

热滚压成型工艺参数对微流道回复率的影响

程军飞, 陈兴*, 张坤

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为研究热滚压成型工艺参数对微流道成型弹性回复的影响, 基于 Maxwell 模型建立了微流道截面弹性回复率与各工艺参数之间函数关系的分析模型, 并利用非线性有限元仿真软件 ABAQUS 对 PMMA、PVC、PC 非结晶材料的热成型进行有限元模拟, 系统分析了温度、预压紧量及滚动速度对弹性回复率的影响. 结果显示, 当增加温度和减小预压紧量、滚动速度时, 可以有效地减小微流道截面弹性回复率.

关键词: 滚压成型; 有限元; 分析模型; 弹性回复率

中图分类号: TH145.4+2

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 03-0033-07

纳米压印工艺是一种高效、低耗的并行复制结构的加工方法, 该技术最先进程度已达到微纳量级, 近些年在很多领域得到了应用^[1-3]. 压印主要有平面压印和滚动压印两种, 平面微纳米压印技术主要应用于集成电路制造、各种微机械、微流体和微光机电器件等^[4], 但该技术属不连续的生产工艺, 难以进行大规模和大面积生产. 为克服这些不足, 在传统方法的基础上新兴了一种连续的微纳米压印技术——滚动压印技术^[5], 该方法具有复制性好、成型精度高、效率高、成本低、可连续生产等优点^[6-8].

在压印尺寸越来越小而模具结构越来越复杂的情况下, 压印出的微结构往往存在一些成型缺陷, 比如压印不完全、颈缩、剪断、燕尾变形等, 很多学者对这些问题已进行了一定的分析研究^[9-12]. 特别是, 由于聚合物热压成型通常是在预设温度(玻璃化转变温度 T_g 以上)下进行, 成型卸载后的变形主要由弹性回复造成, 它与材料的非线性几何、流变特性有关^[13-14], 其影响不容忽视, 成为近年来海内外热压微成型研究的热点. 王海雄等^[15]进行了聚合物材料 PMMA 热压缩试验, 得到了 PMMA 材料在不同作用时间和温度下的非线性弹性回复, 并采用 Maxwell 方程描述了简单压缩过程中机械

回复行为. 曹宏深等^[16]通过设计 PMMA 高弹态热压缩变形实验, 揭示了聚合物材料 PMMA 在其玻璃化温度以上、高温高弹态变形温度下, 卸载后的最大回弹率以及平均回弹率. Martin 等^[17]通过研究 PMMA 在平板式热压过程中的变形行为, 分析加压阶段时的压印力与脱模时机械回复之间的关系, 揭示了脱模阶段的机械回复主要是由于压印阶段聚合物存储的弹性能引起的. Wang 等^[18]分析研究了平面压印下热压时间和热压温度对机械回复的影响, 提出通过改善材料表面性能来提高聚合物释放存储弹性能的阈值, 以减小弹性回复, 并进行试验验证. Deng 等^[19]基于黏弹性流体建立了三维的卷对卷热压印系统模型, 分析比较了冷却后脱模和未冷却脱模的机械回复, 然而文中并未给出能预测弹性回复的理论模型. 可见热压后的弹性回复是一个非常复杂的过程, 而这方面研究目前尚鲜见于文献报道.

本文以非晶态聚合物为研究对象, 基于广义 Maxwell 模型建立了微流道截面弹性回复率与各工艺参数之间的函数关系, 运用非线性有限元仿真软件 ABAQUS 对 3 种非晶材料——聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚氯乙烯(PVC)、聚碳酸酯(PC)进行热滚压成型数值模拟, 分析研究温度 T 、预压紧

收稿日期: 2017-08-30.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 华中科技大学材料成型与模具技术国家重点实验室开放基金 (P2016-21).

第一作者: 程军飞 (1989—), 男, 河南周口人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 微纳米成型技术. E-mail: 137421952@qq.com

*通信作者: 陈兴 (1963—), 男, 湖南茶陵人, 博士/副教授, 主要研究方向: 材料成型加工模拟. E-mail: 2509682316@qq.com

量 H 及滚动速度 V 等工艺参数对微流道形状弹性回复的影响。

1 聚物流体回弹分析

热滚压过程中,当滚子模具与微结构表面分离时,聚合物处于脱模阶段,存储于材料内部的弹性能随滚子与基板接触面的分离而得到释放^[20-21]。由于转印成型温度通常处于其玻璃化温度 T_g 以上和黏流态温度之间,该温度段内的成型在热力学意义上属于类橡胶性质高弹变形^[16],可以用黏弹性模型描述,为分析热滚压过程中工艺参数对转印效果的影响,本文利用修正的广义 Maxwell 模型建立微流道截面弹性回复率与各工艺参数之间关系的分析模型。

1.1 非晶态聚合物黏弹性模型

由于非晶态聚合物在玻璃化转变温度 T_g 附近以上时处于橡胶态阶段,具有固态弹性和液态黏性的特性,可利用修正的广义 Maxwell 黏弹性力学模型阐述其特性(图 1)。这种模型的力学本构行为可用如下应力松弛公式来描述:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 E(t) + \int_0^t E(t-\xi) \frac{d\varepsilon(\xi)}{d\xi} d\xi. \quad (1)$$

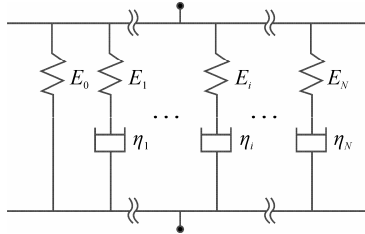


图 1 广义 Maxwell 黏弹性模型

一般情况下,非晶态聚合物材料的依时性松弛模量公式如下:

$$E(t) = E_\infty + \sum_{i=1}^N E_i \exp\left(\frac{-t}{\lambda_i}\right), \quad (2)$$

$$E_0 = E(0) = E_\infty + \sum_{i=1}^N E_i, \quad (3)$$

式中, E_∞ 表示松弛时间 t 为无穷大时松弛模量 $E(t)$ 的极限值; E_i 表示模型中第 i 个 Maxwell 单元的松弛模量; λ_i 表示为模型中第 i 个 Maxwell 单元的松弛时间常数; N 表示修正 Maxwell 模型中的 Maxwell 单元个数。(2)式和(3)式两边分别除以起始松弛模量 E_0 , 公式可以分别转化为:

$$e(t) = 1 - \sum_{i=1}^N e_i \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{\lambda_i}\right)\right), \quad (4)$$

$$1 = e_\infty + \sum_{i=1}^N e_i, \quad (5)$$

式中, $e(t)$ 为无量纲后的应力松弛模量; e_i 为无量纲后第 i 个 Maxwell 单元的应力松弛模量, 因为 e_∞ 为非负数, 所以 $\sum_{i=1}^N e_i < 1$ 。

目前 ABAQUS 有限元软件采用的松弛模量为广义的 prony 级数模型表述, 其与广义的 Maxwell 模型有相同的数学模型, 能很好地反映聚合物材料的黏弹性特性。在 ABAQUS 中, 定义材料黏弹性性质的 prony 级数表达式如下:

$$g(t) = 1 - \sum_{i=1}^N g_i (1 - e^{-t/\tau_i}), \quad (6)$$

式中, $g(t)$ 为归一化后的松弛模量, $g(t) = E(t)/E_0$; t 为松弛时间; N 为 prony 级数的项数; g_i 和 τ_i 均为待定常数。而通过比较(4)式和(6)式可以知道 $g_i = e_i$, $\tau_i = \lambda_i$ 。

基于时温等效原理, 温度对材料特性的影响可通过瞬时应力和缩减时间表达, (1)式可以写成:

$$\sigma(t, T) = \int_{-\infty}^t E_{T_0} \left(\frac{t-\xi}{A(T)} \right) \frac{d\varepsilon(\xi)}{d\xi} d\xi. \quad (7)$$

根据聚合物黏弹性特性和温度之间的关系, 可以通过 WLF 方程描述非晶态聚合物力学性能全貌的时间曲线^[22-23]。

$$E(T_0, t) = E(T, t_0 \cdot a_T), \quad (8)$$

$$\log a_T = -\frac{C_1(T-T_0)}{C_2 + (T-T_0)}, \quad (9)$$

式中, a_T 表示温度 T 的时间缩减因子; T_0 表示参考温度; E_{T_0} 表示参考温度时的模量。通常将参考温度 T_0 选择为材料玻璃化转变温度。

1.2 弹性回复分析

根据(1)~(3)式可知, 应力松弛过程中应力随时间变化的麦克斯韦模型也可写为:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 E_0 + \varepsilon_0 \sum_{i=1}^N E_i \exp\left(\frac{-t}{\lambda_i}\right), \quad (10)$$

式中, $\lambda_i = \eta_i / G$, η 为黏度, G 为剪切弹性模量; ε_0 为初始弹簧弹性应变; E_0 为初始弹簧弹性模量, (10)式可以写成:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 E_0 + \varepsilon_0 \sum_{i=1}^N E_i \exp\left(\frac{-Gt}{\eta_i}\right). \quad (11)$$

聚合物流体常用的流体模型是基于 Arrhenius-type 的幂律模型, 其中 $\eta = m_0 \exp(T_a / T) \dot{\gamma}^{n-1}$, $\dot{\gamma}$ 为剪切应变速率, m_0 为材料参数, T 为温度.

由于微结构在加载阶段各位置应变分布不均匀, 储存的弹性能分布也不均匀, 最终导致回弹后的流道截面形状发生变化. 为表征流道截面形状的弹性变形, 本文通过截面面积变化计算微流道弹性回复率. 设回弹前流道截面面积为 S , 回弹后流道截面面积为 S_1 , 弹性回复率 δ 由下式计算^[15].

$$\delta = \frac{S - S_1}{S} = \frac{\varepsilon - \varepsilon_1}{\varepsilon} = \frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon}, \quad (12)$$

式中, ε 为回弹前的应变; ε_1 为回弹后的应变.

由于液态黏性形变不可恢复, 因此可假设存在于材料内部使聚合物发生回弹的残余应力为弹性力. 根据(10)~(12)式可以得到:

$$\varepsilon(t) = \frac{\varepsilon_0 E_0 + \varepsilon_0 \sum_{i=1}^N E_i \exp(-Gt / \eta_i)}{E}, \quad (13)$$

$$\delta = \frac{\varepsilon_0 E_0 + \varepsilon_0 \sum_{i=1}^N E_i \exp\left(\frac{-Gt}{m_0 \exp(T_a / T) \dot{\gamma}^{n-1}}\right)}{\varepsilon E}. \quad (14)$$

由(13)、(14)式可见, 时间 t 越大, 弹性回复率越小, 当时间 t 大到一定程度时, 对弹性回复率 δ 的影响越来越小. 由于时间 t 与滚动速度 V 成反比, 也即是滚动速度 V 越大, 弹性回复率 δ 越大; 在温度许可范围内, 温度 T 越高, 弹性回复率 δ 越小.

1.3 数值模拟

为验证所建立分析模型的正确性, 利用有限元仿真软件 ABAQUS 建立表面具有微弧结构的驱动滚子模型进行数值模拟(图 2)^[25]. 前文提到的修正广义的 Maxwell 模型中各个参数, 本文则通过查阅文献[18,22,24]获得材料 PMMA、PVC、PC 的松弛模量以及相应的松弛时间常数(表 1~表 7).

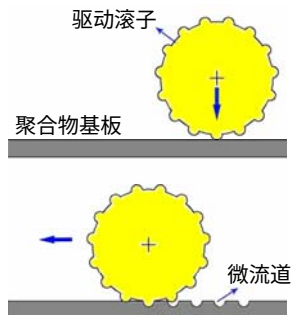


图 2 聚合物成型过程

表 1 PMMA 材料黏弹性模型参数

N	e_i	λ_i
1	0.229 51	1.86e-07
2	0.197 50	1.29e-05
3	0.164 54	8.19e-04
4	0.216 70	4.56e-02
5	0.089 02	5.83e-01
6	0.073 60	2.78e+00
7	0.018 41	1.60e+01
8	0.006 74	5.69e+01
9	0.002 50	2.20e+02
10	0.000 82	1.28e+03
11	0.000 19	8.78e+04
12	0.000 28	6.83e+04
13	0.000 17	4.90e+06

表 2 PMMA 材料 WLF 方程参数 $^{\circ}\text{C}$

T_0	C_1	C_2
115	11	57

表 3 PVC 材料黏弹性模型参数

N	e_i	λ_i
1	0.553 2	0.136 9
2	0.159 2	1.803 1
3	0.103 5	15.762
4	0.078 85	171.46

表 4 PVC 材料 WLF 方程参数 $^{\circ}\text{C}$

T_0	C_1	C_2
120	6.9	75.6

表 5 PC 材料黏弹性模型参数

N	e_i	λ_i
1	0.043 09	0.063 07
2	0.209 89	4.052 9
3	0.563 32	33.160
4	0.155 62	75.408

表 6 PC 材料 WLF 方程参数 $^{\circ}\text{C}$

T_0	C_1	C_2
150	7.2	88.5

表 7 聚合物材料物性参数

材料	PMMA	PVC	PC
弹性模量/MPa	3 300	3 200	2 320
泊松比	0.35	0.38	0.42

续表

材料	PMMA	PVC	PC
密度/(g·cm ⁻³)	1.19	1.2	1.2
比热容/(J·(g·K) ⁻¹)	1.466	1.72	1.172
热导率/(W·(m·K) ⁻¹)	0.19	0.19	0.2
玻璃化温度/°C	105	165	150
热膨胀系数/(10 ⁻⁴ K ⁻¹)	1.5	1.7	1.85

2 模拟结果分析

为对比模具脱模过程中微结构上的节点回弹时应力和位移变化情况, 本文选取微流道结构上的3个节点 *a*、*b*、*c* 为研究对象(图3), 图4给出了

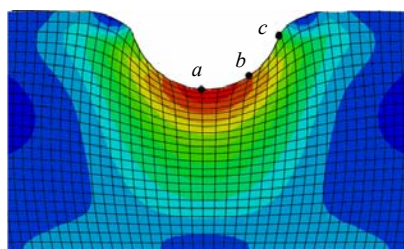


图3 微流道截面网格图

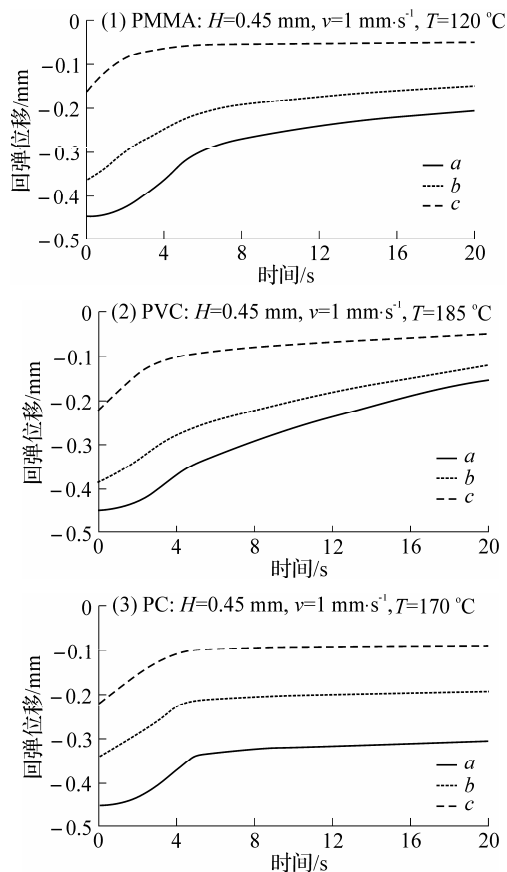


图4 位移—时间曲线图

PMMA、PVC和PC 3种材料的位移—时间曲线, 图5给出了PMMA、PVC和PC 3种材料的应力—时间曲线. 通过图4和图5可以看出, 节点从0s开始发生机械回复, 回弹位移 $a > b > c$; 同时不同节点的初始应力也不一样, 说明微结构上不同位置发生形变时, 储存的弹性能也不一样. 因此当发生弹性回复时候, 由于节点应力松弛有所不同, 造成各节点弹性回复不同. 当回弹时间在0~6s之内, 应力大幅度减小, 引起节点回弹的位移大幅度增加, 说明微流道形状变化主要发生在这个阶段. 当 t 在6s之后, 节点上应力松弛减小, 节点回弹变化幅度逐渐趋于平稳, 但即使基板微结构与微弧模具完全分离后(20s), 仍有一部分残余应力存在, 使微流道结构发生变化.

图6分别显示了3种材料(PMMA、PVC、PC)的微结构在热滚压脱模阶段的不同时间段的 Mises 等效应力分布云图. 时间 t 在0~6s时, 基板微结构与微弧模具处于未完全分离状态, 脱模开始时, 微结构右侧最先与微弧模具分离, 微结构上的应力

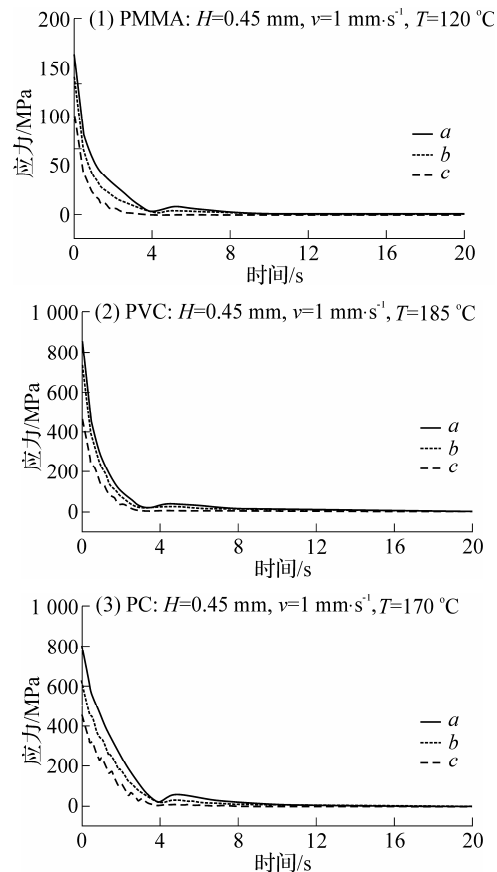
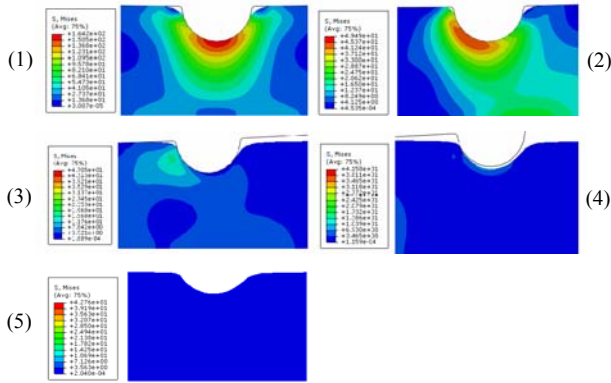
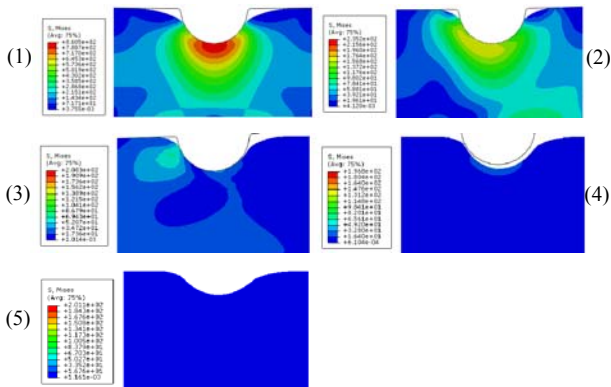


图5 应力—时间曲线图

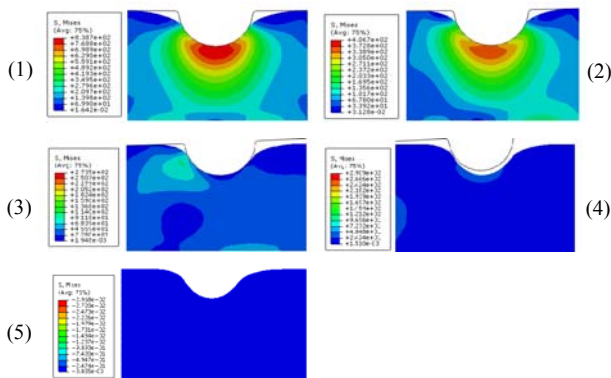
集中部位向左侧移动, 且此区域内最大应力也随着脱模而减小; 而时间 t 在 6 s 之后, 基板微结构与微弧模具完全分离, 微结构上节点的应力还未完全松弛。另外, 在应力完全释放之前, 应力主要集中在成型微结构的底部, 并且微结构截面应力分布不均匀。



(a) PMMA: $H=0.45$ mm, $v=1$ mm $\cdot$ s $^{-1}$, $T=120$ °C



(b) PVC: $H=0.45$ mm, $v=1$ mm $\cdot$ s $^{-1}$, $T=185$ °C

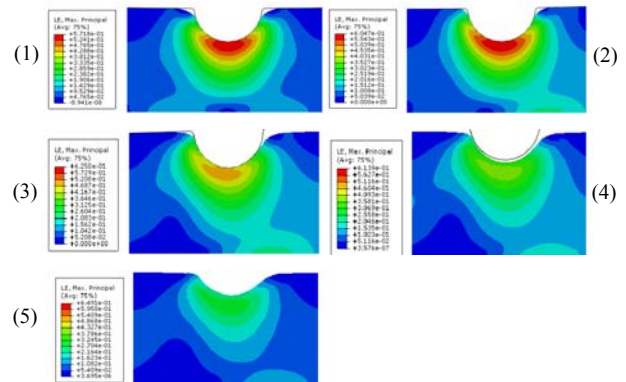


(c) PC: $H=0.45$ mm, $v=1$ mm $\cdot$ s $^{-1}$, $T=170$ °C

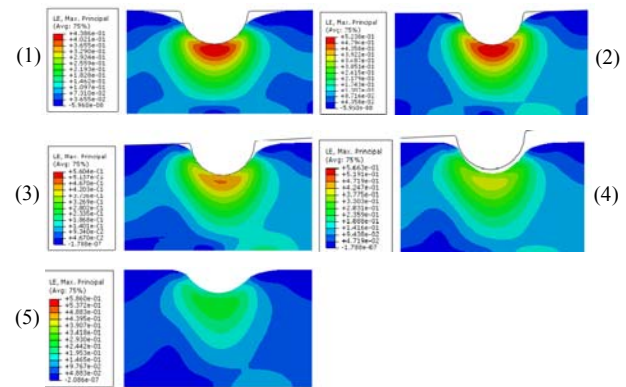
图6 不同脱模时间段应力分布(1) $t=0$ s, (2) $t=1.5$ s, (3) $t=4$ s, (4) $t=6$ s, (5) $t=12$ s

图7分别显示了3种材料(PMMA、PVC、PC)的微结构在热滚压脱模阶段的不同时间段的对数

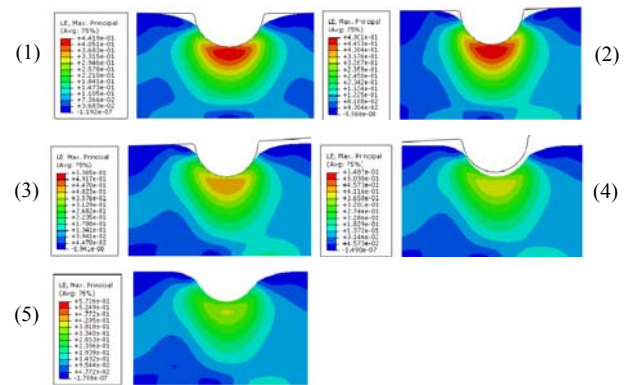
应变分布云图。从图7中可以看出, 其最大对数应变都集中分布在成型微结构的底部, 且随着脱模而减小, 说明在脱模阶段内, 因热压成型应力而产生的应变正在发生弹性回复。另外, 从图7中也可以看出, 微流道截面的对数应变分布不均匀, 这种不均匀性会引起回弹的不均匀, 造成截面形状的翘曲变形。



(a) PMMA: $H=0.45$ mm, $v=1$ mm $\cdot$ s $^{-1}$, $T=120$ °C



(b) PVC: $H=0.45$ mm, $v=1$ mm $\cdot$ s $^{-1}$, $T=185$ °C



(c) PC: $H=0.45$ mm, $v=1$ mm $\cdot$ s $^{-1}$, $T=170$ °C

图7 不同脱模时间段对数应变分布(1) $t=0$ s, (2) $t=1.5$ s, (3) $t=4$ s, (4) $t=6$ s, (5) $t=12$ s

为计算微流道回弹后形状变化, 本文以弹性

表 8 温度对弹性回复率的影响

%

材料	$H=0.45\text{ mm}, \nu=1\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$		
PMMA 回复率 δ	21.10($T=115\text{ }^{\circ}\text{C}$)	15.42($T=120\text{ }^{\circ}\text{C}$)	13.10($T=125\text{ }^{\circ}\text{C}$)
PVC 回复率 δ	19.80($T=180\text{ }^{\circ}\text{C}$)	16.70($T=185\text{ }^{\circ}\text{C}$)	12.22($T=190\text{ }^{\circ}\text{C}$)
PC 回复率 δ	20.70($T=165\text{ }^{\circ}\text{C}$)	15.92($T=170\text{ }^{\circ}\text{C}$)	14.99($T=175\text{ }^{\circ}\text{C}$)

表 9 预压紧量对弹性回复率的影响

%

材料	$H=0.4\text{ mm}, \nu=1\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$	$H=0.45\text{ mm}, \nu=1\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$	$H=0.5\text{ mm}, \nu=1\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$
PMMA 回复率 $\delta(T=120\text{ }^{\circ}\text{C})$	11.55	15.42	20.89
PVC 回复率 $\delta(T=185\text{ }^{\circ}\text{C})$	12.10	16.70	20.52
PC 回复率 $\delta(T=170\text{ }^{\circ}\text{C})$	11.75	15.92	21.20

表 10 滚动速度对弹性回复率的影响

%

材料	$H=0.5\text{ mm}, \nu=0.5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$	$H=0.5\text{ mm}, \nu=1\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$	$H=0.5\text{ mm}, \nu=1.5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$
PMMA 回复率 $\delta(T=120\text{ }^{\circ}\text{C})$	18.01	20.89	22.13
PVC 回复率 $\delta(T=185\text{ }^{\circ}\text{C})$	17.96	20.52	21.87
PC 回复率 $\delta(T=170\text{ }^{\circ}\text{C})$	18.87	21.20	22.99

回复率方程(14)式为指标, 分别分析了聚合物材料 PMMA、PVC、PC 在热滚压成型中的弹性回复变化的情况. 表 8~表 10 分别给出了 PMMA、PVC 以及 PC 材料热滚压成型各工艺参数对微流道截面弹性回复率影响.

从表 8~表 10 中可以看出, 随着成型温度增加, 微流道截面弹性回复率 δ 在变小; 随着滚动速度增大, 流道截面弹性回复率 δ 也在增大; 由于预压紧量越大, 聚合物受到的压力就越大, 那么弹性回复率 δ 也越大; 增加预压紧量会引起微流道截面弹性回复率 δ 变大. 因此可以通过适当增加作用时间和适当范围内提高成型温度抑制弹性回复, 这也与文献[18]理论模型结果一致.

3 结论

(1)基于广义 Maxwell 模型建立了滚压过程中微流道截面弹性回复率与各工艺参数之间函数关系的分析模型.

(2)采用有限元软件 ABAQUS 建立具有微结构的热滚压模型, 并对聚合物材料 PMMA、PVC、PC 在热成型中的流动变化情况进行数值分析, 结果表明与所建立的理论模型一致.

(3)所建立的模拟分析方法不仅可以为热滚压成型提供参考, 也可以为微流道成型质量提供预测帮助.

参考文献:

- [1] 单德彬, 徐杰, 王春举, 等. 塑性微成形技术研究进展[J]. 中国材料进展, 2016, 35(4):251-260.
- [2] 王喜梅, 张振, 赵志鸿, 等. 2015 年我国工程塑料的应用进展[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(6):114-121.
- [3] 徐越. 新型微纳米热压印系统及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [4] 孙靖尧, 吴大鸣, 刘颖, 等. 聚合物微纳制造技术[J]. 橡胶技术与装备, 2016, 10(42):1-7.
- [5] Tan H, Gilbertson A, Chou S Y. Roller nanoimprint lithography[J]. Journal of Vacuum Science & Technology, 1998, 16(6):3926-3928.
- [6] Youn S W, Ogiwara M, Goto H. Prototype development of a roller imprint system and its application to large area polymer replication for a micro-structured optical device[J]. Material Processing Technology, 2008, 202(1):76-85.
- [7] 王晓伟, 刘颖, 吴大鸣, 等. 聚合物微结构滚轮压印成型设备的研制[J]. 塑料, 2011, 40(5):113-115.
- [8] 李志, 王匀, 孙日文, 等. 微挤压成形数值模拟[J]. 农业机械学报, 2008, 39(11):160-163.
- [9] Liu C, Li J M, Liu J S. Deformation behavior of solid polymer during hot embossing process[J]. Microelectronic Engineering, 2009, 87(2):200-207.
- [10] Wan L, Zhu N, Li X. Optimization for solid polymer microstructure replication using gas-assisted hot embossing under low pressure[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2016, 17(8): 1067-1072.

- [11] 周洋, 吴大鸣. 挤出滚压成型工艺参数对微结构复制率的影响[J]. 塑料, 2012, 41(6):105-108.
- [12] 刘阳. 基于 ABAQUS 的微结构滚压仿真[J]. 新技术新工艺, 2012, 12:6-8.
- [13] 朱锡雄, 黄旭升. 高聚物 PMMA 的受力变形行为与黏弹——塑性本构理论模型[J]. 宁波大学学报(理工版), 1996, 9(3):56-69.
- [14] 何平笙. 高聚物的力学性能[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2008:20-126.
- [15] 王海雄, 吕永虎, 李积彬. 有机玻璃热压弹性回复实验与建模[J]. 高分子材料科学与工程, 2014, 30(9):97-100.
- [16] 曹宏深, 陈金周, 韩榜, 等. PMMA 高弹态热压变形行为[J]. 锻压技术, 2010, 35(6):104-108.
- [17] Martin C, Ressler L, Peyrade J P. Study of PMMA recoveries on micrometric patterns replicated by nano-imprint lithography[J]. Physica E, 2003, 17(1):523-525.
- [18] Wang J, Yi P Y, Deng Y J, et al. Recovery behavior of thermoplastic polymers in micro hot embossing process [J]. Journal of Material Processing Technology, 2017, 243:205-216.
- [19] Deng Y, Yi P, Peng L, et al. Flow behavior of polymers during the roll-to-roll hot embossing process[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2015, 25(6):1-10.
- [20] 徐佩弦. 高聚物流变学及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003:49-78.
- [21] 陈平, 唐传林, 廖明义. 高聚物的结构与性能[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013:67-126.
- [22] Lan S, Lee H J, Lee S H. Experimental and numerical study on the viscoelastic property of polycarbonate near glass transition temperature for micro thermal imprint process[J]. Materials & Design, 2009, 30(9):3879-3884.
- [23] 傅志红, 喻坚, 魏灵娇. 聚碳酸酯的应力松弛试验及数据处理分析[J]. 塑料工业, 2014, 42(6):89-92.
- [24] Wang J, Yi P Y, Deng Y J, et al. Mechanism of forming defects in roll-to-roll hot embossing of micro-pyramid arrays: Numerical study[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2015, 25:1-12.
- [25] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006:9-361.

Effect of rolling embossing process parameters on elastic recovery rate of polymeric micro-channel

CHENG Jun-fei, CHEN Xing*, ZHANG Kun

(Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: To study the effect of hot roll-press process parameters on the forming of micro-channel, the analytic model based on the generalized Maxwell model to describe the relationship between the elastic recovery rate and the process parameters of the micro-channel is established, and the nonlinear finite element simulation software ABAQUS is employed to simulate roll-press forming of micro-channel. The simulated results show that the elastic recovery rate of micro-channel cross-section decreases with both the increase of the temperature and the decrease of the preloading height and the rolling speed.

Key words: roll-press process; finite element method; analytic model; elastic recovery rate

(责任编辑 章践立)