

文章编号 1004-924X(2008)02-0270-09

微热压印过程中聚合物流动形貌的研究

贺 永, 傅建中, 陈子辰

(浙江大学 机械工程系 微系统研究与发展中心, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为研究模具结构对聚合物流动形貌的影响, 利用 Deform-2D 对微热压印成型过程进行了有限元模拟。系统地研究了模具占空比、宽厚比、阴模、阳模及不对称结构对聚合物流动形貌的影响。模拟结果显示, 随着占空比的减小, 聚合物截面流形从单峰过渡到双峰, 从陡峭过渡到平坦, 当宽厚比 > 1.5 时, 截面流形开始表现为双峰形式, 其仿真结果和相关实验结果吻合。和阳模压印时没有明显的高度差相比, 使用阴模压印时, 微结构之间存在较大的高度差。针对压印过程易出现的填充效率不佳, 提出了模具拓扑结构优化策略, 通过在模具边缘布置一些流动坝, 达到降低边界处聚合物流动率, 促进聚合物有效填充的目的。仿真结果表明, 该优化策略对促进聚合物填充具有很好的效果。

关键词: 热压印; 流动形貌; 拓扑优化; 有限元法

中图分类号: TN405 **文献标识码:** A

Study on polymer flow profile in micro hot embossing

HE Yong, FU Jian-zhong, CHEN Zi-chen

(*Department of Mechanical Engineering, Microsystem Research and Development Center, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

Abstract: To find the relationship between the mold structure and the flow profile, the Deform-2D code was used to simulate the micro hot embossing process. The effect of the mold duty ratio, Ratio Of the mold Width to the polymer Thickness (ROWT), concave mold, convex mold and the non-symmetric mold on the polymer flow profile was systematically studied. The numerical simulation results show that the flow profile of the polymer changes from single peak to dual peak, from craggedness to flatness with the decrease of the duty ratio. When ROWT is more than 1.5, the flow profile becomes dual peak. The simulation results are verified by the relative experiments. Compared with the results of nearly no pattern height difference when the convex mold is used, the micro pattern height has distinct difference when the concave mold is used. The strategy of topology optimization of mold structures was proposed to improve the polymer filling efficiency. With the help of some flow barriers located at the edge of the mold, the polymer flow speed at the boundary can decrease and the effective filling will be enhanced. The numerical simulation results show that this optimization strategy can accelerate the polymer filling speed in hot embossing.

Key words: hot embossing; flow profile; topological optimization; finite element method

收稿日期: 2007-08-30; 修订日期: 2007-09-30.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2002AA421150); 国家教育部博士点基金资助项目 (No. 20030335091)

1 引言

热压成型方法复制微纳米结构具有成本低、效率高、可以并行操作等显著优点,已成为微纳米结构加工的一项主要技术^[1-3]。热压印过程作为一个典型非封闭模腔的压缩过程,为了避免材料在上下模间流动失控,要求材料在一个相对较低的温度下进行稳态流动。压印时聚合物的流动形貌将直接影响其转印后的轮廓忠实度,只有深入理解聚合物流动特性后,才能根据聚合物的流动行为选择合适的工艺参数以控制压印质量。

在聚合物热压时流动行为的研究方面,Harry等人^[4]实验分析了聚合物PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)薄膜在压印时的填充行为,发现在压印过程中随着模具结构的不同,流动截面存在单峰或双峰的形式,文中也对温度和峰值高度之间的关系进行了一些探讨。Juang^[5]研究了等温及不等温热压过程中聚合物的流动行为,在恒定速度进行压印的情况下使用数值模拟方法分析了流动过程中应力、压力和时间的关系。Heyderman等人^[6]则通过对实验数据进行分析提出了图案复制完成所需时间的经验公式,并使用扫描电镜获得了压印后的截面轮廓。Yoshihiko等人^[7]通过数值模拟结合实验研究的方法提出当聚合物厚度过薄时需要增大压印力来克服由于过薄造成的流动困难。

由于热压时聚合物流动受模具的约束,故模具的拓扑结构对压印形貌有较大的影响,但对模具拓扑结构对聚合物流动形貌的影响缺乏系统的研究。本文采用有限元方法系统地分析了模具的拓扑结构变化对流动形貌的影响,并和相关实验结果^[4-11]进行了比较。并在此基础上,针对压印过程填充效率低下的现状,首次提出了模具拓扑优化策略,以改善压印时微结构的填充效率。

2 有限元模型

2.1 控制方程

当热压温度较聚合物的玻璃化温度高时,由于其应力松弛的过程比较短暂,可以忽略其弹性效应,将其视为黏塑性^[5]流动。运用张量表示法,其质量守恒可以描述为:

$$\mathbf{v}_{i,i} = 0, \quad (1)$$

式中: \mathbf{v}_i 是速度张量,“,”为微分算子。受力平衡方程可以表示为:

$$\boldsymbol{\sigma}_{ij,i} = 0, \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}_{ij}$ 是应力张量。应变速率与速度之间的关系可以描述为:

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}_{ij} = \frac{1}{2}(\mathbf{v}_{i,j} + \mathbf{v}_{j,i}), \quad (3)$$

式中: $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}_{ij}$ 是应变速率。本构方程如下

$$\boldsymbol{\sigma}_{ij}' = \frac{2\bar{\boldsymbol{\sigma}}}{3\bar{\boldsymbol{\epsilon}}} \dot{\boldsymbol{\epsilon}}_{ij}, \quad (4)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}_{ij}' = \boldsymbol{\sigma}_{ij} - \frac{1}{3}\delta_{ij}\boldsymbol{\sigma}_{ij}$ 为偏应力张量, $\bar{\boldsymbol{\sigma}} =$

$\sqrt{\frac{3}{2}\boldsymbol{\sigma}_{ij}'\boldsymbol{\sigma}_{ij}'}$ 为等效应力或流动应力值, $\bar{\boldsymbol{\epsilon}} =$

$\sqrt{\frac{2}{3}\dot{\boldsymbol{\epsilon}}_{ij}\dot{\boldsymbol{\epsilon}}_{ij}}$ 为等效应变速率。流动应力 $\bar{\boldsymbol{\sigma}}$ 对于聚合

物而言是等效应变、等效应变速率及温度的函数,这和聚合物的材料特性有关。对于高黏性聚合物流动,可以忽略对流效应的影响,其能量守恒方程可写为

$$\rho C_p \dot{T} = k T_{i,i} + \boldsymbol{\sigma}_{ij} \boldsymbol{\epsilon}_{ij}, \quad (5)$$

式中: ρ, C_p, T, \dot{T}, k 分别为聚合物的密度、比热、热力学温度、热力学温度变化率、热传导率。

2.2 几何模型

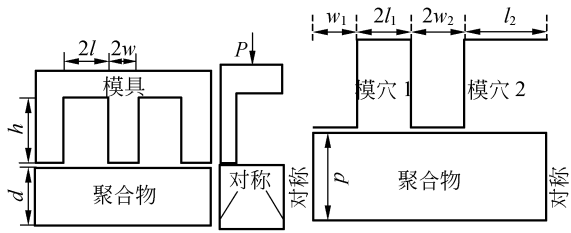
图1是有限元计算使用的模型,为简化计算量取其对称结构,两边采用对称边界条件,聚合物底端固定,由于垂直于截面方向的尺寸要远大于截面上的尺寸,因而将其简化为二维的平面应变模型。模具的占空比 D 、深宽比 A 及模具和聚合物宽厚比 B 定义为:

$$D = l/(\omega + l), A = h/l, B = h/d. \quad (6)$$

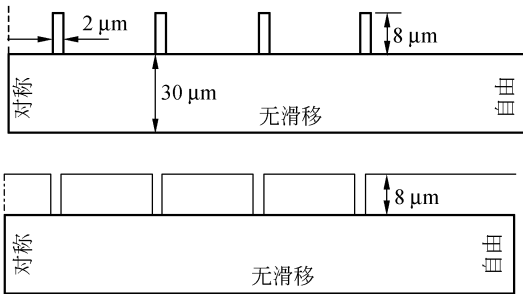
研究模具的占空比等参数变化时采用图1(a)的几何模型,对于相邻结构非对称的模具,采用图1(b)的分析模型,而分析阴/阳模压印时流形变化时则采用图1(c)的模型。

2.3 材料特性

在热压时模具的强度和聚合物相比要大得多,其变形和聚合物相比小得多,故可以将模具视为刚体。聚合物选用热压中性能比较好的材料PMMA,其玻璃态转化温度为 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 。聚合物热压时将其视为黏塑性,压印温度固定为 $140\text{ }^\circ\text{C}$,根据Juang^[5]的研究结果,其流动应力可表示为应



(a) 占空比变化时的分析模型 (b) 不对称结构的分析模型
(a) Finite element model with different duty ratios (b) Finite element model with non-symmetric structure



(c) 阴模(上)及阳模(下)分析模型

(c) Finite element model with the convex mold (upper) and the concave mold (lower)

图 1 有限元分析模型

Fig. 1 Schema of finite element model

变速率的函数

$$\bar{\sigma} = 1.16\bar{\epsilon}^{0.32}, \quad (7)$$

式中: $\bar{\sigma}$ 为流动应力, $\bar{\epsilon}$ 为应变率。

2.4 有限元模拟可行性分析

在微纳米热压印成型过程中,聚合物在受压情况下向模穴进行流动完成填充过程。由于模穴的尺寸处在微纳米尺度下,填充过程中表面张力对流动形貌具有较大的影响,有限元仿真分析是否适用需要进行探讨。Harry^[8]通过对微/纳米热压印实验结果的分析表明,当热压印尺度处于纳米量级时,可以认为在纳米压印状态表面张力的作用对聚物流动起决定性影响。而对于微热压印而言,聚合物粘性力的作用仍然占据主导地位,在仿真分析中可以忽略表面张力所造成的影响。

本仿真计算使用 SFTC 公司出品的专业级接触分析及材料流动仿真软件 Deform-2D V8.1 进行。在热压印成型过程中,Deform 已经被成功的

运用于压印成型过程的仿真,并和实验结果吻合得较好^[5]。在模拟时均采用恒定压印速度模式,即单位时间内模具的位移相同。

3 模具结构的影响

3.1 占空比及宽厚比影响

图 2 显示了在模穴高度 $h=20 \mu\text{m}$, 聚合物厚度 $d=20 \mu\text{m}$, 压印速度 $v=0.1 \mu\text{m/s}$ 的情况下, 当模具下压 $10 \mu\text{m}$ 时, 占空比变化对截面流形的影响。图 2 中: c 为 PMMA 截面高度, n 为流形截面上任一点到模具压入点的水平距离和图案宽度 l 的比值。随着占空比的减小, 聚合物受挤压的部分变大, 受迫流向压力较小区域的聚合物增多, 导致截面流形越来越陡峭, 随着占空比的不同呈现出单双峰的流形。

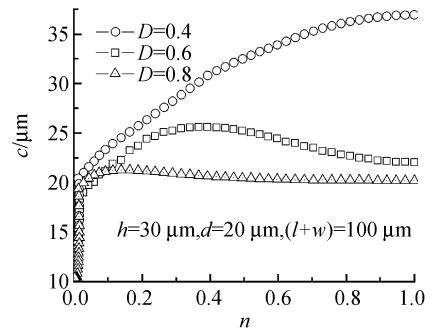


图 2 占空比和流形的关系

Fig. 2 Duty ratio vs flow profile

图 3 简单阐述了单双峰形成原理, 占空比较小时, 垂流流动便收缩到模穴中央, 行成单峰流动形貌。当占空比较大时, 由于模穴宽度相对较大, 受迫流动对中部的贡献较小, 如图 4 所示, 使得聚合物在模具压入附近产生膨胀凸起, 垂流流动主要沿着模穴侧壁, 出现文献[4]、[7]中使用 AFM (原子力显微镜) 观测到的双峰效应。在这种情况下如果压印的时间不够, 双峰没有压平, 就会导致压印的忠实度降低, 成型存在缺陷, 如图 5 所示。

为了研究单双峰出现的规律, 定义 M 为峰值出现的位置和模穴半宽度的比值, 如图 6(a) 所示。图 6(b) 显示了 M 和宽厚比 B 之间的关系。当 $M > 0.9$ 的时候均可认为其流形为单峰形式。从图中可以看出当宽厚比 > 1.5 时, 流形截面开始表现为双峰的形式。为了验证本数值模拟的预

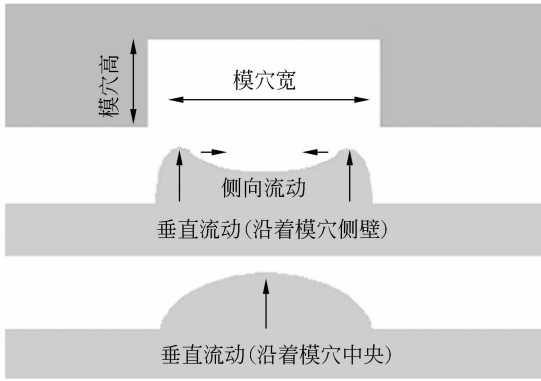


图 3 单双峰流形形成原理

Fig. 3 Schemata of single/dual peak flow profile

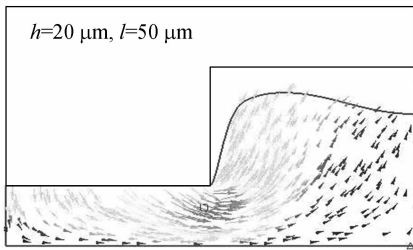


图 4 D=0.5 时流场分布

Fig. 4 Distribution of flow field when $D=0.5$

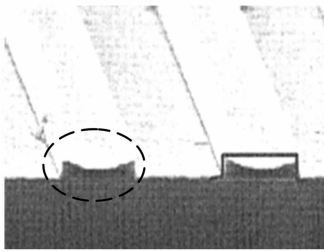
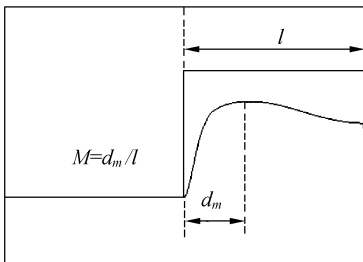


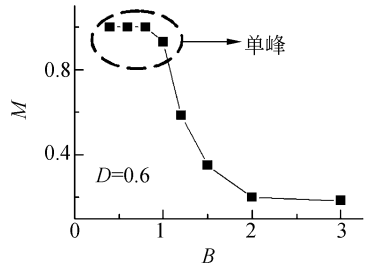
图 5 成型缺陷^[7]

Fig. 5 Defects^[7]



(a)峰值出现位置示意

(a)Schematic illustration of peak position



(b)仿真结果

(b)Simulation result

图 6 峰值位置和宽厚比关系

Fig. 6 Peak position vs ROWT

测结果,对相关的微压印实验结果进行了统计分析,表 1 列出了的实验结果和仿真结果的对比,可以看出仿真结果能够较好的预测其流形的发展。

表 1 实验和仿真结果比较

Tab. 1 Comparison of experiments with simulation results

实验者	宽厚比 D	单/双峰	仿真结果
Harry ^[4]	1.10	单	单
Harry ^[4]	2.79	双	双
Juang ^[5]	2.92	双	双
Harry ^[8]	4.18	双	双
Cross ^[9]	2.94	双	双
Hirai ^[10]	1.39	双	双
Shen ^[11]	0.50	单	单

3.2 阴模及阳模影响

为了研究模具形状对压印流动的影响,模拟了阴模及阳模压印过程。图 7 显示了压印过程中流场的发展情况,左边为对称边界,右边为自由边界,边界条件采用无滑移边界条件。

图 7(a)显示了使用深宽比为 4 的阴模进行压印时的流场,这种高深宽比的结构在压印微透镜阵列时经常用到。从图中可以看出压印时边缘处的速度远大于中间部分的速度,而成型的高度却截然相反。随着压印时间的增加,中间和边缘处微结构的高度差也越来越大。由于热压印过程中模腔不封闭,聚合物易向阻力较小的部位流动,而边缘处模穴内的阻力显然比模穴外要大得多,这导致了边缘处微结构填充较差。而对于中间部位模穴内外的阻力差别要小得多,这使得中间部位的填充效果要好于边缘处。图 7(b)显示了使用深宽比为 4 的阳模压印时的流场,其流动形貌和阴模完全不同,不再存在明显的高度差,可以认

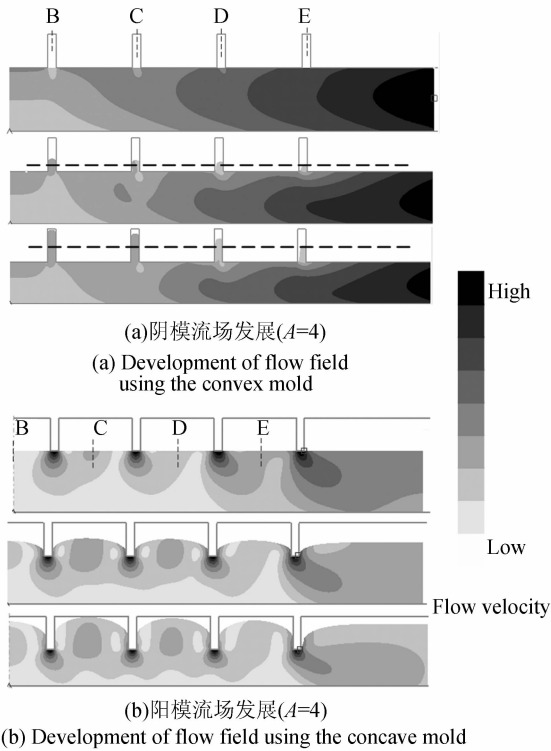


图 7 阴/阳模结构压印时的典型流场
Fig. 7 Typical flow field with the convex/concave molds when embossing

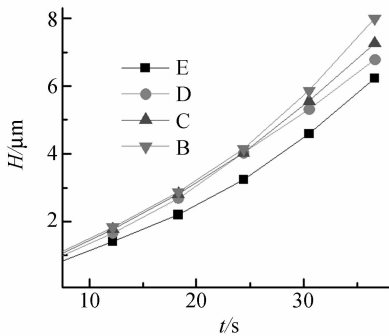


图 8 阴模微结构高度变化
Fig. 8 Pattern height of convex mold vs time

为填充情况比较理想。

为了了解不同位置的流形峰值高度的发展规律,对图 7 中微结构充填高度峰值点(B、C、D、E)的高度和时间的关系进行了研究。图 8、图 9 分别为在恒压印速率($v=0.1 \mu\text{m/s}$)情况下,使用阴模及阳模压印时微结构高度的变化规律。从图中可以看出距离中心越近,流动的越充分,微结构高度越大。对阴模而言随着压印时间的增加,微结构高度差越来越明显,整个微结构高度的变化

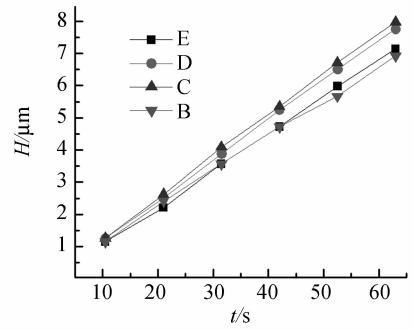


图 9 阳模微结构高度变化
Fig. 9 Pattern height of concave mold vs time

呈现类似抛物线的分布规律。而距离对阳模压印时的高度差影响不是很大,其高度和时间近似成线性分布。在相同的时间里,阴模的填充效率明显要高出许多,B 位置使用阴模填充完成仅需要 36.6 s,而用阳模却需要 63 s,阴模的填充效率要比阳模高出 0.7 倍。

3.3 模具不对称结构影响

模具拓扑结构主要影响微热压印时聚合物在模穴附近的流动,直接决定了聚合物的填充顺序及填充形貌。前两节已经详细讨论了简单对称结构的模具各个尺寸参数对压印过程影响,但在实际应用中简单结构毕竟是特殊情况,因而有必要了解不同尺寸模具的相互耦合作用对流场所造成的影响。对于非对称结构除了流动形貌是要关心的对象外,不同尺寸模穴的填充完成顺序也是一个重要考察对象。

图 10 显示的是当模穴 1 尺寸是模穴 2 尺寸两倍时流场的分布情况($\omega_1 > \omega_2$, $l_1 > l_2$),随着聚合物基片厚度的不同,流场展现出截然不同的形式。图 10(a)中模穴 1 呈现单峰流动,虽然 ω_1 和 ω_2 的尺寸相差 2 倍,但由于基片具有足够的厚度,其流动性受到模具的约束较小,其流动形貌和简单结构相比并没有明显的不同,同时模穴 1 的填充速度明显比模穴 2 的填充速度要快。而图 10(b)中的流动形貌变化则比较明显,由于 ω_1 和 ω_2 对模穴 1 的贡献程度不同,导致模穴 1 的双峰呈现出显著的不对称,而这时模穴 1 和模穴 2 的峰值高度基本一致,如图中虚线所示。图 10(a)与图 10(b)在模穴 1 处流动形貌的不同可以通过观测位于 ω_2 下方的流场得到合理解释。图 10(a)中聚合物下边界对上部聚合物的流动已无太

大的约束力,使得聚合物可以自由选择阻力较小的位置进行流动,导致 w_2 下方的聚合物基本流向模穴 1 中,故而模穴 1 中以单峰的形式表现。而图 10(b)中 w_2 下方的流场沿 w_2 的中心基本对称,使得 w_2 处对模穴 1 中流场的贡献比 w_1 处小得多,因而形成不对称双峰。

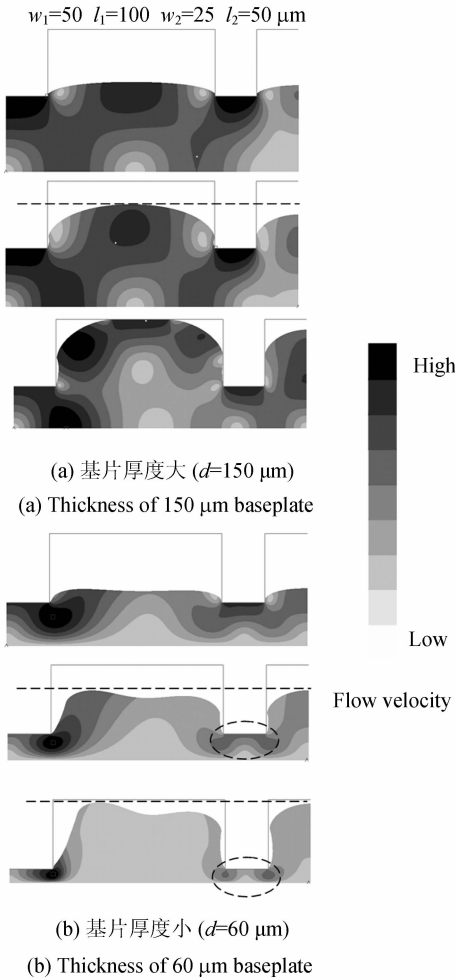
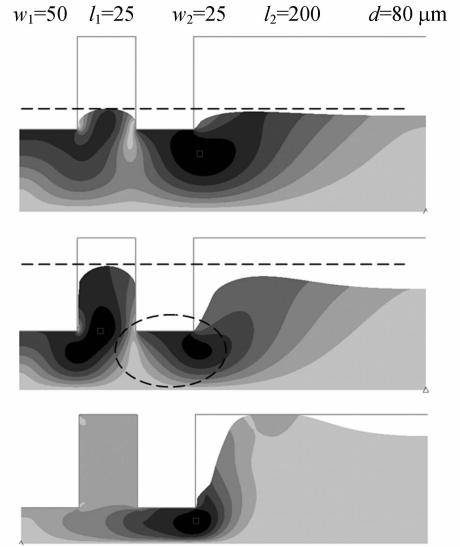


图 10 不对称结构流场发展 ($w_1 > w_2, l_1 > l_2$)

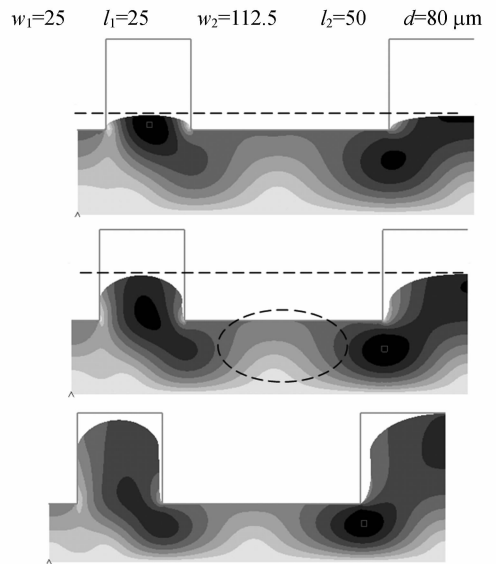
Fig. 10 Development of flow field with the non-symmetric mold when embossing

图 11 则显示的是另两种拓扑结构流场的发展情况,这时选择的聚合物基片厚度适中 ($80 \mu\text{m}$)。图 11(a) ($w_1 > w_2, l_1 < l_2$) 中 w_1 下方的聚合物先流向模穴 1 中,使得模穴 1 填充速度快于模穴 2。图 11(b) ($w_1 < w_2, l_1 < l_2$) 中 w_2 下方的聚合物流动占主导地位,使得模穴 1 和模穴 2 的填充速度几乎相同。对比图 11(a) 及图 11(b) 中的 w_2 下方的流场可以看出明显的区别, (a) 图中 w_2 下方的聚合物主要流向模穴 2 中,其相邻结构

w_1 及 l_1 对其流场施加了较大的影响。而 (b) 图中 w_2 下方的流场几乎呈对称分布, w_1 及 l_1 结构对其施加的影响可以忽略。



(a) $w_1 > w_2, l_1 < l_2$



(b) $w_1 < w_2, l_1 < l_2$

图 11 不对称结构流场发展

Fig. 11 Development of flow field with the non-symmetric mold when embossing

4 模具结构拓扑优化

填充效果不均匀的根本原因是微压印过程

的模具腔体是非封闭的,无法阻止边缘处聚合物向外扩散流动,使得边缘处流动速率较大,相应的压力就低一些。为了降低由于压力不均匀所造成的填充效果不均匀,对模具结构进行了拓扑优化,在边缘处增加浅槽,以抑制边缘处聚合物的流动。

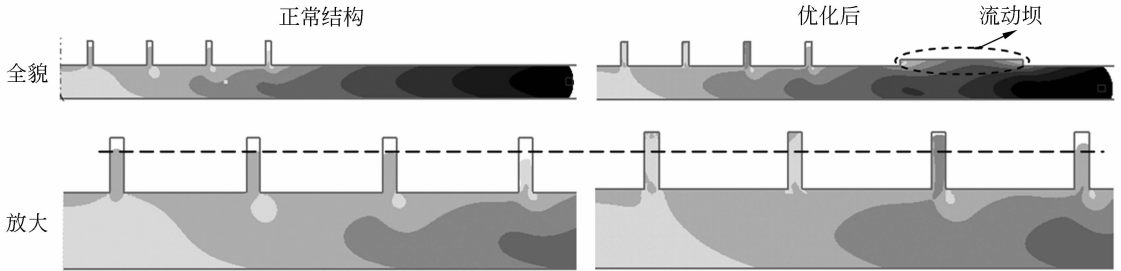


图 12 拓扑优化后填充效果($A=4$)

Fig. 12 Filling effect after optimizing topological structure

由于模具边缘处增加的浅槽具有一定的抑制聚合物向外扩散流动的效果,故这里将浅槽称之为流动坝。为了研究流动坝布置的位置及流动坝的尺寸对促进压印过程的填充所起的效果,分别变化流动坝的高度 H_0 、流动坝的定位距离 H 及流动坝的宽度 L (见图 13 流动坝定位示意),以对各个参数的影响做一个评估。由于相同时刻边缘处微结构的填充效果比中间部分要差,故而选取最靠近流动坝的一个微结构,考察其在有无流动坝时其高度 h 随时间的变化规律。

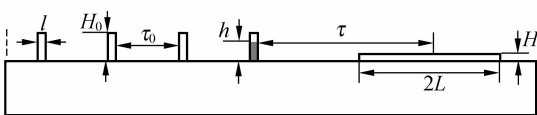


图 13 流动坝定位示意

Fig. 13 Schema of flow barrier location

图 14 显示了流动坝宽度变化和聚合物微结构高度 h 的关系,随着压印时间的增加流动坝所起的作用也越来越明显。随着坝体尺寸的减小其促进填充的效果越来越好,但尺寸减小到一定程度后,尺寸变化所起的作用不再明显。考虑到如果流动坝的尺寸过小,将会增加聚合物和模具间粘附作用,给后续的脱模工序造成一定困难,并容易造成聚合物粘附于流动坝中影响重复使用,故流动坝的宽度不能过小,可根据实际工艺制作成本选择 L 在 $5 \sim 10l$ 之间。

图 12 为保持同样的压印速度及压印时间时的压印效果对比,可以看出虽然使用优化后的模具压印时仍然存在一定的高度差,但其填充效率及填充效果明显比未优化时要好。优化前后的压印速度均为 $0.1 \mu\text{m/s}$,压印时间为 380 s ,为降低运算时间取一半的结构进行研究,左边为对称面。

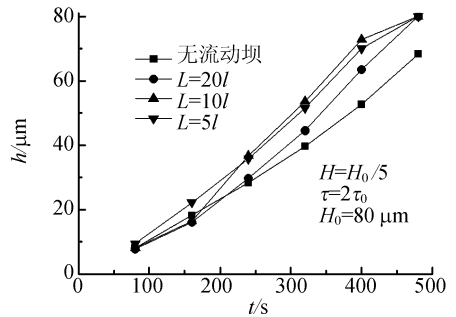


图 14 流动坝宽度和填充效率关系

Fig. 14 Width of the flow barrier vs filling efficiency

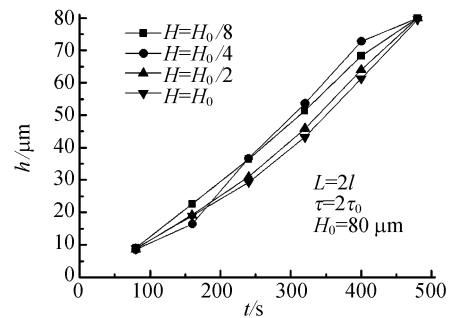


图 15 流动坝高度和填充效率关系

Fig. 15 Height of the flow barrier vs the filling efficiency

图 15 显示了流动坝高度变化和聚合物微结构高度 h 的关系,可以看出当流动坝高度为 $H_0/4$

时具有最好的优化效果,当流动坝高度过大时,聚合物需要花费过长的时间才能将流动坝内的模穴填充完成,坝体所起的约束聚合物流动的效果较弱,故而削弱了其促进填充的效果。当流动坝的高度过小时聚合物很快将坝体内的模穴填充完毕,由于坝体内的模穴中聚合物较少,其对附件的聚合物流动的约束作用也相应地被削弱,因而优化填充效果反而也会降低。

图16显示了流动坝的位置和填充效果的关系,其距离正常的微结构越远,促进填充的效果越好。但当其距离增加到 $2\tau_0$ 时促进填充的效果趋于稳定,因而在实际制作流动坝时可以根据工艺的难易程度来合理安排其位置,只要确保 $\tau > 2\tau_0$ 就可获得较好的效果。

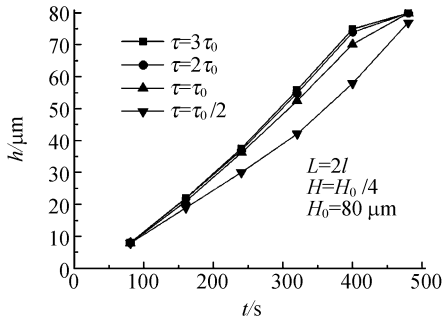


图16 流动坝位置和填充效率关系

Fig. 16 Location of the flow barrier vs the filling efficiency

5 结论

本文对微热压印过程聚合物的流动行为进

行了系统的研究,分析了模具结构变化对聚合物的流形所造成的影响。重点研究了聚合物流形截面出现单双峰现象的原理及其规律,探讨了模具占空比及宽厚比变化和流动形貌间的关系,并和相关的实验结果进行了比较分析。分析了采用阴/阳模进行压印时,聚合物在流动时所呈现出不同流动形貌,指出了采用阴模压印时出现高度差的原因。通过对采用不对称模具进行压印的模拟,揭示了其拓扑结构变化对聚合物流动行为的影响。最后针对热压印过程中边缘出现聚合物填充效率低下的问题,提出了模具拓扑优化策略。通过在模具边缘布置一定的流动坝,以得到促进其填充效率的目的。通过数值模拟分析了流动坝的宽度、高度及流动坝布置的位置对促进填充所起的作用。数值分析结果显示流动坝的宽度应选择为微结构宽度的5~10倍之间、流动坝的高度应选择为微结构高度的1/4左右为宜,而流动坝布置的位置应确保达到微结构间距的2倍。

热压印成型技术的加工效率及加工质量是其能否走向工业化应用的决定性指标。通过对模具结构进行拓扑优化来提高其填充效率是一种很有潜力的方法,但目前模具拓扑优化策略还缺乏系统的理论模型指导及实验结果验证,后续研究需要进一步完善其优化理论及补充相关的实验数据。

参考文献:

- [1] HECKELE M, SCHOMBURG W K. Review on micro molding of thermoplastic polymers[J]. *Journal of Micro-mechanics and Microengineering*, 2004, 20(14): 1-14.
- [2] 罗怡,王晓东,杨帆,等. 变温蠕变实验的COP微流控芯片热压制备[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(7): 1090-1095. LUO Y, WANG X D, YANG F, et al.. Variable temperature quasi-creep experiment for fabrication of microfluidic chip using Cyclo-olefin Polymer (COP)[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 1090-1095. (in Chinese)
- [3] XUE W, WANG J, CUI T H. Highly sensitive micromachined tunneling sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(5): 491-403.
- [4] HARRY D R, WILLIAM P K. Polymer deformation and filling modes during micro embossing[J]. *Microelectronic Engineering*, 2004, 14(1): 1625-1632.
- [5] JUANG Y J. *Polymer processing and rheological analysis near the glass transition temperature*[D]. Ohio: The Ohio State University, 2001.
- [6] HEYDEMAN L J, SCHIFT H, DAVID C. Flow behaviour of thin polymer films used for hot embossing lithogra-

- phy[J]. *Microelectronic Engineering*, 2000,54(1):229-245.
- [7] YOSHIHIKO H, TAKAAKI K, TAKASHI Y. Simulation and experimental study of polymer deformation in nanoimprint lithography[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2004,22(6):3288-3293.
- [8] HARRY D R, AMY C S, SCHUNK P R, *et al.*. Impact of polymer film thickness and cavity size on polymer flow during embossing: toward process design rules for nanoimprint lithography[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005,15(12):2414-2425.
- [9] CROSS G L W, LANGFORD R M, OCONNELL B S, *et al.*. The mechanics of nanoimprint forming[C]. *Proceedings of Res. Soc. Symp.*, 2004:1-6.
- [10] HIRAI Y, FUJIWARA M, OKUNO T, *et al.*. Study of the resist deformation in nanoimprint lithography[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2001,19(6):2811-2815.
- [11] SHEN X J, PAN L W, LIN L W. Microplastic embossing process: experimental and theoretical characterizations [J]. *Sensors and Actuators A*, 2002,97(5):428-433.

作者简介:贺 永(1979—),男,江苏盱眙人,博士后,主要从事微细加工技术方面的研究。E-mail: yongqin@zju. edu. cn
傅建中(1968—),男,浙江衢州人,教授,博士生导师,主要从事微细加工、精密机械、智能机床、数控技术等方面的研究。E-mail: fjz@zju. edu. cn
陈子辰(1950—),男,福建福州人,教授,博士生导师,主要从事微细加工、精密机械、精密测量等方面的研究。E-mail: chenzc@zju. edu. cn

● 下期预告

基于共面点的多视觉测量系统的全局标定

李 喆,丁振良,袁 峰

(哈尔滨工业大学 自动化测试与控制系,黑龙江 哈尔滨 150001)

提出了一种基于共面点的世界坐标唯一全局标定方法,利用激光跟踪仪在现场构建系统总体坐标系,通过拟合基准面设置共面标定点,由系统中各摄像机传感器直接获得标定点的图像,从而实现了各局部相机的全局标定,不需要中间坐标系的转换,避免了多次坐标转换带来的精度损失。通过在多个高速视觉传感器组成的飞行器外部姿态测量系统中进行标定实验,在测量范围较大的情况下,系统精度的均方根误差不超过 0.8 mm。结果表明,整个标定过程简单,基本满足实际测量的高精度要求。