

塑料挤出吹塑的机理问题^{*}

黄汉雄

(华南理工大学工业装备与控制工程学院, 广州 510640)

摘要:挤出吹塑过程由型坯成型、型坯吹胀与制品冷却三个阶段构成。采用不同的方法对该三阶段的机理问题进行了研究。采用神经网络方法预测了受模口温度和挤出速率影响的型坯成型阶段的膨胀。利用建立起来的神经网络模型预示的膨胀与实验结果很吻合,且可在一定范围内,预示不同工艺条件下型坯的直径膨胀和壁厚膨胀,为型坯的直径和壁厚的在线控制提供了理论依据。基于薄膜近似和 neo-Hookean 本构关系,建立了描述型坯自由吹胀的数学模型,并通过实验方法获得了型坯吹胀的瞬态图象。比较发现,理论预示的型坯轮廓分布与实验观察结果较吻合。该模型还可预示型坯的自由吹胀对材料性能、型坯尺寸和工艺条件等的依赖性。基于 ANSYS 有限元软件,对吹塑制品的三维冷却进行了模拟,预示了制品厚度方向任一位置的瞬态温度分布,并可预示成型工艺参数、制品壁厚、塑料与模具材料的热性能以及吹塑模具冷却的强度与时间等对吹塑制品冷却的影响,这可为进一步分析吹塑制品的显微结构和性能提供温度数据。

关键词:塑料;挤出吹塑;型坯膨胀;型坯吹胀;制品冷却;神经网络方法;有限元方法

吹塑是一种重要且发展很快的塑料成型方法,主要用于成型包装容器,还打入了 10 多年前认为不大可能的工业制件市场,例如,汽车配件(仪表板等)、家电配件、建筑用件与医用配件。吹塑的设备价格较低(约为注塑的 $1/3 \sim 1/2$)、能耗低(注塑中,模具型腔内的压力为 $15 \sim 140 \text{ MPa}$;而吹塑时型坯的吹胀压力一般低于 1 MPa)、适应性强(可成型结构复杂、双壁的制作),它弥补了注塑的不足,成型的工业制件具有高度的整体性,综合性能好,附加值高,成本较低^[1]。

挤出吹塑制品的各种性能与尺寸均与塑料在吹塑过程的各个阶段中所经历的热机械历程紧密相关,这些阶段包括型坯成型、型坯吹胀与制品冷却。因此,很有必要对这三个阶段的机理问题进行研究。吹塑的机理与挤出和注塑的不同,例如其中的型坯吹胀阶段要经受大变形,且涉及几何非线性、材料非线性与接触非线性等。本文采用不同的方法对塑料挤出吹塑三阶段的机理进行研究。

1 型坯膨胀的神经网络预测

型坯成型阶段主要受离模膨胀与垂伸这两种现象的影响。膨胀是因机头内聚合物熔体的非线性粘弹性形变所致,会使型坯的直径与壁厚变大,并相应减小其长度;垂伸的作用效果则与膨胀的

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号 29804004);

作者简介:黄汉雄(1963—),男,博士,教授,博士生导师,院长。主要从事高分子材料机械设计与加工成型的理论和应用的研究。获得中国高校科学技术二等奖、广东省科学技术三等奖和国家霍英东教育基金会“高等院校青年教师奖”等奖励。在国际著名及国内核心刊物上发表论文 50 余篇,获得中国发明专利 1 项,编著《塑料吹塑技术》,参与主编《橡塑成型加工及制品应用手册》(共 11 分册)和“塑料工业手册”——《注塑、模压工艺与设备》分册(“十五”国家重点图书),应邀参与《机械工程手册》(二版)、《塑料工程手册》等五本手册的编写。

相反。这两种相反现象的综合效应决定了型坯吹胀前的尺寸与形状^[1]。

预示型坯吹胀前的尺寸,有利于以最少的原料消耗取得所要求的制品性能。近期,国外学者多采用数值方法(如有限元法^[2,3])对挤出吹塑中的型坯膨胀进行模拟。本文采用人工神经网络方法来预测型坯的膨胀。神经网络特别适用于需要同时考虑许多因素和条件的、不精确的以及模糊的信息处理问题。作者认为,采用神经网络来研究挤出吹塑中的型坯膨胀至少有这些优点:(1)不需或最少的简化假设;(2)不需采用本构方程;(3)可在线预测;(4)较快的响应。

实验装置主要由塑料挤出机、型坯机头与视频图象捕获系统三部分构成。挤出机的螺杆直径为 25mm,机头模口的直径与间隙分别为 15mm 与 2mm,图象捕获系统主要包括彩色摄象机、计算机和视频图象捕获卡。采用的塑料为 HDPE(高密度聚乙烯),牌号 HHM TR-144,美国 Phillips Petroleum Singapore Chemicals 生产,其熔体指数(190/2.16)为 0.18g/10min。如图 1 所示,离开机头模口 L 处型坯的直径膨胀 $S_D = D_p/D_0$,壁厚膨胀 $S_H = H_p/H_0$ 。

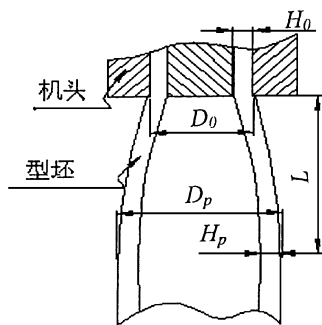


图 1 型坯的膨胀

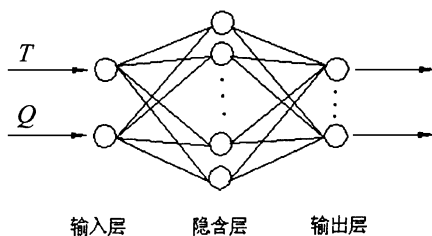


图 2 BP 神经网络模型

采用捕获系统拍摄型坯长度达到 250mm 时的图象。通过分析视频图象,可确定型坯轴向的直径分布,之后根据质量守恒确定型坯轴向的壁厚分布,进而可计算型坯的 S_D 和 S_H 。实验中设定 4 种机头模口温度 T (分别为 160、180、200、220℃)和 7 种挤出速率 Q (分别为 13.4、18.0、22.0、26.2、29.2、33.2、37.4g/min),由此共得到 28 组数据,即 28 组在不同工艺条件下型坯的直径膨胀和壁厚膨胀数据。

利用 BP 网络预测型坯成型中在有垂伸影响下的膨胀。神经网络选为 $2 \times 20 \times 20$ 的三层结构(见图 2),其中输入层的两个节点分别为 T 和 Q ;隐含层的 20 个节点根据学习过程中的实际情况调整得以确定;输出层的 20 个节点分别为自机头模口始 250mm 长度上型坯 20 个微小段的 S_D 或 S_H 。

上述实验获得的 28 组数据作为样本提供给神经网络,而样本分为训练样本(20 组)和测试样本(8 组)。网络的训练采用加入动量项的改进 BP 学习算法,其中学习率在学习过程中不断被调整。训练后 20 个训练样本的总误差平方和为 0.001。

训练后的神经网络确定了型坯的 S_D 或 S_H 和 T 和 Q 之间的关系,利用这一关系可以根据输入的测试样本中的工艺条件得出相应的型坯膨胀,以对神经网络进行检验。图 3 显示了 T 为 180℃、 Q 为 22g/min 时型坯的 S_D 。可见,神经网络预测值和实验值两者相当吻合,这证明了神经网络的预示是可靠的。

经训练,检验而建立的神经网络可在一定范围内,根据任意输入的 T 和 Q 以同样高的精度预

示型坯的 S_D 和 S_H 。图 4 所示为改变 Q 时神经网络预示的型坯的 S_D 。这样,可分析不同工艺条件下型坯的膨胀,而不需再做更多的实验,这不仅节约了时间和实验费用,也为型坯的直径和壁厚的在线控制提供了理论依据。

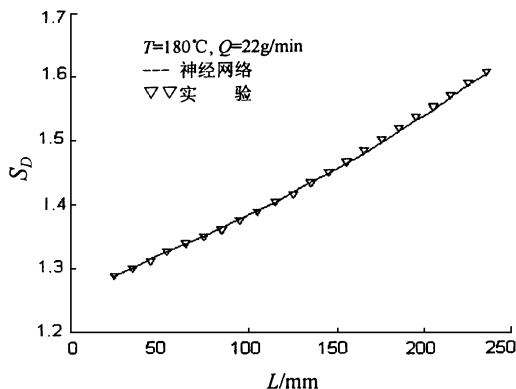


图 3 沿型坯轴向的直径膨胀(S_D)

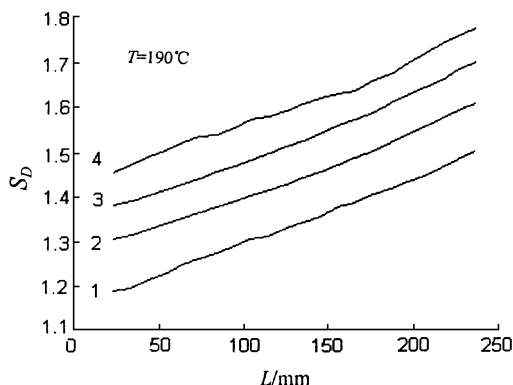


图 4 由神经网络方法预示的
型坯直径膨胀(S_D)
 $Q(\text{g/min})$: 1.11; 2.24; 3.31; 4.39.5

2 型坯自由吹胀轮廓的预测

吹胀阶段型坯的胀大与变薄性能会影响制品的壁厚分布与机械性能。

前人较多采用有限元法来模拟型坯的吹胀^[4,5]。本文基于薄膜近似和 neo-Hookean 本构关系来建立描述型坯自由吹胀的数学模型。考虑如图 5 所示的环形型坯的自由吹胀。假设型坯为各向同性且不可压缩的,其具有均匀的半径和壁厚。基于薄膜近似和 neo-Hookean 本构关系,作者建立了描述挤出吹塑中型坯自由吹胀的数学模型^[6]:

$$d\tilde{r}/d\tilde{x} = \text{Stg} \theta \quad (1)$$

$$\frac{d\theta}{d\tilde{x}} = S \frac{(\tilde{r}/\lambda_1 - 1/\lambda_1^3 \tilde{r}^3)/\tilde{r} - \Delta P r_0/h_0 G \cos \theta}{\lambda_1/\tilde{r} - 1/\lambda_1^3 \tilde{r}^3} \quad (2)$$

$$\frac{d\lambda_1}{d\tilde{x}} = \text{Stg} \theta \left[\frac{\tilde{r}}{\lambda_1} - \frac{3}{\lambda_1^3 \tilde{r}} \right] / \left[1 + \frac{3}{\lambda_1^4 \tilde{r}^2} \right] \quad (3)$$

采用打靶法求解耦合的非线性差分方程组(1)~(3),可得出型坯自由吹胀的轮廓分布。

在实验方面,采用视频图象捕获技术和透明的矩形吹塑模具(型腔尺寸为 $75 \times 70 \times 60 \text{ mm}$),获得了模具型腔内型坯吹胀的瞬态图象。采用的塑料为韩国石化公司的吹塑级 HDPE,牌号 B303。

图 6 示出了理论所预测的不同瞬态吹胀压力下型坯自由吹胀的轮廓分布。可见,起初时吹胀速率较慢,但随吹胀压力的提高,吹胀速率随之增加。此外,型坯中部的吹胀速率要比两端的大得多,且在很低的吹胀压力(约为 20 kPa)下即与模具型腔接触。

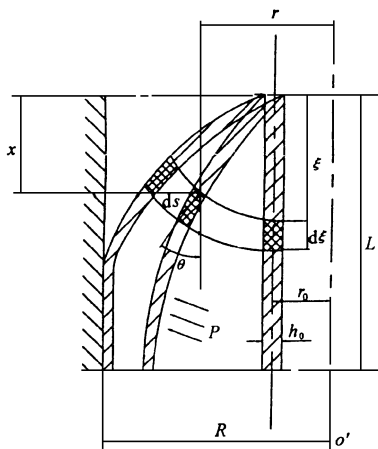


图 5 型坯自由吹胀的物理模型

图 7 为实验所观察的不同吹胀时间下型坯自由吹胀的瞬态图象。与图 7 对应的型坯轮廓分布示于图 6 中。可见,理论预示的型坯轮廓分布与实验观察结果较吻合。

根据数学模型(1)~(3),可预示材料性能(如弹性模量)、型坯尺寸(如起始壁厚)和工艺条件(如吹胀压力)等对型坯自由吹胀的影响。图 8 显示了型坯中截面半径(r_m)对材料弹性模量(G)的依赖性。可见, G 的降低有助于型坯的吹胀。

利用上述的数学模型,还可预示型坯自由吹胀阶段的局部位伸比、轴向与周向的局部应力分布以及壁厚分布。

3 制品冷却的有限元模拟

制品的冷却时间占塑料挤出吹塑成型周期的 60% 以上,因此,提高制品的冷却效率,可提高生产率、降低能耗。冷却速率是吹塑制品壁内形成的晶体结构形态的主要影响因素之一,其少量变化就会导致晶体生长从而制品机械性能有较大变化^[1]。因此,不少学者^[7~9]对吹塑制品冷却的机理开展过研究。

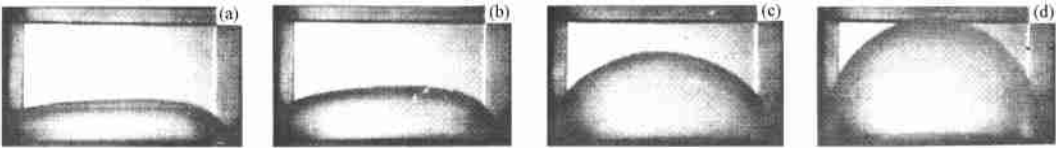


图 7 实验观察的不同吹胀时间(t)下型坯自由吹胀的瞬态图象
 t (s): (a)0.0667; (b)0.1; (c)0.3667; (d)0.5333

本文基于 ANSYS 有限元软件平台,对挤出吹塑制品的三维冷却过程进行模拟和分析。所研究的吹塑制品的形状如图 9 所示(因对称性,图中只给出其一半)。在作合理假设的基础上,吹塑制品冷却过程中的瞬态传热方程可简化为:

$$\rho \frac{\partial H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \tag{4}$$

结合边界条件和初始条件,利用 ANSYS 软件可求解方程(4)。采用智能单元尺寸与缺省单元尺寸相结合的方法对几何模型进行自由网格划分,并确认所划分的网格中无错误或坏的。网格划分后制品(图 9)的单元数为 9831,节点数为 19813。然后加载求解,并进行后处理。

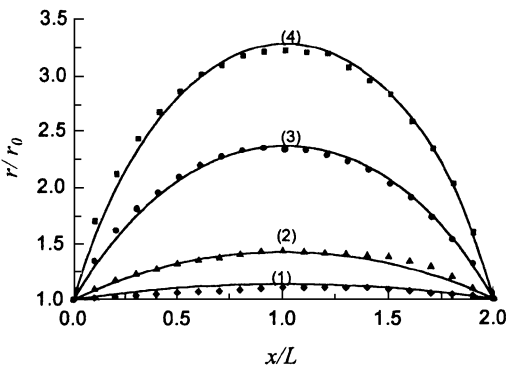


图 6 型坯自由吹胀的轮廓分布
线段表示理论预示;瞬态压力(kPa):
(1)0.01, (2)1, (3)10, (4)20;符号表示实验结果:
吹胀时间(s): ◆0.0667; ▲0.1; ●0.3667; ■0.5333

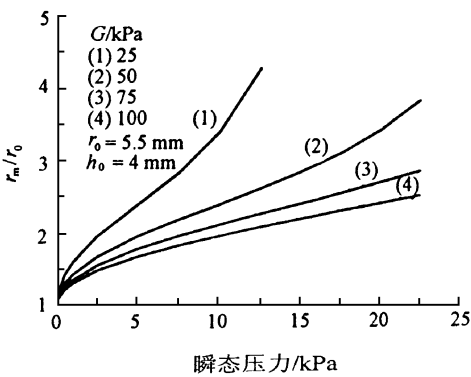


图 8 材料弹性模量(G)对型坯中截面半径(r_m)的影响

模拟采用的塑料为 HDPE, 其密度 (ρ)、热导率 (k) 和焓 (H) 均为温度的函数; 模具的材料为普通钢, 其密度、热导率和比热容均为常数。制品的初始温度为 180°C , 吹胀空气的温度为 30°C , 模具的温度为 30°C 。假设瓶体厚度为 2.5mm , 瓶颈和瓶底的厚度为 3.5mm 。

通过模拟, 可得出吹塑制品冷却过程中不同时刻、不同位置的温度分布。图 10 示出了瓶体部分距其外表面不同位置的温度分布曲线。可见, 靠近制品外表面的冷却速率明显比靠近内表面的高。图 11 所示的为冷却过程中不同时刻沿制品壁厚方向的温度分布。可见, 随着冷却的进行, 制品壁厚方向的温度分布趋于均匀。

还可研究成型工艺参数、制品壁厚、塑料与模具材料的热性能(热导率、焓等)以及吹塑模具冷却的强度与时间等对吹塑制品冷却过程的影响。

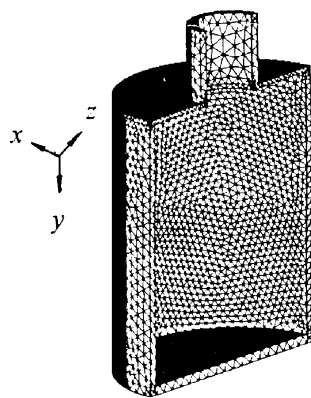


图 9 制品冷却分析的有限元模型

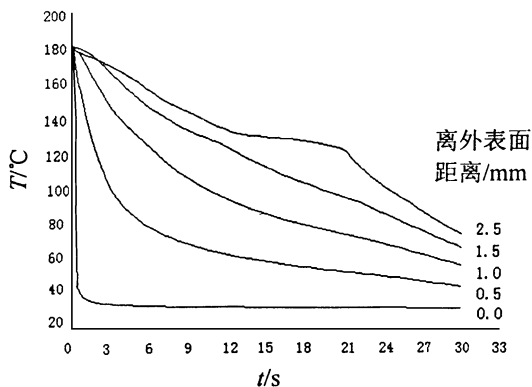


图 10 制品壁厚方向不同位置的瞬态温度分布 (T)

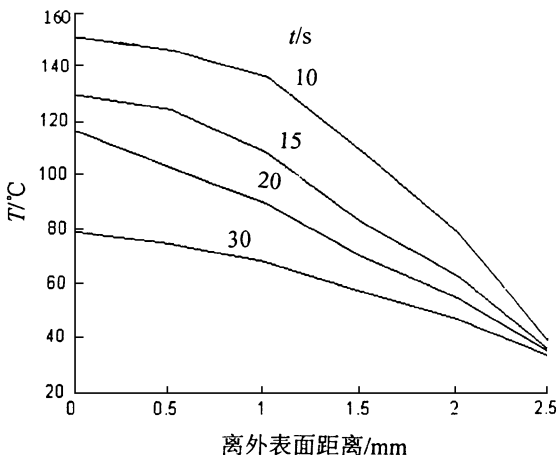


图 11 不同时刻 (t) 沿制品壁厚方向的温度分布 (T)

4 结论

本文采用不同的方法对塑料挤出吹塑过程的型坯成型、型坯吹胀与制品冷却三个阶段的机理问题进行了研究。

(1) 将神经网络方法引入型坯成型阶段的膨胀的研究中, 确定了型坯膨胀与工艺条件(机头模口温度和挤出流量)之间的定量关系。利用建立起来的神经网络模型预示的结果与实验结果很吻合, 且可在一定范围内, 预示不同工艺条件下型坯的直径膨胀和壁厚膨胀, 为型坯的直径和壁厚的在线控制提供了理论依据。研究表明, 将神经网络方法应用于受多因素影响的型坯成型阶段的研究是有效的, 很值得作深入研究。

(2) 基于薄膜近似和 neo-Hookean 本构关系, 建立了描述型坯自由吹胀的数学模型, 并通过实验方法获得了型坯吹胀的瞬态图象。比较发现, 理论预示的型坯轮廓分布与实验观察结果较吻合。型坯中部的胀大速率要比两端的大得多, 且在很低的吹胀压力(本研究约为 20kPa) 下即与模具型

腔接触。本研究还可预示型坯的自由吹胀对材料性能、型坯尺寸和工艺条件等的依赖性。本文建立的数学模型还可用于预示型坯自由吹胀过程中局部的拉伸比、轴向与周向的局部应力分布以及壁厚分布。

(3)采用有限元法对吹塑制品的冷却阶段进行了模拟,预示了制品厚度方向任一位置的瞬态温度分布,并可预示成型工艺参数、制品壁厚、塑料与模具材料的热性能以及吹塑模具冷却的强度与时间等对吹塑制品冷却阶段的影响,这可为进一步分析吹塑制品的显微结构性能(取向度、结晶度、密度、残余热应力)和最终性能提供温度数据。

参考文献:

- [1] 黄汉雄. 塑料吹塑技术. 北京: 化学工业出版社, 1996.
- [2] Otsuki Y, Kajiwara T, Funatsu K. Polym Eng Sci, 1999, 39(10): 1969.
- [3] Tanoue S, Kajiwara T, Iemoto Y, Funatsu K. Polym Eng Sci, 1998, 38(3): 409.
- [4] Diraddo R W, Garcia-Rejon A. Polym Eng Sci, 1994, 34: 1080.
- [5] Debbaud B, Marchal T. SPE ANTEC Tech Papers, 1997, 43: 802.
- [6] 黄汉雄, 杨晓松. 华南理工大学学报, 2000, 28(10): 47.
- [7] Diraddo R W, Garcia-Rejon A. SPE ANTEC Tech Papers, 1994, 40: 1042.
- [8] Bradean R, Ingham D B, Heggess J. Plast Rub Comp Proc Appl, 1998, 27: 65.
- [9] Laroche D, Kabanemi K K, Pecora L, Diraddo R W. Polym Eng Sci, 1999, 39: 1223.

Mechanism of Plastics Extrusion Blow Molding

HUANG Han-xiong

(College of Industrial Equipment and Control Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The plastics extrusion blow molding process consists of three stages, i.e., parison formation, parison inflation, and part cooling. In this paper, the mechanism of these three stages was studied using different methods. Neural network method was used to investigate the parison swell affected by the die temperature and extrusion flow rate. The comparison of the experimentally determined parison swell of high density polyethylene with the predicted ones using the neural network model showed very agreement between the two. The parison swell can be predicted at different processing conditions from the neural network model. A mathematical model based on the thin membrane approximation and neo-Hookean constitutive relations was used to describe the parison free inflation. The instantaneous images of parison inflation within a mold cavity were obtained by employing a video capture technique. The theoretically predicted parison growth profiles are found to be in good agreement with the experimental measurements. Based on the ANSYS finite element software, three-dimensional cooling of blow molded part was investigated. The transient temperature profiles at various locations across the thickness of part can be predicted. The influence of the major operating variables, part thickness, and the thermal properties of plastics and mold materials on the cooling of parts can also be predicted.

Key words: Plastics; Extrusion blow molding; Parison swell; Parison inflation; Part cooling; Neural network method; Finite element method