

注射拉伸吹塑模拟及相关技术的研究方法^{*}

刘吉虎^{1,2} 黄汉雄¹ 黄有发¹ 尹沾松¹

(1.华南理工大学工业装备与控制工程学院,广州 510640; 2.桂林电子工业学院机电系,桂林 541004)

摘要 简介注射拉伸吹塑模拟的一般思路,对国外拉伸吹胀阶段数值模拟的研究进展进行了全面的阐述。认为在注射拉伸吹塑模拟时不宜将某种材料模型绝对化,有必要建立一个合理的型坯吹胀破裂判断标准;结晶取向和应变硬化现象的微观模拟与宏观成型过程的数值模拟相结合是今后研究的方向和难点。

关键词 注射拉伸吹塑 吹胀 模拟 方法

拉伸吹塑又称双轴取向吹塑,是在高弹态下通过机械手段轴向拉伸型坯、用压缩空气径向吹胀(拉伸)型坯成型包装容器的方法。双轴取向最大取向度可达未取向的18倍,能提高制品的刚性,同时也可提高透明性^[1]。按型坯的成型方法,拉伸吹塑分为挤出拉伸吹塑和注射拉伸吹塑两种,笔者主要讨论注射拉伸吹塑。

注射拉伸吹塑制品的性能受多种因素的影响,与吹塑所用的聚合物材料性能、型坯温度及其分布、型坯大小和壁厚分布、吹胀气压、拉伸速度、拉伸速度与吹胀气压的相互时序、成型加工条件、冷却时间,以及操作工人的熟练程度等密切相关。到目前为止,国内外绝大多数注射拉伸吹塑制品还是依靠试凑法来估算最终壁厚分布,致使实验周期长、成本高^[2]。三维CAD实体和表面造型软件可建立复杂的几何体,确定质量特征和加工途径,再通过快速原型制造系统制造出与实物大小一样的各种材料模型。虽然这种方法能够减少试凑法的弊病,缩短设计周期,但还是无法制造出双轴定向的聚对苯二甲酸乙二酯(PET)原型。而采用数值分析的方法能准确地模拟成型过程,这对优化工艺、模具,获得高性能制品具有重要意义。国外研究者近几年对吹塑成型过程的数值模拟进行了不少研究工作,但对注射拉伸吹塑的研究还较少,仅R. W. Diraddo等^[3]于1997年对其全过程进行了模拟。相对于型坯加热和制品冷却两个阶段,拉伸吹胀阶段的研究则更少且最难,而这个阶段的成型却直接影响制品的外形、壁厚均匀性及制品性能,是整个成型过程的关键环节。为此笔者对注射拉伸吹塑(尤其是拉伸吹胀阶段)数值模拟的方法和国外有关研究进展作一介绍,并探讨其发展趋势。

1 模拟的一般思路和假设

注射拉伸吹塑一般用有限差分法(FDM)和有

限元法(FEM)模拟^[4,5]。

FDM的基本思想是用离散的只含有限个未知数的差分方程去代替连续变量的微分方程和定解条件,即给出其基本方程的逐点近似值(差分网格上的点)。其缺点是对于不规则的几何形状和不规则的特殊边界条件难于应用。

FEM的基本思想是分段近似,它是以变分原理和剖分差值作为基础的方法。把求解区域看作由许多小的在节点处互相连接的子域(单元)所构成,其模型给出基本方程的分片(子域)近似解。由于单元(子域)可以被分割成各种形状和大小不同的尺寸,所以它能很好地适应复杂的几何形状、复杂的材料特性和复杂的边界条件。从结构力学中发展起来的FEM,现在已是各种科学问题(远不限于力学)的基本算法之一^[6]。

过去分析计算的模拟思路一般是“数学模型+计算及编程求解”,现在通常是“有限元计算模型+有限元计算软件”。目前著名的大型有限元软件有:ABAQUS、MARC、ANSYS、SAP、SAP84、SAP90、SuperSAP、ADINA、NASTRAN、COSMOS等。UG和PRO/E也带有有限元分析模块。

西方国家研究者^[2,4]在上世纪80年代末到90年代初对吹塑/拉伸吹塑进行3D-FEM模拟时一般将模型假定为薄壳结构,绝大部分是用基于橡胶态材料理论的非线性高弹态本构方程;或采用牛顿型粘弹态的液态本构方程且受限于2D模拟。近期则倾向于粘塑态和粘弹塑性的非牛顿型模型。在注射拉伸吹塑建模时,对轴对称件一般取其1/4的模型进行模拟,瓶底的非对称部位一般忽略不计。模拟一般不包含型坯的夹紧部位和底部。型坯和模具的

^{*} 国家自然科学基金资助项目(20274012)

收稿日期:2003-09-16

接触一般视为粘接触。

2 建模

F. M. Schmidt 等^[5,7,8]对注射拉伸吹塑的拉伸吹胀过程进行了实验研究和数值模拟, 试验采用的拉伸吹塑模具配备有力传感器、热电偶、压力传感器及若干接触传感器等。在测量拉伸吹胀过程中型坯内部压力变化的基础上, 结合空气热动力学, 首次建立了型坯内部吹胀气压的变化方程。并假设型坯为不可压缩的 Oldroyd B 型粘弹性流体, 在型坯所占据的域 Ω 上建立了热力学平衡方程组:

$$\rho(\vec{\gamma} - \vec{g}) = \nabla \cdot \underline{\underline{\sigma}}, \quad \underline{\underline{\sigma}} = -p' \underline{\underline{I}} + 2\eta \underline{\underline{\dot{\epsilon}}} + \underline{\underline{\tau}} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \underline{\underline{v}} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\delta \tau}{\delta \underline{\underline{\epsilon}}} + \lambda \frac{\delta \tau}{\delta \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}} = 2\eta \underline{\underline{\dot{\epsilon}}} \quad (3)$$

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \underline{\underline{\sigma}} : \underline{\underline{\dot{\epsilon}}} \quad (4)$$

方程(1)~方程(3)是力学平衡方程, 用定点迭代法计算直到收敛; 域 Ω 用一组六节点的等参三角形单元划分网格; 方程(4)是热平衡方程, 用 Galerkin 法求解。

数值模拟结果有许多与实验结果相吻合。如拉伸吹胀过程中型坯内部气压呈现类似驼峰状的三个不同阶段的变化: 未吹胀阶段的气压急剧升高、型坯体积增加阶段的气压下降和由双轴拉伸引起结晶而导致的应变硬化阶段的气压再次升高。

S. Wang 等^[2]对注射拉伸吹塑进行了等温的三维粘塑性有限元模拟。粘塑性模型与超弹性模型相比, 有两方面的优点: 一是引入粘度可衡量真实的成型时间; 二是可采用各向异性的本构模型。

他们把 PET 型坯底部设计成类似于拉伸杆头部的形状使其几乎不发生形变, 进行了 3 种情况的 FEM 模拟。第一种是吹胀型坯而没有拉伸; 第二种是先把型坯拉伸至模腔底部, 然后吹胀; 第三种是在拉伸杆到达模腔底部之前就开始吹气, 即在型坯轴向拉伸一定长度后便开始径向吹胀。第一种情况下, 大部份材料在吹胀早期就接触了模腔, 70% 以上的材料与模具表面总面积的 40% 接触, 由于假定型坯的节点在接触模具表面后被粘住, 因而剩余的 30% 材料将进一步形变分布到还未接触的模具表面。这样, 所成型的容器壁厚分布明显不均匀。第二种情况下, 型坯的上部和底部首先开始胀大, 类似哑铃状, 最后在两胀大区的汇合处产生褶皱线。第三种情况最好, 得到非常光滑的变形模型: 胀大最初

在型坯的上部发生, 然后逐渐扩展到型坯底部, 但底部胀大速度低于上部, 避免了褶皱现象。

笔者对第二种情况的实验结果是, 型坯在中部附近很薄且容易吹破, 与 S. Wang 的研究结果不同。

S. Wang 等还对褶皱现象进行了深入分析, 认为型坯的初始形状对变形模式起了关键性的作用, 大环的形变快于小环, 型坯的初始半径比初始厚度重要的多。在吹胀前由于型坯的半径不同引起的褶皱现象会随材料应变敏感的特性而有所变化。他们提出在未来研究中应考虑应变硬化现象, 但没有考虑非等温条件。

J. P. McEvoy 等^[4]用 ABAQUS 软件对拉伸吹胀过程进行了模拟, 并以生产线上的产品进行了验证。模拟的瓶子分两种, 对应的型坯质量分别为 16.5 g 和 48 g, 容积分别为 1/3 L 和 2 L。假设型坯处于一恒定温度, 材料为等温的、粘弹塑性模型, 分别用立体元和壳单元分两种情况进行了研究。第一种情况为无拉伸杆动作的吹胀情形。这时壳单元的壁厚预测精度低于立体元, 但分析时间较短且能快速方便地获取瓶子壁厚的近似值。实验测得的瓶子壁厚分布很均匀, 这是由于 PET 应变硬化的结果。在模拟时, 若是在 $0.05 \sim 4 \text{ s}^{-1}$ 应变速率下, 即使整个壁部不断减薄和有非常高的轴向应变也不能达到应变硬化。但如果是在与吹塑试验相当的高应变速率下, 则可预测应变硬化, 从而得到较均匀的壁厚。实验发现型坯首先在距上部约 1/3 处接触模腔, 然后向两个方向扩展。FEM 模拟的肩部壁厚约是试验的 2 倍。第二种情况是有拉伸杆拉伸的吹胀情形。实验发现型坯在中部附近首先接触模腔, 而模拟的结果则几乎是肩部先接触模腔。模拟时成型颈部和肩部的用料只稍微少于实验用料, 但侧部用料多于实验用料。拉伸杆时序的变化会影响型坯轴向延伸。在模拟时, 若拉伸杆先于预吹胀动作, 则瓶底厚; 反之, 则瓶顶厚。在生产中, 若预吹胀先于拉伸杆, 则会有很多的材料积聚于颈肩部。拉伸杆的运动周期从 1 s 增加到 2 s 时, 吹胀和预吹胀在模拟的早期阶段对材料分布的影响相对更重要, 但如果拉伸杆动作滞后于吹气, 则吹气的影响就要弱一些, 这有益于改善颈肩部的过厚。

J. P. McEvoy 等还研究了型坯质量对瓶子壁厚的影响。将质量分别为 42 g 和 48 g 的型坯在同等条件下进行了模拟(42 g 的型坯长度较小、直径较大), 发现 42 g 型坯成型的瓶子壁厚分布比 48 g 的

要均匀,表明前者发生了较大程度的应变硬化效应,提高了阻渗性能。

L. Chevalier^[9]还研究了 PET 拉伸吹胀时机械拉伸对微观结构变化的影响,认为流变参数的变化取决于由拉伸导致的结晶率,材料结构的变化又产生粘度变化。拉伸杆与型坯底部的接触同局部的高温场一样会导致剪切变形。提出了一个单独反映结晶率变化的初步模型,但没有将它应用到模拟变形中。事实上,常速下不能预测应变硬化。宏观粘度受结晶影响,随着结晶度的增加,拉伸 PET 变得困难。

3 结晶和取向研究

Chandran 等^[10]对 PET 的同步双轴取向和逐步双轴取向两种方式引起的形态和性能变化进行了比较研究。实验发现:(1)在相同的拉伸率下,逐步方式中的单轴受约束取向的样本密度总是高于双轴拉伸取向的样本密度。(2)首次拉伸时,样本拉伸率高的部位比低的部位密度高;如果样本第一次拉伸率小于等于 2.5,则在第二次拉伸时密度会急剧增加;第一次直接拉伸时,若拉伸率大于 2.5,则第二次拉伸时的样本密度维持在较高的水平,没有多大变化。(3)等双轴拉伸下,有媒介平坦拉伸时逐步方式的样本密度高于同步方式的密度。这种逐步方式会发生应变诱导的结晶,而同步方式则不会。(4)非等双轴拉伸下在其它条件相同时,逐步方式拉伸的样本密度比同步方式的要高;两种方式的密度差别随着初次拉伸方向上有限的拉伸率的提高而增大;相对同步方式而言,假若主要拉伸是首次完成且大于临界拉伸率,则逐步方式的拉伸可得到较优的物理性能。

F. H. Axtell 等^[11]设计了一种专用的拉伸流变仪对均聚 PET 的拉伸吹胀进行了研究。结果表明,较高的吹胀气压会加速应变诱导的结晶。

牛津大学的 A. M. Adams 等^[12]为了解注射拉伸吹塑过程中结晶、取向与应变硬化的关系,通过专用的双轴拉伸试验机对 PET 薄膜在双轴热拉伸下应变硬化的测量和建模作了较深入的研究,得出了定宽拉伸和等双轴拉伸的 PET 橡胶态缠结网络的应力-应变关系,它有助于在较高温度下量化受限于网络变形中的缠结滑动。包含 14 个参数的本构模型能够通过温度分布来获取和提高应变硬化的效应:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{\gamma} \sigma_i^e - \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \sigma_j^e + \frac{1}{\lambda_i^n} \sigma \sum_{j=1}^3 C_{ij}^e \frac{d\sigma_j^e}{dt} \quad (i = 1 \cdots 3) \quad (5)$$

式中: λ_i ——综合粘度;

C_{ij}^e ——正切构象从属矩阵 C^e 的元素, C^e 与正切构象刚度矩阵有关;

σ_i^e, σ_j^e ——与构象自由能密度、拉伸张量有关。

该三维本构模型对 PET 的双轴热拉伸数值模拟比较成功,不足之处是把粘弹性简化成两个单一的时间松弛过程,且没有考虑试验机的精度。

4 国内外现状及深化研究方向

国外对注射拉伸吹塑的模拟研究较其它塑料成型方面的模拟研究相对较少,现已形成个别商品化软件,国内则刚刚起步。材料模型的假设经历了弹性、粘弹性、超弹性、粘塑性和粘弹塑性 5 种形态,其中超弹性模型用得最广。笔者认为不能将某种形态绝对化,因为事实上型坯温度并不均匀且同时也在变化,这些形态都是在重力、压力和其它机械力如气压、拉伸杆牵引力的作用下表现出来的。这些假设各有利弊,且其它条件也相互制约,因而得到的本构方程不同。

由于数学方法和计算机运算能力的限制,同 FEM 中的网格划分一样,节点元运动和时间增量也是分段连续的,不能无限细分。注射拉伸吹塑的数值模拟评估最重要的特征是与实验相吻合,其次就是模拟计算时 CPU 耗费的时间。目前的 FEM 模型对型坯胀大没有一个破裂判断标准,这可能会使最后结果无用的计算不自主地持续下去^[2],因而在计算过程中,建立一个合理的破裂判断标准很有必要。

型坯和模具的接触一般视为粘接触,对滑动接触的研究尚未展开。接触算法的研究有许多是从比较成熟的类似学科(如金属成型和其它材料的变形研究)中得到启发的^[13]。接触算法研究的主要目标是提高模拟的精度和减少计算时间。

目前有些外国学者已开始致力于注射拉伸吹塑中的结晶取向和应变硬化现象研究,但还未与宏观成型过程的数值模拟相结合。为了更好地了解材料的力学性能,既需要在宏观层次上又需要在细观、甚至微观层次上进行模拟研究,但是如何将不同层次的现象联系起来还是一道难题。

目前拉伸吹塑成型软件少之又少的原因,除了影响拉伸吹塑的因素复杂和需很强的实验环节外,与专业人员缺乏也有很大关系。正如 SAP84 的组

织开发者袁明武所说,一个大型通用有限元程序系统的开发需要硕士以上水平的 15 ~20 人合作 5 ~10 a,但维护和培训、销售和售后服务,就需要一支 25 ~30 人的队伍连续工作 5 ~10 a^[14]。因此建设一支高质量的稳定的队伍也是开发注射拉伸吹塑软件的关键。

参考文献

1 Caldicott R J. The basics of stretch blow molding PET containers. *Plast Eng*, 1999, 55(1) : 35

2 Wang S, Makinouchi A, Nakagawa T. Three-dimensional viscoplastic FEM simulation of a stretch blow molding process. *Adv Polym Tech*, 1998, 17(3) : 189

3 Diraddo R W, Laroche D, Aubert R, et al. SPE ANTEC Tech Papers. 1997.

4 McEvoy J P, Armstrong C G, Crawford R J. Simulation of the stretch blow molding process of PET bottles. *Adv Polym Tech*, 1998, 17(4) : 339

5 Schmidt F M, Agassant J F, Bellet M, et al. Viscoelastic simulation of PET stretch/blow molding process. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 1996, 64(1) : 19

6 郑哲敏,周恒,张涵信,等. 21 世纪初的力学发展趋势. *力学进展*, 1995, 25(4) : 433

7 Schmidt F M, Agassant J F, Bellet M. Experimental study of the injection stretch/blow molding process. 189/ANTEC '97, 1997, 8 170

8 Schmidt F M, Agassant J F, Bellet M. Experimental study and numerical simulation of the injection stretch/blow molding process. *Polym Eng Sci*, 1998, 38(9) : 1 399

9 Chevalier L. Influence of microstructure evolution on mechanical strength of blown poly(ethylene terephthalate) . *Plast Rubber Compos*, 1999, 28(8) : 385

10 Chandran, Prashant, Jabarin, et al. Biaxial orientation of poly(ethylene terephthalate) . Part III: Comparative structure and property changes resulting from simultaneous and sequential orientation. *Advances in Polymer Technology*, 1993, 12(2) : 153

11 Axtell F H, Haworth B. Elongational deformation and stretch blow moulding of poly(ethylene terephthalate) . *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*, 1994, 22(3) : 127

12 Adams A M, Buckley C P, Jones D P. Biaxial hot drawing of poly(ethylene terephthalate): measurements and modelling of strain-stiffening. *Polymer*, 2000, 41(2) : 771

13 Wang S, Makinouchi A. Contact search strategies for FEM simulation of the blow molding process. *Int J Numer Meth Eng*, 2000, 48(4) : 501

14 庄逢甘. 现代力学与科技进步. 北京: 清华大学出版社, 1997. 550

RESEARCH METHODS OF INJECTION STRETCH-BLOW MOLDING MECHANISM AND CORRELATIVE TECHNOLOGY

Liu Jihu^{1,2}, Huang Hanxiong¹, Huang Youfa¹, Yin Zhansong¹

(1. College of Industrial Equipment and Control Eng., South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Department of Electronic Machinery and Transportation Engineering, Guilin Institute of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

ABSTRACT The general thought of the simulation of the injection-stretch-blow molding(ISBM) is introduced and the advance in the research of the numerical simulation of the stretch-blow molding abroad is reviewed. It points out that it is unsuited for certain material model to be absolutized, and is necessary to find a reasonable judgement standard of the parison being broken. Combining the microcosmic simulation of the crystallization, orientation and strain-stiffing with that of macroscopical process is the research direction and difficulty in the future.

KEYWORDS injection-stretch-blow molding, blow-up, simulation, method

杜邦公司将扩大高性能 PA 系列生产规模

由于市场对杜邦 Zytel HTN 高性能聚酰胺(PA) 树脂的需求与日俱增,杜邦工程塑料公司将建设一个全新的厂房以扩大其生产规模。新设施的年产量达 1.4 万 t, 预计在 2004 年底投产。届时此种高性能 PA 的生产规模将比目前提高 2 倍以上,此举将加强和促进高性能 PA 在全球市场上的持续发展。据称,这种高性能 PA 正在不断拓展其市场占有率,将代替金属和热固性塑料,原因是它的性能卓越,既具有优异的模塑特性,同时在严峻环境条件下又拥有极佳的强度、刚性、韧性和非常出色的尺寸稳定性,且耐高温、潮湿及化学药品。这种材料的应用范围非常广泛,制品主要为汽车燃料阀门和冷却系统零件、表面安装电路元件、烤炉风扇、热

水器的多支管及电源变压器的零部件等。(徐响)

德国推出聚碳酸酯车窗系统

德国 Bayer 聚合物和美国 GE 塑料公司合资的 Exatec 公司最近推出了全球第一个进入市场的聚碳酸酯(PC) 汽车窗体系 Exatec 500, 该体系具有杰出的耐候性和耐磨性。

Extec 公司的开发研究包括设计、加工成型、装璜、抗紫外辐照、等离子涂层、连接等生产工艺和 PC 窗的组装。该公司还开发出除霜用加热元件,并准备发放技术许可证。据称,采用 PC 汽车窗可以革新窗的设计和安装位置,以及开启窗户的机械系统,加之 PC 窗重比替代材料轻得多,在汽车发生碰撞事故时窗户不会伤及人员等优点,因此推广前景看好。(伟家)