工艺流程

热成型工艺流程:板(片)材的夹持—加热—成型—冷却—脱模—初制品^[11-12]。

1.2 有限元几何模型的建立

该医用泡罩热成型容器所用材料为 PVC(聚氯

乙烯,板材厚度为 0.35 mm),拉伸头材料为 POM(聚甲醛树脂),模具材料为铝材。首先在 SolidWorks 中建立有限元几何模型,其次将模型导入 Ansys Workbench,再次在 ICEM-CFD 划分网格、设置边界条件,接下来在 Polydata 中完成柱塞辅助气压成型热成型工艺参数的设置,紧接着在 Polyflow 里边计算求解,最后在 CFD-Post 里可视化后处理,输出不同时刻泡罩的壁厚变化。具体有限元仿真模拟流程:SolidWorks 建立壳模型—导入 Ansys Workbench—ICEM-CFD 划分网格,设置边界条件—Polydata 设置—Polyflow 求解—CFD-Post 可视化后处理。

由于 PVC 片材厚度尺寸远小于长、宽尺寸,所以使用薄壳单元建立片材的 3D 吹塑和热成型分析模型。柱塞辅助气压成型的几何模型见图 2,上部为拉伸头,中间为初始的型坯 PVC 片材,底部为模具。初始 PVC 片材尺寸为:长 77 mm,宽 60 mm,厚度 0.35 mm。PVC 片材与模具相距 30 mm,与拉伸头相距 5 mm。

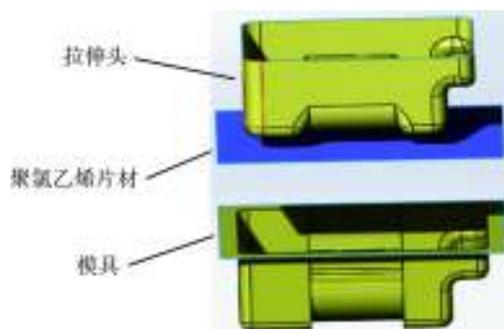


图 2 几何模型
Fig.2 Geometric model

1.3 分析任务模型的建立

建立拉伸头预拉伸深度为 4 mm 的任务模型。

创建任务模型的性质:F.E.M. task(有限元任务),任务模型的分析类型为:Time-dependent problem(瞬态问题);子任务模型的流体类型为:Shell model: Gen. Newtonian isothermal(广义牛顿流体等温薄壳成型问题);流体材料物理特性参数计算模型为:Shear-rate dependence of viscosity(粘度随剪切速率变化模型)。为了更准确地分析片材厚度,在仿真模拟中考虑滑移因素和惯性力的影响。

基于聚合物熔体加工的复杂性,作如下简化和假设:忽略 PVC 片材厚度分布的不均匀性;假设模具和拉伸头是绝热的;考虑到拉伸吹塑过程的复杂性,建立等温模型并且只考虑片材变形和厚度成型;片材与模具发生接触后接触紧密,且之间没有任何

介质存在。

模具向上运动速度、拉伸头向下预拉伸速度和吹胀压力均选择渐进问题模型，模具速度和吹胀压力的渐进函数均选用斜坡函数，拉伸头速度的渐进函数选用多斜坡函数，函数式如下：

$$\begin{cases} v_1 = v_{1\text{const}} \cdot f_1(t) \\ v_2 = v_{2\text{const}} \cdot f_2(t) \\ p = p_{\text{const}} \cdot f_3(t) \end{cases}$$

式中： $v_{1\text{const}}$ ， $v_{2\text{const}}$ ， p_{const} 分别为定义的模具速度、拉伸头速度与吹胀压力的常数值。根据生产线实际热成型工艺参数，作如下设置：模具速度常数 $v_{1\text{const}}$ 为 300 mm/s，拉伸头速度常数 $v_{2\text{const}}$ 为 -50 mm/s，压力常数 p_{const} 为 0.6 MPa。模具速度斜坡函数中的具体关键点为：(0, 1), (0.097, 1), (0.103, 0)；拉伸头速度多斜坡函数中的具体关键点：(0.11, 0), (0.12, 1), (0.29, 1), (0.30, 0)；吹胀压力斜坡函数中的具体关键点为：(0.30, 0), (0.31, 1), (0.72, 1)。吹气时间为 0.42 s，拉伸头的预拉伸深度为 4 mm。

其他各项热成型加工参数：密度为 $1.4 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3$ ，常数粘度为 $10^5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。在 Polyflow 中需要对数值参数进行设定，在设置瞬态迭代参数时，初始时间、初始步长、最小步长、最大步长及误差值分别为 0, 0.000 1, 0.000 01, 0.01, 0.01 s。最大计算时间设为 0.72 s。

2 结果与分析

完成各项工艺参数设置后，运行 Polyflow 主程

序进行仿真运算，在可视化后处理程序 CFD-Post 中输出不同时刻的片材位置和厚度分布。将预拉伸深度值为 4 mm 的有限元仿真模拟的泡罩制品壁厚分布，与实际柱塞辅助热成型泡罩制品的壁厚分布进行比较。

2.1 厚度分布仿真分析

热成型制件由于原材料自身特性、成型工艺参数、制件自身的形状及复杂程度、模具温度等多方面的影响，普遍存在着壁厚分布不均匀的问题。具体表现在：制件轴向壁厚不均、周向壁厚不均、侧壁和底部壁厚不均、拐角和平直部位壁厚不均等，因此，厚度是衡量泡罩热成型制品质量的一个重要因素^[13-15]。在这个算例中，主要关注不同时刻的壁厚分布情况及最薄区域的发生位置。图 3 是柱塞辅助热成型不同时刻泡罩厚度的有限元分析结果，初始 PVC 片材的厚度值为 0.35 mm。为了方便比较不同时刻厚度分布的变化，在图 5 所示的厚度分布云图中，设置相同的标尺范围 (0.05~0.35 mm)。

从图 3 中可以看到，开始 $t=0.0001 \text{ s}$ 时 PVC 片材与模具、拉伸头均不接触，相隔一定距离。首先模具向上运动，在 $t=0.103 \ 558 \text{ s}$ 时模具与片材紧密接触形成一个密闭空腔；然后，拉伸头开始向下运动，在 $t=0.203 \ 272 \text{ s}$ 时拉伸头与片材接触，开始预拉伸；当 $t=0.301 \ 583 \text{ s}$ 时拉伸头停止运动，此时片材被预拉伸到了一定的深度。在拉伸头停止运动的同时开始气压成型； $t=0.320 \ 063 \text{ s}$ 时自由吹胀结束，由于自由吹胀作用，壁厚均匀膨胀； $t=0.72 \text{ s}$ 时约束吹胀结束，整个热成型过程结束。

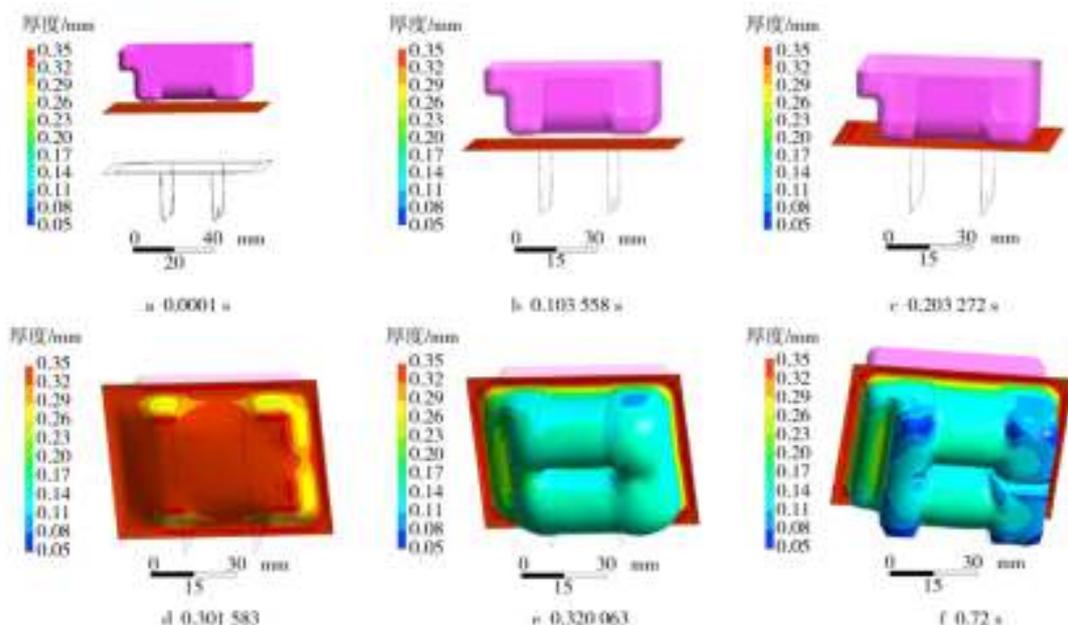


图 3 不同时刻的泡罩厚度分布
Fig.3 Distribution of blister thickness at several instants

$t=0.72$ s、预拉伸深度 $d=4$ mm 时的成型泡罩制品的厚度分布见图 4。

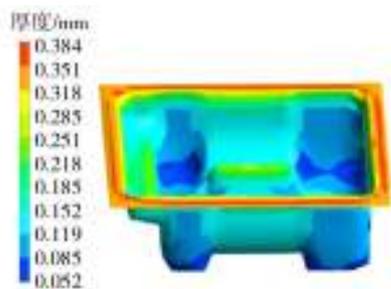


图 4 预拉伸深度 $d=4$ mm 时的泡罩制品厚度分布
Fig.4 Distribution of blister thickness with the tensile depth of $d=4$ mm

当拉伸头停止运动时，片材被拉伸到一定深度。拉伸过程中，片材和拉伸头接触是整个平端接触，因摩擦作用，片材底部的熔体流动速率非常小，厚度被固定堆积下来，当拉伸结束时片材底部厚度几乎等于原始片材厚度。整个预拉伸时间段内，对于直到预拉伸结束时依然没有接触到拉伸头部分的片材，只受到拉伸作用，变形比较大，厚度也越来越小，直到预拉伸阶段完成。

当在型坯中吹入压缩空气后，型坯胀大。型坯未接触模壁的胀大称为自由吹胀；当型坯接触模壁时，则称为约束吹胀。自由吹胀开始时片材受到气压作用产生均匀变形，片材整体厚度均匀减小。随着片材部分区域开始与模壁接触，由于摩擦约束作用限制了片材的运动，自由吹胀变成约束吹胀。按接触模壁的先后顺序，产生不规则的变形，靠近泡罩的底角处，与模壁最后接触，因此变形最大。

最终成型时，泡罩口边缘的厚度最大，最大壁厚值为 0.384 mm；最薄部分在侧壁与底部过渡处，最小壁厚值为 0.052 mm。

2.2 成型实验结果

将多个样品同一部位的测量结果取平均值，得到各测量点的壁厚分布，见图 5（图中右侧为对应的测量点位置）。

由图 5 可知，泡罩的最厚部分在边缘（A 和 P）上，最大厚度值约为 0.354 mm；最薄部分在侧壁与底部过渡处（H, J, K, M），最小厚度值约为 0.051 mm。与仿真结果图 4 相比较，片材的变化趋势、最薄部分出现的位置相吻合。

考虑到原始片材厚度的不均匀性、环境温度对片材温度场分布的影响、加热器分布的不均匀性、

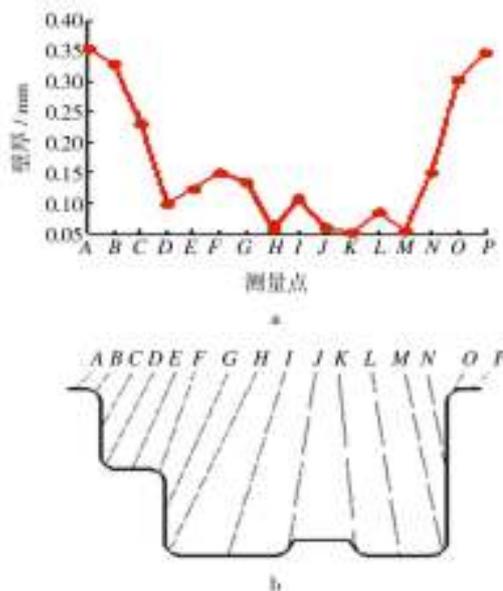


图 5 实际泡罩制品的壁厚分布
Fig.5 Distribution of thickness for the actual blister products

测量误差等因素，仿真结果与实验结果存在一定偏差，是正常现象。如果仅考察最重要的参数即成型后最小壁厚，仿真值与实验值的相对误差约为 2%，因此，综合比较来看，仿真模型、仿真方法合理可行，仿真的柱塞辅助热成型中片材的变形趋势比较正确。

2.3 不同预拉伸深度数值模拟及优化

柱塞辅助热成型拉伸头的拉伸深度，对制品质量有很大影响。相同拉伸头运动速度，相同吹泡时间下，针对拉伸头不同的预拉伸深度进行数值模拟分析，找出使泡罩制品厚度分布更加均匀的预拉伸深度值。模拟拉伸头不同的预拉伸深度下得到的对应薄壁壁厚值与厚壁壁厚值见表 1。

表 1 不同预拉伸深度的泡罩壁厚

Tab.1 The value of blister thickness at several tensile depths mm

拉伸深度 d	薄壁壁厚	厚壁壁厚
0	0.056	0.375
2	0.060	0.378
4	0.052	0.384
6	0.061	0.395
6.5	0.065	0.398
7	0.061	0.401
8	0.053	0.406
10	0.044	0.413
12	0.038	0.419
14	0.034	0.422
16	0.032	0.425
18	0.030	0.427
20	0.028	0.429
22	0.026	0.430
24	0.024	0.430
25	0.021	0.431

由表 1 可知, 在预拉伸深度为 6.5 mm 时, 薄壁壁厚值为 0.065 mm, 厚壁壁厚值为 0.398 mm, 壁厚分布较其他情况更为均匀合理。

不同预拉伸深度下的壁厚分布情况见图 6, 图中仅列出了拉伸深度分别为 0, 6.5, 12, 25 mm 的 4 种比较典型的情况。

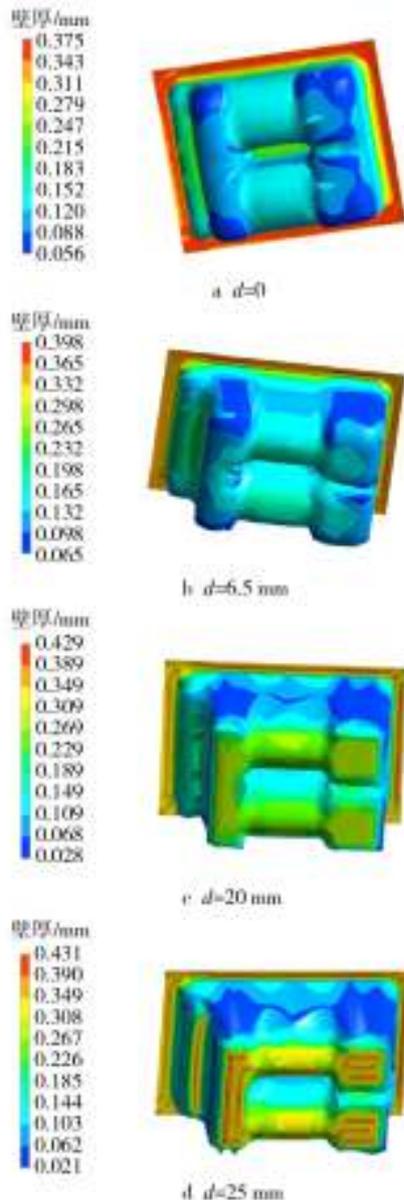


图 6 部分预拉伸深度下的壁厚分布

Fig.6 Distribution of blister thickness at some tensile depths

由图 6 可看出, 当预拉伸深度为 0, 即仅采用简单气压热成型方法时, 壁厚的均匀性很差, 距泡罩口的距离越远壁厚值越小, 模腔底部的壁厚值最小; 而且随模腔深度的增大, 制品底部转角处的壁厚就变得更薄。这是简单气压成型不适于生产深度很大热成型制品的重要原因。并不是拉伸头的预拉伸深

度值越大就越好。由于拉伸头与 PVC 片材之间的摩擦作用, 限制了熔体的流动, 随着预拉伸深度的增加, 促使底部壁厚越来越大。当预拉伸深度等于模腔深度 25 mm 时, 底部片材的壁厚值几乎等于原始片材厚度, 但同时轴向侧壁被施加了很大的拉伸比, 导致侧壁很薄, 最小壁厚只有 0.021 mm, 壁厚分布严重不均。针对不同深度、不同形状的热成型制品, 要采取合适的预拉伸深度, 才能使得制品厚度分布更加均匀合理。该医用泡罩制品的最佳热成型预拉伸深度为 6.5 mm。

3 结语

1) 柱塞辅助热成型过程中, 变形的片材会与模具或拉伸头发生接触, 这些接触会限制片材的运动, 从而影响制品的厚度分布。

2) 有预拉伸成型法 ($d \neq 0$) 相比简单成型法制得的制品壁厚更为均匀, 柱塞辅助热成型法较适合生产深度较大的制品。

3) 拉伸头的预拉伸深度对制品壁厚均匀性的影响很大, 选择合适的拉伸深度很重要。实验中最佳热成型预拉伸深度值为 6.5 mm。

参考文献:

- [1] 黄锐. 塑料工业手册[K]. 北京:化学工业出版社, 2004:91—100.
HUANG Rui. Manual of the Plastics Industry[K]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004:91—100.
- [2] 薛世诚. 片材热成型包装技术[J]. 中国包装, 1990, 10(1): 55—59.
XUE Shi-cheng. Technology of Sheet Thermoformed Packaging[J]. China Packaging, 1990, 10(1):55—59.
- [3] 蔡韵定, 赵岩峰. 热成型包装(上)[J]. 塑料包装, 2009, 19(4):57—59.
CAI Yun-ding, ZHAO Yan-feng. Thermoforming Packaging[J]. Plastics Packaging, 2009, 19(4):57—59.
- [4] AHMED R, LIANG R F, MACKLY M R. Experimental Observation and Numerical Prediction of Planar Entry Flow and Die Swell for Molten Polyethylenes[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1995, 59(2-3):129—153.
- [5] JAY P, PIAU P M, KISSI N E, et al. Reduction of Viscous Extrusion Stresses and Extradite Swell Computation Using Slippery Exit Surfaces[J]. Journal of Non-Newtonian

- Fluid Mechanics, 1998, 79(2-3):599—617.
- [6] 洪亮, 程利伟. 泡罩包装技术分析[J]. 产包装工程, 2008, 29(4):73—75.
HONG Liang, CHENG Li-wei. Analysis of the Blister Packaging Technology[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(4):73—75.
- [7] 孙怀远. 药品软包装发展研究[J]. 包装工程, 2003, 24(2):113—115.
SUN Huai-yuan. Research on the Development of Medicines Soft Packaging[J]. Packaging Engineering, 2003, 24(2):113—115.
- [8] 申长雨, 陈静波, 刘春太. 热成型和吹塑过程 CAE 技术[J]. 模具工业, 2001, 11(9):50—56.
SHEN Chang-yu, CHEN Jing-bo, LIU Chun-tai. The CAE Technology of Thermoforming and blow Molding Process[J]. Die & Mould Industry, 2001, 11(9):50—56.
- [9] 李泽青. 塑料热成型[M]. 北京:化学工业出版社, 2005:58—62.
LI Ze-qing. Plastic Thermoforming[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005:58—62.
- [10] 章建浩. 食品包装学[M]. 北京:中国农业出版社, 2002.
ZHANG Jian-hao. Food Packaging[M]. Beijing:China Agricultural Press, 2002.
- [11] 周中河, 陈少克, 贺长林, 等. 基于 Poflow 的制杯机热成型仿真模拟[J]. 塑料, 2013, 42(5):96—98.
ZHOU Zhong-he, CHEN Shao-ke, HE Chang-lin, et al. Thermoforming Process of Cup Making Machine Based on Polyflow Simulation[J]. Plastics, 2013, 42(5):96—98
- [12] LEE K, MACKLEY M R. The Significance of Slip in Matching Polyethylene Processing Data with Numerical Simulation[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2000, 94(2-3):159—177.
- [13] HUYNH B P. Numerical Investigation of Nonisothermal Extrusion through Annular Dies. International[J]. Journal of Engineering Science, 1998, 36(2):171—188.
- [14] GARCIA-REJON A. Advances in Blow Molding Process Optimization[J]. RAPRA Rev Reports, 1995, 7(10).
- [15] WU Xiang-hong, ZHAO Guo-qun, LUAN Yi-guo. Numerical Simulation and Die Structure Optimization of an Aluminum Rectangular Hollow Pipe Extrusion Process[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 435:266—274.