

橡胶辅助热压印成型的数值模拟

傅志红, 张 磊, 臧公正, 张 洲, 朱亚威

(中南大学机电工程学院 高性能复杂制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410083)

摘要:采用硅橡胶替代传统下模具, 压印成型聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)制品。硅橡胶的本构模型和PMMA的材料模型分别采用Mooney-Rivlin模型和广义Maxwell模型, 通过单轴拉伸试验确定不同硬度硅橡胶的材料参数。利用有限元仿真软件ANSYS模拟PMMA制品成型过程, 研究压力载荷、压印温度和硅橡胶硬度对PMMA变形的影响。结果表明: 随着压力增大、压印温度升高, 微沟道深度增大; 硅橡胶硬度越小, PMMA成型效果越明显, 但PMMA薄膜厚度均匀性受到一定影响。

关键词: 硅橡胶; 聚甲基丙烯酸甲酯; 橡胶辅助; 热压印; 数值模拟; 微沟道; 厚度均匀性

中图分类号: TQ333.93; O241.82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-890X(2018)11-0000-04

近年来, 随着微米、纳米结构制品在生物医学领域上的应用与发展, 聚合物材料在光学、化学、生物及微机电领域中获得广泛应用^[1-2]。目前, 聚合物材料的加工成型方法主要为微热压法、微注塑法和激光刻蚀法。相比之下, 热压印法由于其低成本、残余应力小、复制率高等优点, 已然成为最具潜力的加工成型方法^[3-4]。

对于壳状结构制品的制造, 传统的方法是通过带有微结构的上模具与下模具进行加工成型, 但该方法对配合精度的要求较高, 微小偏差便可能造成模具损坏, 而且模具配合时极易造成聚合物堵塞。此外, 极高的残余应力也会促使超薄壁成型, 导致产品质量恶化。针对微压印法的改进, H. Dreuth等^[5]提出与微结构配对的模具采用软模; R. Truckenmüller等^[6]利用下模具注入气体的方法, 压印了厚度25 μm、深度125 μm的壳状微沟道聚苯乙烯薄膜, 但该方法不适合成型高纵横比的微沟道, 且成型后的薄膜厚度均匀性较差。

对于下模具用热塑性材料的选用, 硅橡胶更具优势。硅橡胶具有耐高温性能和化学性质稳定等特点, 在热压印过程中, 即使操作温度超过玻璃

化温度, 硅橡胶仍能保持较好的稳定性, 而且在脱模过程中, 硅橡胶的高弹性使其脱模更容易^[6]。

本工作采用硅橡胶替代传统下模具, 压印成型聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)制品, 硅橡胶的本构模型和PMMA的材料模型分别采用Mooney-Rivlin模型和广义Maxwell模型, 通过单轴拉伸试验确定不同硬度硅橡胶的材料参数。利用有限元仿真软件ANSYS模拟PMMA制品成型过程, 研究压力载荷、压印温度和硅橡胶硬度对PMMA变形的影响。

1 材料的模型和参数

1.1 PMMA

压印材料采用PMMA。PMMA为无定型热塑性高聚物材料, 具有密度小、透明度高及热塑性良好等特点^[7], 在微光学、化学中应用广泛。

PMMA的参数^[8]为: 杨氏模量 3.3 GPa, 泊松比 0.39, 密度 1.190 Mg·m⁻³, 热膨胀系数 6×10⁻⁵ m·°C⁻¹, 热导率 0.1884 W·m⁻¹·°C⁻¹, 比热容 1465 J·kg⁻¹·°C⁻¹。

在压印过程中, 材料一般在玻璃化温度附近成型, 此时材料的性能表现为粘弹性。选用能较好地表述聚合物材料在大变形中的粘弹性的广义Maxwell模型为PMMA的材料模型。该模型的松弛模量 $E(t)$ 表达式为:

基金项目: 湖南省重点研发计划(应用基础研究)项目(2015JC3008); 中南大学中央高校基本科研业务费专项(2017zzts643)

作者简介: 傅志红(1966—), 男, 湖南湘潭人, 中南大学教授, 博士, 主要从事高分子材料加工成型的研究。

E-mail: zhihongfu@mail.csu.edu.cn

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

式中, E_{∞} 为平衡模量, t 为松弛时间, E_i 为第 i 个 Maxwell 单元的松弛模量, λ_i 为第 i 个 Maxwell 单元的时间常数, N 为模型中 Maxwell 单元数量。

通过曲线拟合得到 PMMA 粘弹性的 prony 级数^[8], 如表 1 所示。

表1 PMMA粘弹性的prony级数

N	E_i	λ_i
1	0.348 00	1
2	0.196 00	10
3	0.032 70	100
4	0.001 38	1 000

粘弹性具有时温等效性, 采用 WLF 方程表征:

$$\lg a_T = \frac{-C_1(T - T_s)}{C_2 + (T - T_s)} \quad (2)$$

式中, a_T 为位移因子, T_s 为参考温度, C_1 取 14.1, C_2 取 55.82^[9]。

1.2 硅橡胶

硅橡胶具有非线性、不可压缩性及大变形等特性, 因此为其选择合适的本构模型尤为重要。目前, 描述橡胶行为的本构模型主要有 Mooney-Rivlin 模型和 Yeoh 模型。Yeoh 模型适合模拟炭黑填充天然橡胶的大变形行为, 但不能很好地解释双轴拉伸试验结果, 且不能描述小变形行为^[10]。Mooney-Rivlin 模型适合描述中、小变形行为且描述精度高, 故选用 Mooney-Rivlin 模型作为硅橡胶的本构模型。基于应力-应变唯象理论建立橡胶本构关系, 得到硅橡胶应变能密度 (W) 函数:

$$W = (I_1, I_2, I_3) \quad (3)$$

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (4)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 \quad (5)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1 \quad (6)$$

$$\lambda_i = 1 + \gamma_i \quad (7)$$

式中, I_1, I_2 和 I_3 为 Cauchy-Green 变形张量不变量, λ_1, λ_2 和 λ_3 为主伸长比, γ_i 为主应变。

应变能密度函数模型为:

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{k=1}^N \frac{1}{d_k} (I_3 - 1)^{2k} \quad (8)$$

式中, N, C_{ij} 和 d_k 为材料常数, 当材料不可压缩时, $I_3 = 1, j = 1$ 。

根据 Mooney-Rivlin 模型, 公式 (8) 可简化为:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (9)$$

由应变能函数可得到柯西应力张量 (σ) 的表达式:

$$\sigma = -pI + 2 \frac{\partial W}{\partial I_1} B - 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} B^{-1} \quad (10)$$

式中, p 为不可压缩假设引入的任意流体静压力, B 为变形张量, I_i 为 B 的不变张量。

根据单轴拉伸试验原理, 公式 (10) 可简化为:

$$\sigma_{11} = 2\left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2}\right)\left(C_{10} + \frac{C_{01}}{\lambda}\right) \quad (11)$$

D. Zhao 等^[11]研究了不同硬度 (邵尔 A 型硬度为 30~60 度) 橡胶辅助对压印成型的影响, 发现硬度大的橡胶成型的微沟道均匀性较好。在此基础上选用邵尔 A 型硬度为 20~70 度的硅橡胶进行单轴拉伸试验, 结果如图 1 所示。利用 origin 拟合得到 Mooney-Rivlin 模型中 C_{10} 和 C_{01} 的参数值, 如表 2 所示。

2 有限元仿真模型

根据热压印工艺条件, 采用 ANSYS 软件对热压印仿真模型 (见图 2) 进行分析。为简化模型选用 1/4 平面应变模型, 网格单元类型为 Plane 183, PMMA 薄膜厚度为 0.05 mm, 硅橡胶厚度为 5 mm。上下模具采用结构钢, 模型左侧施加对称边界条件, 右侧硅橡胶的横向位移设置为 0, 下模具

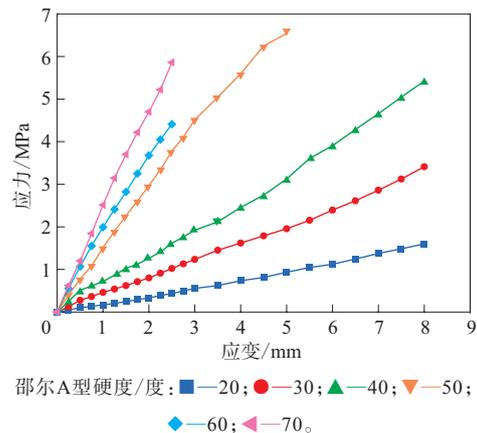


图1 不同硬度硅橡胶的应力-应变曲线

表2 硅橡胶单轴拉伸试验拟合参数

项目	邵尔A型硬度/度					MPa
	20	30	40	50	60	
C_{10}	0.100 3	0.200 8	0.334 0	0.631 0	0.754 7	0.964 0
C_{01}	-0.122 5	-0.176 5	-0.345 7	-0.344 3	-0.371 1	-0.495 2

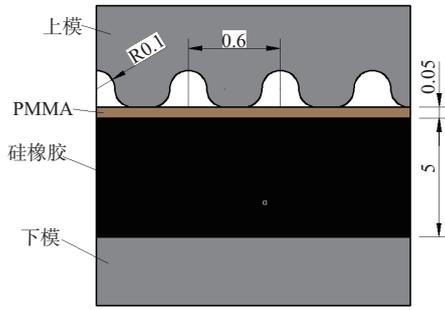


图2 热压印仿真模型示意

与硅橡胶的接触、硅橡胶与PMMA的接触设置为绑定接触,上模具与PMMA的接触设置为摩擦接触,摩擦因数为0.1,下模具固定,上模具施加向下压力。

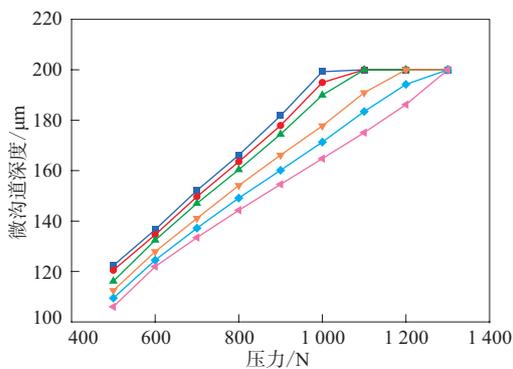
3 仿真结果分析

傅志红等^[12]研究了压印时间对PMMA基板流动变形的影响,发现保压时间越长,PMMA填充效果越好,而且温度和压力对PMMA填充效果有较大影响。本试验主要研究压力载荷、硅橡胶硬度、压印温度对PMMA变形的影响。

3.1 压力载荷对PMMA变形的影响

将压印温度设置为110 °C,测试不同硬度硅橡胶在500~1 300 N压力下的变形状况,结果如图3所示。从图3可以看出:随着压力增大,微沟道深度增大,当压力增大至一定程度时,微沟道深度达到最大;在同一压力载荷下,硅橡胶硬度越小,微沟道深度越大;当压力为1 300 N时,各硬度硅橡胶均达到模具所设置的最大变形量(200 μm)。

硅橡胶硬度并不是越小越好,因为硬度越小,横向挤压越大,造成PMMA薄膜厚度不均匀。为研究硅橡胶硬度对PMMA薄膜厚度均匀性的影



注同图1。

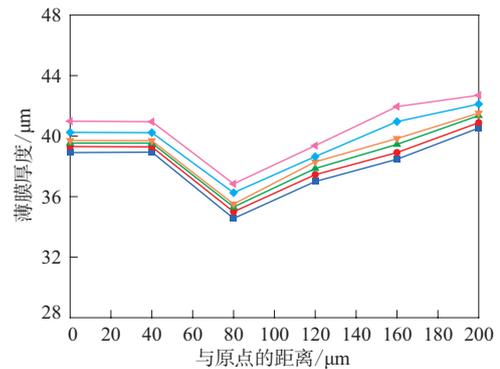
图3 不同硬度硅橡胶在500~1 300 N压力下的变形状况

响,以微沟道中心为原点,分别隔40 μm向两侧取点(共5个点),测定各点的平均厚度,结果如图4所示。通过计算得到不同硬度硅橡胶下PMMA薄膜厚度均匀性方差,结果发现硅橡胶硬度越小,PMMA薄膜厚度均匀性方差越大,但并不是硅橡胶硬度越大,PMMA薄膜厚度均匀越好,相对而言,硅橡胶硬度宜适中。

3.2 压印温度对PMMA变形的影响

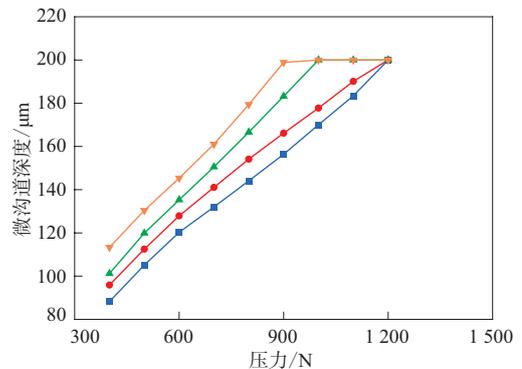
选用邵尔A型硬度为50度的硅橡胶,压印温度分别取90,110,120和130 °C,测试硅橡胶在400~1 200 N压力下的变形状况,结果如图5所示。从图5可以看出:同一压力载荷下,随着压印温度升高,微沟道深度增大;当压力为1 200 N时,不同压印温度硅橡胶均达到最大变形量;特别是压印温度在120 °C以上,微沟道深度的变化更显著。

以邵尔A型硬度为50度的硅橡胶为例,研究压力载荷为900 N下压印温度对PMMA薄膜厚度均匀性的影响,结果如图6所示。从图6可以看出:在距离微沟道中心80 μm处,PMMA薄膜厚度较小,



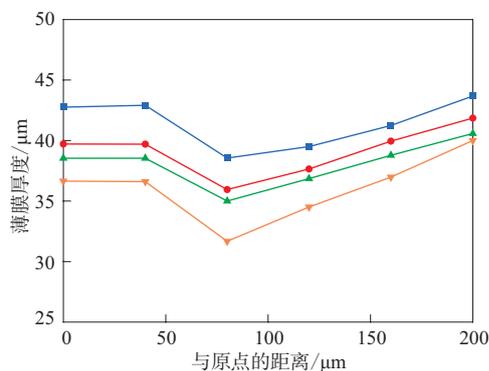
注同图1。

图4 一定压力下不同位置PMMA薄膜的厚度



压印温度/°C: ■—90; ●—110; ▲—120; ▼—130。

图5 硅橡胶在400~1 200 N压力下的变形状况



注同图5。

图6 900 N压力下,不同位置PMMA薄膜的厚度

这是由于在该处PMMA薄膜受到的硅橡胶变形挤压压力较大;随着压印温度升高,PMMA薄膜厚度减小,当压印温度为120 ℃时,薄膜厚度均匀性方差最小。

4 结论

随着压印温度升高、压力增大,微沟道深度增大;随着硅橡胶硬度增大,微沟道深度减小;当硅橡胶硬度和压力载荷一定、压印温度为120 ℃时,PMMA薄膜厚度均匀性较好;硅橡胶硬度越小,薄膜厚度均匀性越差。

参考文献:

[1] 王天强,闫宁,周静,等.硅橡胶泡沫材料的研究进展[J].橡胶工

业,2017,64(5):315-319.

[2] 韩斌慧.基于Mooney-Rivlin模型的橡胶材料常数实测及应用研究[J].橡胶工业,2018,65(5):499-503.

[3] Wan L, Zhu N, Li X, et al. Optimization for Solid Polymer Microstructure Replication Using Gas-assisted Hot Embossing under Low Pressure[J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2016, 17(8):1067-1072.

[4] Nagarajan P, Yao D. Rubber-assisted Micro Forming of Polymer Thin Films[J]. Microsystem Technologies, 2009, 15(2):251-257.

[5] Dreuth H, Heiden C. Thermoplastic Structuring of Thin Polymer[J]. Sens Actuators, 1999, 78:198-204.

[6] Truckenmüller R, Rummler Z, Schaller T, et al. Low-cost Thermoforming of Micro Fluidic Analysis Chips[J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2002, 12(4):375-379.

[7] Nagarajan P, Yao D. Rubber-assisted Hot Embossing for Structuring Thin Polymer Film Polymeric Films[A]. ASME 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Chicago:2006.

[8] 傅志红,吴猛,杜明明,等. PMMA滚压成型的数值模拟[J]. 塑料, 2016, 45(5):26-28.

[9] 傅志红,王志伟,尹业刚,等. PMMA变温松弛模量获取方法的实验研究[J]. 塑料工业, 2014, 42(9):51-54.

[10] 陈家照,黄闰翔,王学仁,等. 几种典型的橡胶材料本构模型及其适用性[J]. 材料导报, 2015, 29(1):118-120.

[11] Zhao D, Wang H, Wang L, et al. Experimental and Numerical Study of Microchannel Formation in Rubber-assisted Hot Embossing with an Open-channel Mold[J]. Microsystem Technologies, 2017, 23(5):1221-1227.

[12] 傅志红,易琪,刘卫,等. 微流控芯片热压成型仿真研究[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(2):60-63.

收稿日期:2018-06-16

Numerical Simulation of Rubber-assisted Hot Embossing

FU Zhihong, ZHANG Lei, ZANG Gongzheng, ZHANG Zhou, ZHU Yawei

(Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The silicone rubber was used to emboss polymethyl methacrylate (PMMA) products instead of traditional lower mold. The constitutive model of silicone rubber and the material model of PMMA were determined as Mooney-Rivlin model and generalized Maxwell model, and the material parameters of silicone rubber with different hardness were determined by uniaxial tensile test. The finite element simulation software ANSYS was used to simulate the molding process of PMMA products, and the effects of pressure load, embossing temperature and silicone rubber hardness on the PMMA products deformation were investigated. The results showed that, with the increase of pressure and embossing temperature, the depth of microchannel was increased. The smaller the hardness of silicone rubber was, the more obvious the PMMA molding effect was, but the thickness uniformity of PMMA film was affected.

Key words: silicone rubber; PMMA; rubber-assisted; hot embossing; numerical simulation; microchanne; thickness uniformity