

文章编号:1671-5497(2006)05-0696-05

聚合物微流控芯片微通道模压成型分析

文伟力¹, 左春柽¹, 于建群², 张学军¹

(1. 吉林大学 机械科学与工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学 生物与农业工程学院, 长春 130022)

摘要:通过试验研究了聚合物微流控芯片微通道模压的工艺过程和工艺参数(包括模压温度、模压压力、模压时间、不同材料及卸载温度等)对微通道尺寸的影响。建立了模压工艺参数与微通道尺寸的关系,并基于黏弹性模型利用有限元方法进行了模压过程的数值仿真,仿真结果与试验结果基本吻合。本文的研究结果对完善聚合物微流控芯片设计和制作的基本理论和基本技术具有积极意义。

关键词:仪器仪表技术;电泳芯片;微流控芯片;生物芯片;微全分析系统;微机电系统;数值仿真;热模压

中图分类号:TH706 文献标识码:A

Hot embossing process analysis of microchannels for polymer microfluidic chips

Wen Wei-li¹, Zuo Chun-cheng¹, Yu Jian-qun², Zhang Xue-jun¹

(1. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: A polymer micro hot embossing process was characterized by the experiments and numerical simulations. A series of experiments were carried out with varied process conditions, including processing pressure, temperature, time, different materials and unload temperature, both the depth and width of hot-embossed microchannel was investigated. Furthermore, the hot-embossing process was numerically simulated by the finite element method using a viscoelastic model to understand its mechanism. The simulation results show in satisfactory agreement with the related experiments, being significant for improvement of the basic theories and the practical techniques of the structure design and manufacture of the polymer microfluidic chips.

Key words: technology of instrument and meter; capillary electrophoresis chip; microfluidic chip; biochip; μ -TAS; MEMS; numerical simulation; hot embossing

收稿日期:2006-01-09.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10572053);高等学校博士学科点专项基金资助项目(20040183057);吉林省科技发展计划项目(20020610).

作者简介:文伟力(1975-),男,博士研究生.研究方向:MEMS 系统设计、仿真、制作及图像处理,模式识别.

E-mail:whpmr@163.com

通讯联系人:于建群(1958-),男,教授,博士生导师.研究方向:数字化设计与制造,基于 MEMS 技术的微流控分析系统. E-mail:yujianqun@jlu.edu.cn

微流控芯片是当前微全分析系统(μ -TAS)和芯片实验室(Lab on a Chip)的发展重点和前沿技术^[1-4]。相对于早期的硅或玻璃材料制作的微流控芯片,基于聚合物材料的微流控芯片技术由于材料价格便宜、绝缘性好、成形容易、批量生产成本低,表面化学和物理属性多样化,且大部分聚合物材料对生化样品具有相容性^[5-7]而得到飞速发展。然而,对于聚合物微流控芯片微通道的成型机理和成型规律的研究还处在起步阶段。为此,本文在文献[8]的基础上,以2种典型的聚合物材料(有机玻璃(PMMA)和聚碳酸脂(PC))为研究对象,通过试验建立了这2种材料的微流控芯片微通道尺寸参数与硅模板微凸起尺寸参数、模压工艺参数(温度、压力、时间、卸载温度等)的关系,并通过有限元方法初步分析了成型过程。对于完善聚合物微流控芯片结构设计和制作的基本理论和基本技术、优化制作工艺参数及探讨微尺度条件下聚合物材料的成型规律等均有积极意义。

1 试验分析

1.1 材料、设备和模压过程

模板采用化学腐蚀方法制作^[8],材料为双面抛光的<100>型单晶硅片。芯片材料选用商品有机玻璃片(PMMA)和聚碳酸脂片(PC),厚度为2 mm,要求质地均匀、表面光滑平整、透光好。模压用设备为温压可控压片机,其结构见图1。温

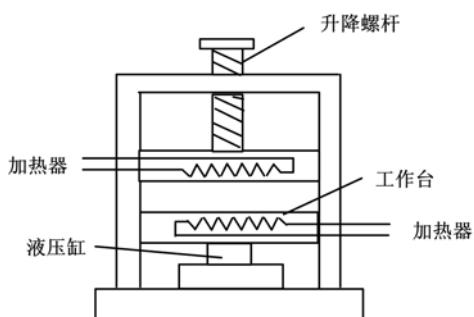


图1 769YP-15A型压片机结构简图

Fig. 1 Sketch map of 769YP-15A imprinting machine
度控制采用WY-99型双通道温度控制仪,压力由压力表指示。采用轮廓仪(TAYLOR-HOBSON TALYSURF4,测头半径为2 μm)测量硅模板微凸起和聚合物微流控芯片微通道的截面形状和尺寸,如图2所示。模压工艺参数为:模压压力为1 MPa,模压时间为3 min,卸载温度为120 °C。

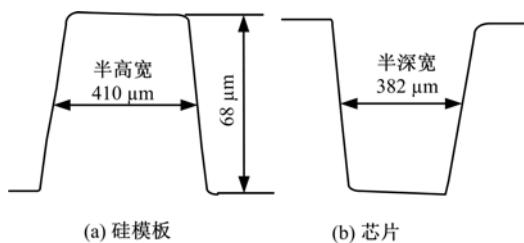
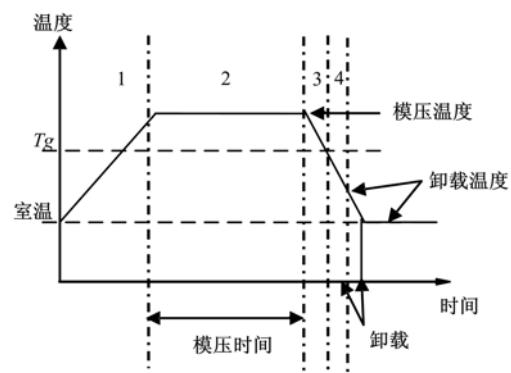


图2 硅模板微凸起和芯片微通道截面形状和尺寸

Fig. 2 Shape and size of the section of the silicon template and chip microchannels

模压工艺过程为:首先对PMMA片和PC片进行前处理,包括选材、切片、超声清洗、真空烘干等。然后把处理好的塑料片和模板放到压片机的工作台上进行模压,施加的温度和压力可由指示表直接读出。模压分为等温模压(模板与塑料片温度相同)和非等温模压(模板与塑料片温度不同)两种,模压时温度和压力的变化规律如图3所示。



1-升温阶段;2-恒温恒压模压阶段;3-卸载前高于材料软化点温度 T_g 时的冷却阶段;4-卸载前低于 T_g 时的冷却阶段

图3 芯片模压过程中温度和压力变化示意图

Fig. 3 Temperature and pressure profiles during hot embossing process

1.2 模压温度对微通道尺寸的影响

采用如图2所示的硅模板和2 mm厚的PMMA芯片,在模压压力1 MPa、模压时间3 min和卸载温度80 °C的情况下,等温模压及非等温模压微通道宽度和深度尺寸随温度变化的关系如图4和图5所示。图中数据为3次试验结果的平均值;非等温模压条件:芯片为室温,模压温度为模板温度。由图4可知,微通道宽度(半深宽度对应模板的半高宽度,见图2)尺寸与模压温度的关系可分为4个阶段:低温段(80—100 °C)时微通道宽度尺寸基本不变,但其数值比模板微凸起对应的宽度小 Δ_1 ;过渡段(100—120 °C)时宽度尺

寸随温度的升高而逐渐增大,即 Δ_1 值逐渐减小,温度越高,宽度尺寸增大越快;高温段($120\text{--}135^\circ\text{C}$)时宽度尺寸变化又趋平缓,其数值比模板宽度尺寸小 Δ_2 ,且 $\Delta_2 < \Delta_1$,这种情况一直持续到超高温段;超高温段($>135^\circ\text{C}$)时随着温度的升高,宽度尺寸的变化不稳定,往往产生严重的变形和气泡,模压工艺要求不易控制。

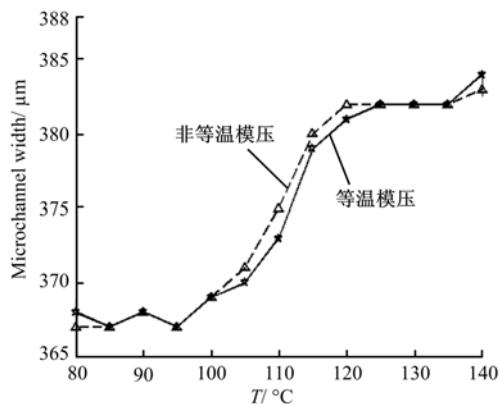


图4 微通道宽度尺寸与模压温度的关系

Fig. 4 Relationship between the microchannel width and hot embossing temperature

由图5可知,当模压温度为 80°C 时,由于模压温度小于PMMA的软化点温度,聚合物尚处在玻璃态,硬而脆,难以变形,故模压所得深度尺寸较浅。当模压温度接近PMMA的软化点温度($90\text{--}100^\circ\text{C}$)时,随模压温度的变化,微通道深度尺寸保持不变,且近似等于模板微凸起的高度。由试验还可知,在本文的试验条件下,等温模压和非等温模压的微通道尺寸随温度变化的规律基本相同。

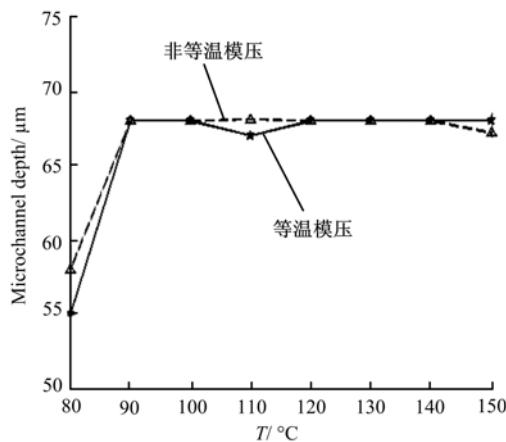


图5 微通道深度尺寸与模压温度的关系

Fig. 5 Relationship between the microchannel depth and hot embossing temperature

1.3 模压压力对微通道尺寸的影响

当模压温度和时间一定时,由试验得到的微通道宽度(半深宽度)、深度与模压压力的关系如图6所示,图中模压温度分别为 90°C 和 120°C ,模压时间为3 min,卸载温度为 80°C 。由图6可知,压力变化对微通道尺寸影响较小,如果考虑误差的影响,可以将其忽略,因而模压聚合物芯片不必选取过大的压力。

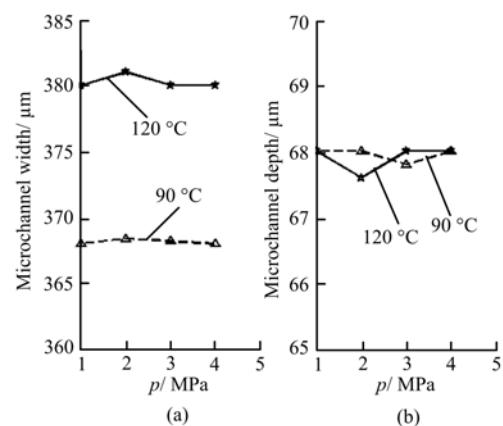


图6 微通道尺寸与模压压力的关系

Fig. 6 Relationship between the microchannel size and hot embossing pressure

1.4 模压时间对微通道尺寸的影响

当模压温度和压力一定时,由试验得到的微通道宽度(半深宽度)、深度与模压时间的关系如图7所示,图中模压温度分别为 90°C 和 120°C ,模压压力为1 MPa,卸载温度为 80°C 。由图7可知,模压时间变化对微通道尺寸影响很小,即不必选取过长的模压时间,后面的仿真结果也表明聚合物芯片在很短的时间内即完成成型过程。

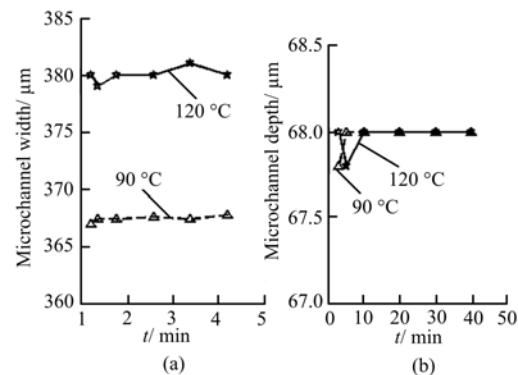


图7 微通道尺寸与模压时间的关系

Fig. 7 Relationship between the microchannel size and hot embossing time

1.5 模板微凸起宽度对微通道尺寸的影响

由试验可知,当采用不同截面宽度的模板模

压时,模压温度、压力和时间对微通道尺寸的影响与上述相同。微通道宽度尺寸的减小值 Δ 与模板宽度的关系随温度的变化如图8所示。图中模压温度分别为90 °C和120 °C,模压时间为3 min,卸载温度为80 °C,模板半高宽分别为410 μm、265 μm和150 μm。由图8可知,模板微凸起宽度不同时, Δ 变化不大,对于图2所示的梯形截面硅模板,120 °C模压时宽度尺寸的变化 Δ_2 为25—30 μm,90 °C模压时 Δ_1 为40—43 μm。

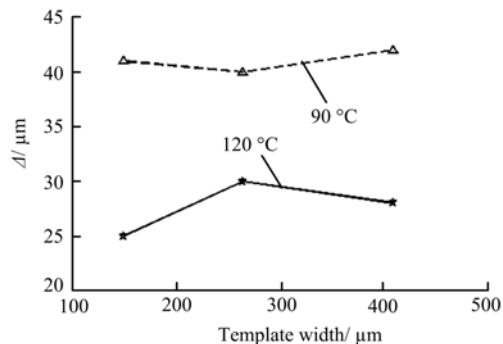


图8 微通道宽度尺寸减小值 Δ 与模板宽度的关系

Fig. 8 Relation between the decrease value Δ of microchannel width and template widths

1.6 卸载温度对微通道尺寸的影响

分别采用模压温度80 °C和55 °C三种卸载脱模温度模压,由试验可知,采用模压温度卸载脱模时微通道尺寸变形较严重(特别是当模压温度超过材料软化点温度时)。采用80 °C和55 °C脱模时,微通道尺寸变化相差不大,从生产效率方面考虑,可采用80 °C卸载脱模。

1.7 不同材料对微通道尺寸的影响

由于PC(聚碳酸酯)材料的软化点温度较高(150 °C左右),在一些生化反应实验中应用较广泛,如PCR反应芯片一般都采用PC作为芯片基片。为此,本文对PC材料也进行了研究,试验结果表明,其微通道尺寸与模压温度的关系与PMMA材料的类似,如图9所示。图中模压压力为1 MPa,模压时间为3 min,卸载温度为120 °C。

1.8 芯片微通道的质量分析

采用图2所示的模板模压芯片,在模压温度为120 °C、模压压力为1 MPa、模压时间为3 min的试验条件下,分析了10个芯片样品上的微通道深度、宽度(半深宽度)尺寸的分散范围。由检测结果发现,微通道深度尺寸分散范围为1.2%,宽度尺寸分散范围为2.1%。模板微凸起的截面形状和芯片微通道的截面形状均为等腰梯形,芯片

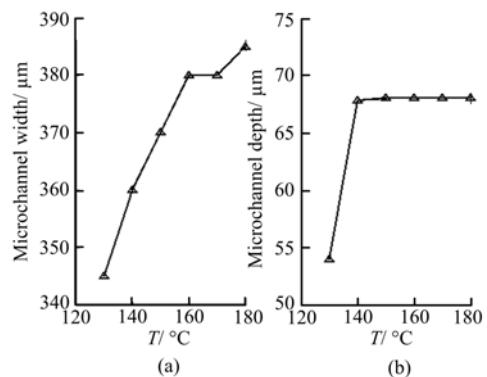


图9 PC材料芯片微通道尺寸与模压温度的关系

Fig. 9 Relationship between the microchannel size and hot embossing temperature for PC chip

微通道的侧边底角近似等于模板底角,但是芯片微通道宽度尺寸小于模板微凸起宽度。

2 有限元分析

为了进一步探讨热模压过程中聚合物基片上微通道的变形规律,对模压过程进行了有限元数值仿真。由于热模压过程是一个热和压力耦合的瞬态过程,且聚合物材料为非晶态黏弹性体,因此,分析时选用广义 Maxwell 黏弹性模型,其应力-应变曲线参考 Lin 等人的实验结果^[9]。

图10给出了模压60 s时有限元分析得到的微通道轮廓图,与图2用轮廓仪测得的轮廓进行比较可以看出,微通道形状和深度尺寸基本吻合(仿真微通道深度为67.96 μm),而宽度尺寸有差异(仿真结果为420 μm),误差产生的原因还有待探讨。在模压过程中出现的微通道“塌边”现象在仿真结果中也得到证实。关于有限元分析的详细内容将另文叙述。

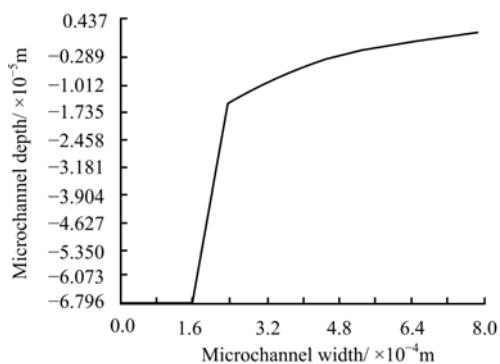


图10 有限元分析得到的微通道模压成型轮廓图

Fig. 10 Profile of the microchannel by FEM simulation

3 结果与讨论

(1) 当模压温度小于材料的软化点温度时,微通道深度尺寸模压不完全;当模压温度接近或超过材料的软化点温度时,微通道深度尺寸基本不变,且始终等于模板微凸起的高度尺寸。

(2) 微通道宽度尺寸与模压温度的关系成阶梯状,即模压温度低于材料的软化点温度时(低温段),随模压温度的变化微通道宽度尺寸基本不变;当模压温度超过材料的软化点温度时(过渡段),随温度升高宽度尺寸逐渐增大;当模压温度远高于材料的软化点温度(高温段)时,随温度的变化宽度尺寸基本不变;当模压温度更高(超高温段)时,随温度升高宽度尺寸变化不稳定,往往产生严重变形和气泡,模压工艺不易控制。

(3) 模压压力和模压时间对微通道尺寸的影响不大,因此不必采用过大的压力和过长的时间;模板微凸起宽度尺寸不同和聚合物材料以及卸载脱模温度(低于软化点温度)不同,微通道尺寸的变化规律均基本相同。

(4) 采用有限元方法和广义 Maxwell 黏弹性模型对模压过程进行了分析,得到的微通道形状和深度尺寸与试验测得的结果基本吻合,但宽度尺寸有差异,其原因还有待进一步探讨。

参考文献:

- [1] Darwin R R, Dimitri L, Pierre-Alain A, et al . Micro total analysis systems I: Introduction, theory, and technology[J]. *Anal Chem*, 2002, 74: 2623-2636.
- [2] Torsten V, Dirk J, Andreas M. Micro total analysis systems. Recent developments[J]. *Anal Chem*, 2004, 76: 3373-3386.
- [3] Petra S D, Kaoru T, Andreas M. Micro total analysis systems: Latest advancements and trends [J]. *Anal Chem*, 2006, 78: 3887-3908.
- [4] Holger B, Laurie E L. Review: polymer microfluidic devices[J]. *Talanta*, 2002, 56: 267-287.
- [5] Holger B, Claudia G. Polymer microfabrication methods for microfluidic analytical applications[J]. *Electrophoresis*, 2000, 21: 12-16.
- [6] Larry J K, Paolo F, Nicholas J P, et al. Fabrication of plastic microchips by hot embossing [J]. *Lab Chip*, 2002, 2: 1-4.
- [7] Holger B, Ulf H. Hot embossing as a method for the fabrication of polymer high aspect ratio structures[J]. *Sensors and Actuators*, 2000, 83: 130-135.
- [8] 于建群,王立鼎,刘军山,等.塑料电泳芯片微结构模压的试验研究[J].机械工程学报,2004,40(11):93-97.
Yu Jian-qun, Wang Li-ding, Liu Jun-shan, et al. Experimental research of hot embossing of microchannels for plastic capillary electrophoresis[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(11): 93-97.
- [9] Lin C R, Chen R H, Hung C. The characterization and finite-element analysis of a polymer under hot pressing [J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2002, 20: 230-235.