

DOI: 10.7652/xjtuxb201309021

微压印中抗蚀剂填充行为研究

李世泽, 魏正英, 杜军, 唐一平

(西安交通大学机械制造系统国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了提高微压印的质量,改进工艺参数优化模具结构,对微压印抗蚀剂的填充行为进行了数值计算和可视化实验研究。实验在三维离焦数字粒子图像测速系统中进行,由此提取了抗蚀剂中的荧光示踪粒子的坐标,通过时间解析算法获得了示踪粒子的三维粒子场,利用粒子跟踪测试技术获得了示踪粒子的速度场。数值模拟中采用了计算流体动力学软件,同时考虑了表面张力和接触角等因素,并根据模具特征划分了不同的压印区域,以分析、预测压印模型中的抗蚀剂填充行为。研究结果显示:数值模拟与实验结果吻合较好,抗蚀剂速度最大值在模具尖角与支撑基板之间,抗蚀剂速度水平方向上的实验最大误差为 6.6%,竖直方向上的最大误差为 9.6%;模具侧壁下方粒子运动轨迹的演化方向决定着抗蚀剂的体积转移方向和最终的填充形貌。该结果可为深入研究微压印中抗蚀剂流动提供参考。

关键词: 微压印;抗蚀剂填充;可视化研究;数值模拟

中图分类号: TB22 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)09-0126-08

Resist Filling Behavior in Microimprint

LI Shize, WEI Zhengying, DU Jun, TANG Yiping

(State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to improve microimprint quality and process parameters, and to optimize module structure, numerical simulations and visualization experiments were conducted to study the resist filling behavior of microimprint lithography. A 3D defocusing digital particle image velocimetry system was established to do visualization research and the spatial coordinates of the fluorescent tracer particles in the resist were extracted from images. The 3D particle field inside the resist was obtained by the time-resolved algorithm. The velocity field was derived from the particle spatial position using particle tracking velocimetry. A numerical model based on the computational fluid dynamics was built to examine the resist filling behavior with surface tension and contact angle considered. The stamping area was divided into different parts according to the mold features. The numerical simulation results agree well with the experimental data. The results show that the experimental error of the resist velocity fields in the horizontal direction is less than 6.6%, while the experimental error in the vertical direction is less than 9.6%. The maximum velocity of the resist always lies in the sector between the stamp corner and the substrate. The evolution directions of motion trajectories of particles under the stamp sidewall determine the filling morphology and the direction of transferred volume of the resist. The results of this study may provide references to the further research on the resist flow in microimprint.

Keywords: microimprint; resist filling; visualization research; numerical simulation

收稿日期: 2012-12-11。 作者简介: 李世泽(1988—),男,硕士生;魏正英(通信作者),女,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975227)。

网络出版时间: 2013-07-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130716.1822.006.html>

微压印工艺作为一种高效、低耗的微结构加工方法,有望在很多领域取代传统的光刻技术^[1]。尽管微压印技术目前已用于制作光学组件^[2],但仍有诸多问题亟待解决,如气泡^[3-4]和模具变形^[5]等,这些问题在一定程度上与抗蚀剂的填充行为有关。目前,针对抗蚀剂薄膜的研究主要集中在数值模拟^[6-9]和简化理论模型^[10-11]方面,而实验方面的研究相对较少^[12-14]。

微压印中抗蚀剂填充行为是一种典型的三维动态过程,因此应用三维流场测试技术可研究未知的微尺度流动现象,如微粒子图像测速系统(Micro-PIV)^[15]、基于立体或全息微粒子跟踪测速(DHMP-TV)^[16-18],以及用两个相机同时捕捉不同视角的图像、数值重构和粒子追踪技术等。

本文基于文献[19]的离焦概念的非接触式三维图像系统获得抗蚀剂的微尺度速度场,并在三维离焦数字粒子图像测速系统(DDPIV)^[20-24]中,用一个紧贴在显微物镜背后的三孔掩膜板生成离焦图像,用一个高灵敏度的冷 CCD(charge-coupled device)捕捉示踪粒子的离焦图像,其中显微物镜的归一化孔径为 0.75,冷 CCD 读出的噪声、暗电流和三维的速度分量通过光学特性和粒子图像获得。

1 实 验

1.1 微尺度离焦数字粒子图像测速原理

离焦成像原理如图 1 所示。一个简单的 DDPIV 系统包含一个掩膜板,板上开有 2 个间距为 d 的小孔。当点光源 A 位于物镜的焦平面上时,像平面上会呈现出一个焦点;当光源处于偏离焦平面的 B 、 C 位置时,聚集的平面会偏离像平面。受贴在物镜后的双孔掩膜板的作用,像平面上会出现 B' 和 B'' 及 C' 和 C'' 的图像,像点之间距离分别为 b 、 b' 。

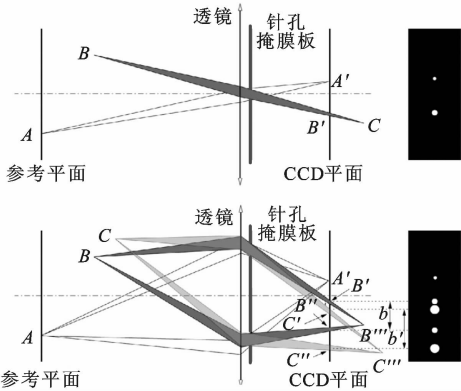


图 1 离焦成像原理

如 B 点在深度方向上的坐标 z 与 B' 和 B'' 之间的距离 b 有关。设焦平面和孔平面之间的距离为 L ,孔间距为 b ,系统的光学放大倍数为 M ,则 z 与 b 之间的关系如下

$$b = MdL \left(\frac{1}{z} - \frac{1}{L} \right) \tag{1}$$

式中: L 为焦距。对于微尺度系统,物镜的实际光学特性是不可测的,物镜光学中心与孔平面所在轴线的位置也难以测量。由此,式(1)可改写为

$$L = z \left(\frac{b}{Md} + 1 \right) \tag{2}$$

虽然 L 不能直接测量,但是可以通过实验来标定。实际应用中,引入变量 $w(w = L - z)$, w 为 A 与焦平面之间的距离,因此式(2)可改写为

$$L = w \left(\frac{Md}{b} + 1 \right) \tag{3}$$

为求得 L ,需调整物镜位置使示踪粒子处于参考平面之上,其成像光斑未出现离焦现象,即 $b = 0$,同时 $w = 0$ 。

M 和 d 为已知参数, b 易于测量,因此 L 可由式(3)求得。实验中, L 可以通过统计标定。因此, B 的空间深度(z 轴坐标)可以获得,而粒子在平面上的位置(x 、 y 轴坐标)可以根据等边三角形的形心坐标计算得出。

1.2 实验台

实验台简图如图 2 所示。倒置的荧光显微镜入口光路中有物镜,荧光显微镜的侧面接口连接冷 CCD,荧光显微镜与物镜之间有一个 3 孔掩膜板,荧光显微镜主体光路中安装了长通滤光片。离焦技术用倒置显微镜(Nikon® Eclipse Ti-S)来实现。3 孔掩膜板上的小孔排列呈正三角形,孔径为 2 mm,孔间距为 6.5 mm,贴在 20 倍的物镜(Nikon® Plan Apo. NA0.75)背后。实际中,调校旋钮应锁定。

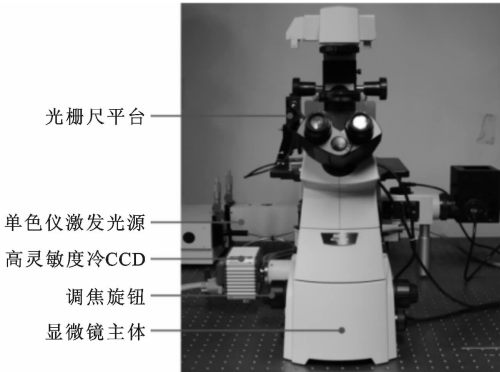


图 2 DDPIV 实验台简图

压印模具 z 方向上的位移用精密的光栅尺平台 (OptoSigma®, TSDM (GS) 60-15X) 来实现。为了提高图像对比度, 选用了粒径为 500 nm 的荧光示踪粒子, 用光强为 35 mW、波长为 488 nm 的光谱线对荧光粒子进行激发, 最大激发波长为 518 nm。按时间顺序排列的离焦图像由一个高灵敏度的冷 CCD (Hamamatsu Photonics K. K., ORCA®-R2) 记录, 分辨率为 672×512 像素, 帧频为 25 帧/s。

L 可以通过 DDPIV 系统进行标定。实验前先对粒径为 500 nm 的荧光微球进行标定, 然后将荧光微球分散在盖玻片上并置于显微镜的载物台上, 这些微球在视场内均匀分散, 以便对 b 进行全面统计。

调整 w 可以得到不同位置的离焦图像, 如图 3 所示, 图像的分辨率为 $0.857 \mu\text{m}/\text{像素}$ 。实验中粒子图像的形心坐标用亚像素算法获得, 显微系统的

深度分辨率为 $100 \text{ nm}/\text{像素}$ 。图 4a 表示 b 的均方值与 w 的关系, 图 4b 表示 10 次测量中不同 w 下的 L, L 的标定值与深度坐标相互独立。三维图像的测量深度最大值为 $110 \mu\text{m}$ 。

1.3 离焦图像的预处理及离焦图像的匹配

微压印实验时一些粒子会粘附在模具表面, 产生图像背景噪声, 因此粒子图像的匹配必须进行预处理, 包括图像去背景、低通滤波、噪声去除、图像增强和灰度变换。

采用迭代方法自动选取图像的灰度阈值^[25], 再用阈值对灰度变换后的图像进行二值化处理, 从而得到只有黑、白两色的二值图像, 将二值图像与灰度图结合便可得到带有光强分布的光斑轮廓图。

采用双线性插值法对光斑轮廓图进行插值处理, 从而增加图像的像素密度, 增强光斑形心坐标的

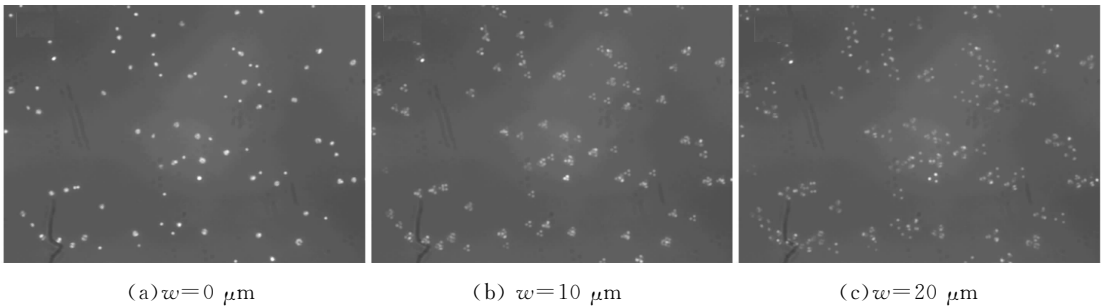
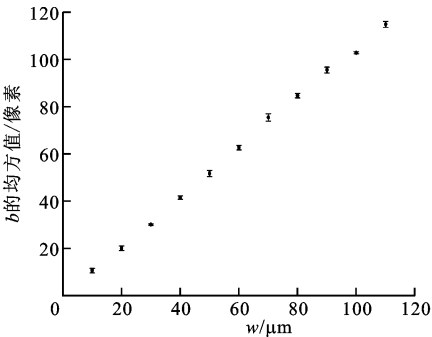
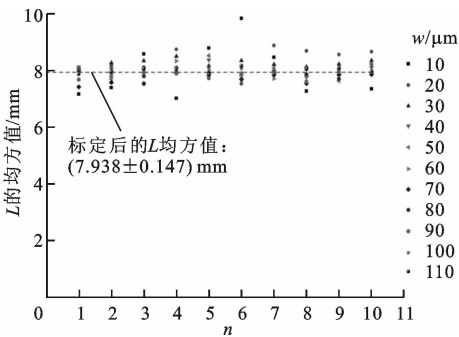


图 3 500 nm 的荧光微球在不同位置时的离焦图



(a) b 的均方值



(b) L 的均方值

图 4 不同 w 下 b 和 L 的标定结果

计算精确度和稳定性。光斑灰度形心的二维像素坐标可利用像素灰度强度计算式求得, 即

$$\bar{x} = \frac{\sum I_i x_i}{\sum I_i}; \quad \bar{y} = \frac{\sum I_i y_i}{\sum I_i} \tag{4}$$

式中: I_i 为像素点 i 的灰度值; x_i 为像素点 i 的横坐标值; y_i 为像素点 i 的纵坐标值。

完成离焦光斑形心坐标的亚像素定位之后, 根据像素坐标对图像上的离焦光斑进行配对, 匹配原理如图 5 所示, 匹配过程遵循如下原则

$$|l_1 - L| \leq \epsilon_1 \tag{5}$$

$$\left| \theta_1 - \frac{\pi}{3} \right| \leq \epsilon_\theta; \quad \left| \theta_2 - \frac{\pi}{3} \right| \leq \epsilon \tag{6}$$

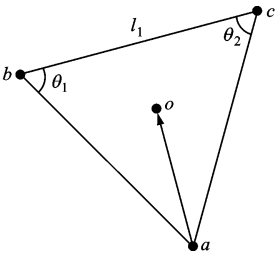


图 5 离焦图像匹配原理

$$\left| \frac{\mathbf{r}_{ao}}{|\mathbf{r}_{ao}|} - \frac{\mathbf{A}}{|\mathbf{A}|} \right| \leq \varepsilon \quad (7)$$

式中: ε 为变量 ζ 上的公差系数; $\mathbf{r}_{ao}$ 为 y 坐标最小的顶点与中心连接得到的匹配矢量; $\mathbf{A}$ 为所有匹配的三角形中最大可能的匹配矢量。

1.4 三维粒子轨迹

应用粒子图像测速系统(PTV)获取速度场,通过追踪单个粒子的连续的图帧计算每个匹配粒子的定向运动速度矢量。本文帧频为 25 帧/s,图像中的粒子数密度较低,因此 2 个连续时间帧上一个粒子运动的距离小于粒子间的距离。

基于匹配概率的两帧式 PTV 算法适用于连续粒子的追踪,该算法对时间间隔为 Δt 的连续两帧追踪利用了最大位移限制、小速度变化、共同运动和一致性匹配等方法。在完成了 2 个连续粒子的形貌匹配后,将位移除以 Δt 便可获得速度信息,对所有的粒子形貌重复进行粒子追踪,便可获得所有示踪粒子的轨迹信息,由此抗蚀剂膜中复杂的速度场得以重建。

根据本测试系统的标定结果,利用文献[21,23]计算出粒子在 x 及 y 方向上的定位最大误差约为 $0.5 \mu\text{m}$,在 z 方向上的定位最大误差约为 $1.2 \mu\text{m}$ 。

测试系统主要误差包括:针孔掩模板的加工及安装时掩模板中心不能与显微系统的光轴完全重合造成的误差,图像处理算法本身的误差,CCD 分辨率受限造成的误差,离焦过程中图像畸变和光斑的重叠造成的误差。

2 模拟

抗蚀剂的主要成分为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)。研究表明,PMMA 的分子回转半径 $R_g = 8.34 \text{ nm}$ ^[26],抗蚀剂薄膜的厚度大于 $10R_g$ 时连续介质假定成立^[27]。因此,压印的特征尺寸大于 83.4 nm 时,抗蚀剂的流动应满足连续介质假设。在微压印过程中,模具特征尺寸处于微米级,因此抗蚀剂的流动满足连续介质假设,可以采用 N-S 方程求解。本文的 N-S 方程采用半隐式的压力耦合计算方法(SIMPLE),自由表面应用了分段线性插值的流体体积(VOF)法构建。设抗蚀剂为不可压缩流体,其流场由质量连续方程、动量方程和能量方程求解。

质量连续方程

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (8)$$

动量连续方程

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{f} \quad (9)$$

能量连续方程

$$\rho C_v \frac{dT}{dt} = -\nabla \cdot \mathbf{q} + Q \quad (10)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}$ 为应力; $\mathbf{u}$ 为速度; ρ 为密度; μ 为动力黏度; $\mathbf{f}$ 为体积力。

VOF 中连续方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad \rho = \sum \alpha_q \rho_q \quad (11)$$

式中: ρ_q 和 α_q 分别为一个单元中各相的密度和体积比。动量及本构方程分别为

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} + \rho g + f_\sigma \quad (12)$$

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \eta \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad \eta = \sum \alpha_q \eta_q \quad (13)$$

式中: η 、 η_q 和 f_σ 分别为平均黏度、各相黏度和表面张力作用的动量项。

气液界面的表面张力边界条件如下

$$(p_1 - p_2 + \omega \kappa) \mathbf{n}_i = (\tau_{1ik} - \tau_{2ik}) \mathbf{n}_k + \frac{\partial \omega}{\partial x} \quad (14)$$

式中: ω 为流体表面张力系数; p_q 为流体 q ($q=1,2$) 的压力; τ_{aik} 为黏性应力张量; $\mathbf{n}_i$ 为界面的单位法向量; κ 为局部表面曲率, $\kappa = R_1^{-1} + R_2^{-1}$, R_1 和 R_2 为界面主曲率半径。

边界粘附特性可以通过接触角反映,即

$$\mathbf{n} = \mathbf{n}_w \cos \theta + \mathbf{v}_w \sin \theta \quad (15)$$

式中: θ 为模具表面与抗蚀剂的接触角; $\mathbf{n}_w$ 为表面的单位法向量; $\mathbf{v}_w$ 为模具边界的单位切向量。

计算区域几何模型及边界条件如图 6 所示。计算区域选取周期性重复结构中的一个单元的一半,计算区域两侧应用周期性边界条件, V 为恒定压印速度, S 为模具的突出特征宽度, W 为模具腔体宽度。

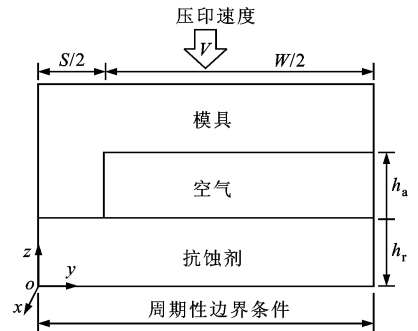


图 6 计算区域几何模型及边界条件

为了便于脱模,对模具表面进行了抗粘附化学处理,以增大抗蚀剂与模具表面的接触角。测得的抗蚀剂与模具表面的静态接触角为 55.4° 。

3 结果与讨论

利用复型成型工艺制作了聚二甲基硅氧烷(PDMS)软模具,该模具的三维形貌如图 7 所示。

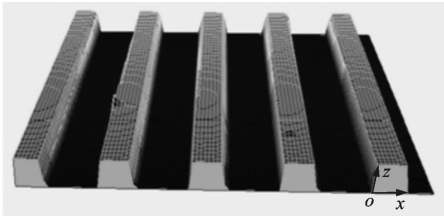


图 7 PDMS 软模具的三维形貌

本文中 PDMS 软模具为周期性的微结构, $S=80\text{ }\mu\text{m}$, $W=120\text{ }\mu\text{m}$, 高度 $H=32\text{ }\mu\text{m}$ 。抗蚀剂的初始膜厚 $h_r=19.2\text{ }\mu\text{m}$, 物镜的井深 δ 聚焦在抗蚀剂膜内且距离抗蚀剂与石英基板界面 $18\text{ }\mu\text{m}$ 。

模具容积深度小于 $40\text{ }\mu\text{m}$, 视场约为 $320\text{ }\mu\text{m}\times 240\text{ }\mu\text{m}$ 。在整个压印过程中,通过固定调焦旋钮来固定显微物镜。模具下压速度为 $1\text{ }\mu\text{m/s}$, 填充过程中保持恒温, 基板固定。实验中抗蚀剂为自配制的阳离子抗蚀剂, 材料的物理属性见表 1。

表 1 材料的物理属性

属性	抗蚀剂	空气	PDMS
密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1 220.000	1.161 4	1 150.000
黏度/ $\text{mPa}\cdot\text{s}$	23.600 00	0.018 46	
表面张力/ $\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$	40.37		
弹性模量/ MPa			76.5
泊松比			0.49

整个压印过程中记录荧光示踪粒子的离焦图像, 不同压印时刻 3 个典型的离焦图像如图 8 所示。

基于改进的追踪算法建立了帧与帧之间同个粒子的对应关系, 通过追踪相邻帧的粒子重构了粒子

的轨迹。为定性分析一个完整周期的微结构, 根据示踪粒子与模具结构的位置关系, 抗蚀剂内示踪粒子大体分为 3 组: 模具突出特征正下方区域为第 1 组; 靠近模具突出特征拐角区域为第 2 组; 模具凹槽下方区域为第 3 组。

表 2 列出了 11 个示踪粒子的初始坐标。测量区域位于显微系统的光轴上, $z=0$ 时代表石英基底与抗蚀剂的接合面。

表 2 追踪粒子的初始坐标

粒子编号	$x/\mu\text{m}$	$y/\mu\text{m}$	$z/\mu\text{m}$
1	50.05	-66.03	17.97
2	45.93	-80.12	17.51
3	-12.57	57.23	14.96
4	-23.96	45.13	13.21
5	63.18	92.33	12.36
6	-6.29	25.24	13.83
7	39.98	-14.55	18.36
8	-17.46	14.51	6.03
9	58.06	67.51	10.50
10	29.20	-32.32	17.61
11	33.86	-74.25	15.03

基于 47 幅连续示踪粒子离焦图像, 相邻 2 幅图像的采集时间间隔 $\Delta t=0.2\text{ s}$, 追踪对应于不同压印特征区域的示踪粒子。压印序列上重构的粒子场和速度场如图 9 所示, 其表明了荧光粒子随抗蚀剂输运时的运动轨迹。

由图 9 可知, 粒子的运动轨迹出现了突变, 突变的位置位于 $y=60\text{ }\mu\text{m}$ 处, 即模具腔体的侧壁处。在模具腔体侧壁的下方, 粒子运动轨迹的演化方向代表着抗蚀剂体积转移的方向。

三维速度场在 yz 平面上的投影如图 10 所示。在模具的挤压作用下, 第 1 组粒子在初始阶段沿下压方向的运动速度与模具的速度近似相等, 当粒子运动到模具尖角下端时, 粒子的水平速度分量突然增大, 当粒子穿过模具尖角与支撑基板之间的中心

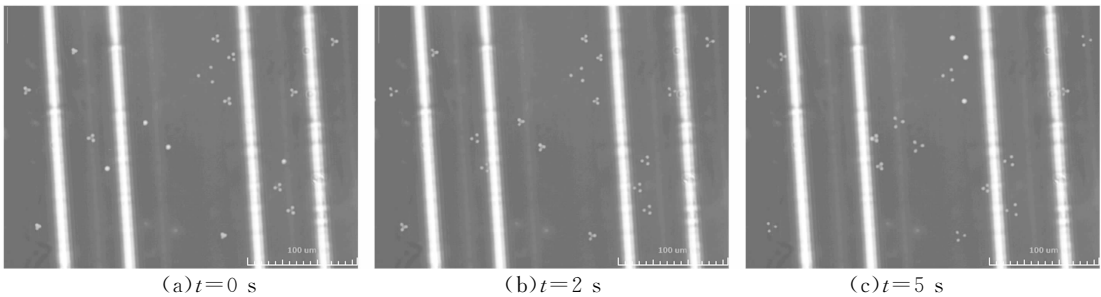


图 8 不同压印时刻离焦图像

区域时会提速,此时水平速度分量趋于 0;第 2 组粒子在较短的时间内运动轨迹出现了突变,突变的趋势直接决定着抗蚀剂体积转移的特点;第 3 组粒子运动速度相对较小,运动轨迹平缓。实验中,抗蚀剂的最大速度约为 $3.6\text{ }\mu\text{m/s}$ 。

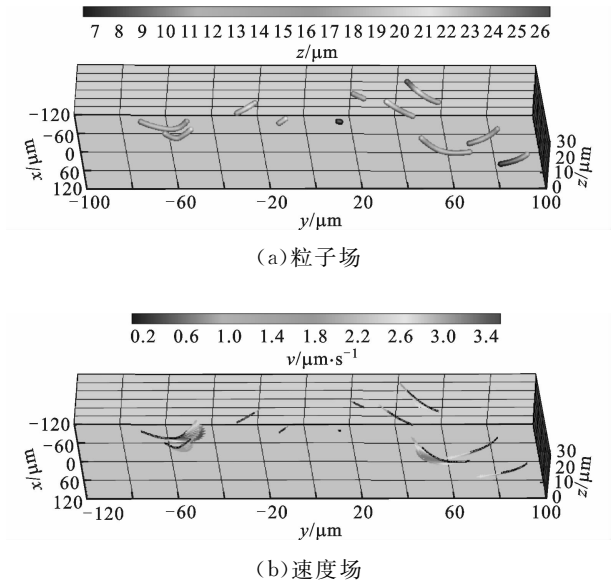


图 9 压印序列上重构的粒子场和速度场

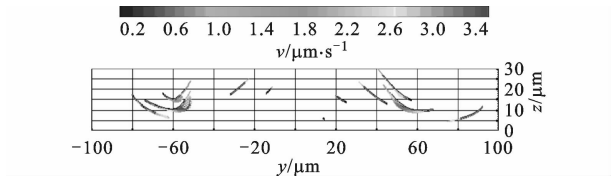
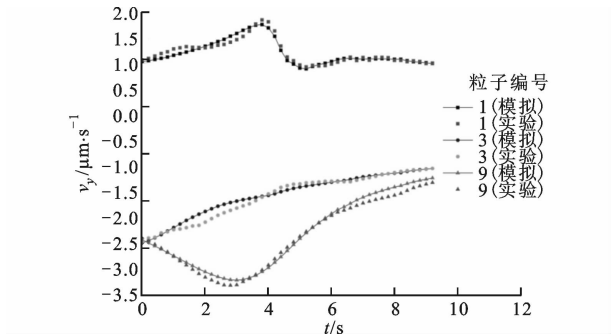


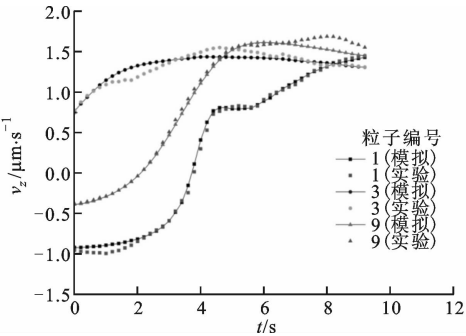
图 10 三维速度场在 yz 平面上的投影

11 个示踪粒子的速度矢量随压印时间变化的模拟和实验对比如图 11 所示。由图 11 可知,数值模拟结果与实验吻合较好,抗蚀剂速度场沿水平方向上的实验误差最大值仅为 6.6%,沿竖直方向的误差最大值为 9.6%。填充过程中,速度误差最大的粒子位于显微物镜的焦平面附近,此时粒子光斑相互交叠,即使用亚像素定位算法也难以根据粒子

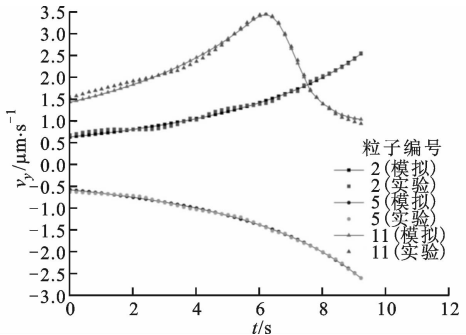


(a)第 1 组粒子沿 y 向的速度

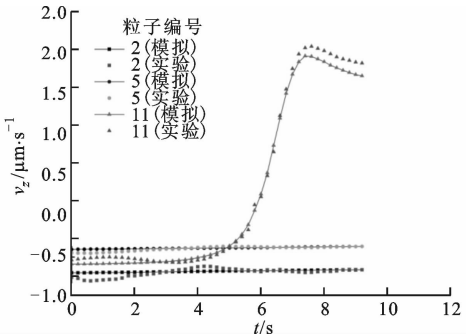
图像的部分边界准确地确定形心位置。根据粒子的初始位置信息,第 1 组编号为 1、3、9 的粒子将通过模具尖角与支持基板间的中间区域。第 2 组和第 3 组粒子的速度方向共同决定着模具腔体中抗蚀剂的填充形貌。



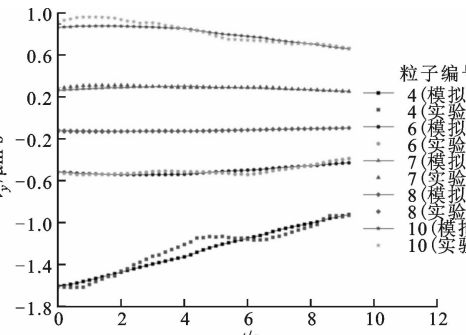
(b)第 1 组粒子沿 z 向的速度



(c)第 2 组粒子沿 y 向的速度



(d)第 2 组粒子沿 z 向的速度



(e)第 3 组粒子沿 y 向的速度

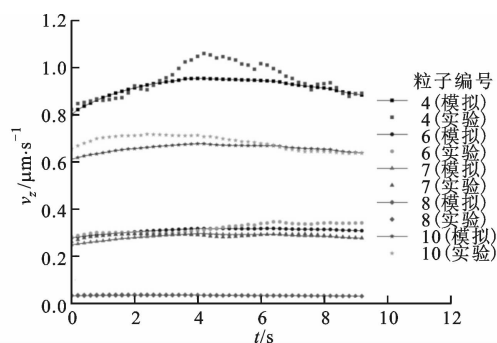
(f) 第3组粒子沿 z 向的速度

图11 追踪粒子速度与时间的关系

4 结 论

本文利用基于DDPIV技术的三维可视化系统实现了填充过程的可视化,通过分析示踪粒子的运动,阐明、揭示了抗蚀剂的体积转移特点,从而获得如下结论。

(1) 荧光示踪粒子的三维重构位置和速度信息可用于表征填充过程中抗蚀剂的运动特性,利用DDPIV系统研究抗蚀剂填充行为是可行的。

(2) 压印中抗蚀剂速度的最大值出现在模具尖角与支撑基板之间,此时抗蚀剂竖直方向上的速度分量近似为0。

(3) 模具侧壁下方粒子运动轨迹的演化方向决定着抗蚀剂的体积转移方向和最终的填充形态。

参考文献:

- [1] CHOU S Y, KRAUSS P R, RENSTROM P J. Nanoimprint lithography [J]. Vac Sci Technol: B, 1996, 14(6): 4129.
- [2] BENDER M, FUCHS A, PLACHETKA U, et al. Status and prospects of UV-nanoimprint technology [J]. Microelectron Eng, 2006, 83(4/5/6/7/8/9): 827-830.
- [3] HIROSHIMA H, KOMURO M. Control of bubble defects in UV nanoimprint [J]. Jpn J Appl Phys: Part 1 Regul Pap Brief Commun Rev Pap, 2007, 46(9B): 6391-6394.
- [4] NAGAOKA Y, MORIHARA D, HIROSHIMA H, et al. Simulation study on bubble trapping in UV nanoimprint lithography [J]. Photopolym Sci Technol, 2009, 22(2): 171-174.
- [5] MERINO S, RETOLAZA A, SCHIFT H, et al. Stamp deformation and its influence on residual layer homogeneity in thermal nanoimprint lithography [J]. Microelectron Eng, 2008, 85(5/6): 877-880.
- [6] YONEDA I, NAKAGAWA Y, MIKAMI S, et al. A study of filling process for UV nanoimprint lithography using a fluid simulation [J]. Proc SPIE, 2009, 7271: 1-7.
- [7] YASUDA M, ARAKI K, TAGA A, et al. Computational study on polymer filling process in nanoimprint lithography [J]. Microelectron Eng, 2011, 88(8): 2188-2191.
- [8] WOO Y, LEE D, LEE W. Molecular dynamic studies on deformation of polymer resist during thermal nanoimprint lithographic process [J]. Tribol Lett, 2009, 36(3): 209-222.
- [9] KIM K D, KWON H J, CHOI D G, et al. Resist flow behavior in ultraviolet nanoimprint lithography as a function of contact angle with stamp and substrate [J]. Jpn J Appl Phys, 2008, 47(11): 8648-8651.
- [10] KIM N W, KIM K W, SIN H C. A mathematical model for slip phenomenon in a microcavity-filling process of nanoimprint lithography [J]. Microelectron Eng, 2009, 86(11): 2324-2329.
- [11] YOUNG W B. Analysis of the nanoimprint lithography with a viscous model [J]. Microelectron Eng, 2005, 77(3/4): 405-411.
- [12] YU Z N, GAO H, CHOU S Y. RIMS (real-time imprint monitoring by scattering of light) study of pressure, temperature and resist effects on nanoimprint lithography [J]. Nanotechnology, 2007, 18(6): 1-4.
- [13] HOCHENG H, NIEN C C. In-situ monitoring of microcavity filling in nanoimprints by capacitance [J]. Jpn J Appl Phys: Part 1 Regul Pap Brief Commun Rev Pap, 2006, 45(6B): 5590-5596.
- [14] YU Z N, GAO H, CHOU S Y. In situ real time process characterization in nanoimprint lithography using time-resolved diffractive scatterometry [J]. Appl Phys Lett, 2004, 85(18): 4166-4168.
- [15] LINDKEN R, GRO M R, WESTERWHEEL J. Micro-particle image velocimetry ([small micro]PIV): recent developments, applications, and guidelines [J]. Lab Chip, 2009, 9: 2551-2567.
- [16] BOWN M R, MACINNES J M, ALLEN R W K, et al. Three-dimensional, three-component velocity measurements using stereoscopic micro-PIV and PTV [J]. Meas Sci Technol, 2006, 17(8): 2175-2185.
- [17] MENG H, PANG G, PU Y, et al. Holographic particle image velocimetry: from film to digital recording [J]. Meas Sci Technol, 2004, 15(4): 673-685.
- [18] SHENG J, MALKIEL E, KATZ J. Using digital holographic microscopy for simultaneous measurements of

- 3D near wall velocity and wall shear stress in a turbulent boundary layer [J]. *Exp Fluids*, 2008, 45(6): 1023-1035.
- [19] WILLERT C E, GHARIB M. 3-dimensional particle imaging with a single camera [J]. *Exp Fluids*, 1992, 12(6): 353-358.
- [20] GROTHE R L, DABIRI D. An improved three-dimensional characterization of defocusing digital particle image velocimetry (DDPIV) based on a new imaging volume definition [J]. *Meas Sci Technol*, 2008, 19(6): 1-13.
- [21] KAJITANI L, DABIRI D. A full three-dimensional characterization of defocusing digital particle image velocimetry [J]. *Meas Sci Technol*, 2005, 16(3): 790-804.
- [22] LU J, PEREIRA F, FRASER S E, et al. Three-dimensional real-time imaging of cardiac cell motions in living embryos [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2008, 13(1): 1-8.
- [23] PEREIRA F, GHARIB M. Defocusing digital particle image velocimetry and the three-dimensional characterization of two-phase flows [J]. *Meas Sci Technol*, 2002, 13(5): 683-694.
- [24] PEREIRA F, LU J, CASTANO-GRAFF E, et al. Microscale 3D flow mapping with mu DDPIV [J]. *Exp Fluids*, 2007, 42(4): 589-599.
- [25] GONZALEZ R, WOODS R. Digital image processing [M]. Boston, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co. Inc., 2001.
- [26] JEONG J H, CHOI Y S. Flow behavior at the embossing stage of nanoimprint lithography [J]. *Fibers and Polymers*, 2002, 3(3): 113-119.
- [27] CHAN D Y C, HORN R G. The drainage of thin liquid films between solid surfaces [J]. *J Chem Phys*, 1985, 83(10): 5311-5324.

(编辑 苗凌)

(上接第 64 页)

- 1992, 28(1): 144-150.
- [4] WANG Gaolin, YANG Rongfeng, XU Dianguo. Dsp-based control of sensorless IPMSM drives for wide-speed-range operation [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(2): 720.
- [5] MAITI S, CHAKRABORTY C, SENGUPTA S. Simulation studies on model reference adaptive control based speed estimation technique for vector controlled permanent magnet synchronous motor drive [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2009, 17: 586-591.
- [6] 张玉攀, 李宏, 崔立国, 等. 永磁同步电动机无位置传感器矢量控制系统仿真 [J]. *微特电机*, 2009, 37(3): 51-52.
- ZHANG Yupan, LI Hong, CUI Liguang, et al. Simulation of sensorless vector control for permanent magnet synchronous motor [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2009, 37(3): 51-52.
- [7] SHI Yuchao, SUN Kai, HUANG Lipai, et al. Online identification of permanent magnet flux based on extended Kalman filter for IPMSM drive with position sensorless control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(11): 4169-4171.
- [8] 王飞. 永磁同步电机无传感器矢量控制方法研究及仿真 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008: 37-51.
- [9] JANG J H, SUL S K, HA J I. Sensorless drive of surface-mounted permanent-magnet motor by high-frequency signal injection based on magnetic saliency [J]. *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 2003, 39(4): 1031-1038.
- [10] JANG J H, SUL S K, HA J I. Analysis of permanent-magnet machine for sensorless control based on high-frequency signal injection [J]. *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 2004, 40(6): 1595-1064.
- [11] JEONG Y, LORENZ R D, JAHNS T M, et al. Initial rotor position estimation of an interior permanent magnet synchronous machine using carrier-frequency injection methods [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, 41(1): 38-45.
- [12] JEONG Y, LORENZ R D. Initial rotor position estimation of an interior permanent magnet synchronous machine using carrier-frequency injection method [J]. *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 2005, 41(1): 38-45.
- [13] 秦峰, 贺益康, 贾洪平. 基于转子位置自检复合方法的永磁同步电机无传感器运行研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(3): 15-16.
- QIN Feng, He Yikang, JIA Hongping. Investigation of the sensorless control for PMSM based on a hybrid rotor position self-sensing approach [J]. *Proceeding of the CSEE*, 2007, 27(3): 15-16.

(编辑 苗凌)