

文章编号 1004-924X(2008)02-0248-09

注射成型工艺参数对微结构零件复制制度的影响

蒋炳炎, 申瑞霞, 沈龙江, 胡建良

(中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 为研究不同工艺参数对微结构零件复制制度的影响, 将成型质量作为微结构零件复制制度的初步量化衡量指标, 研究了不同工艺参数下微结构零件的成型质量。建立了简化的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)微圆柱阵列注射成型实验模型, 运用单因素实验方法实验研究了注射成型工艺参数对微结构零件成型质量的影响规律。实验结果表明, 成型工艺参数对微结构零件成型质量的影响顺序为: 保压压力 > 熔体温度 > 模具温度 > 保压时间 > 注射时间, 增加保压压力, 制品质量约增加 1%, 但浇注系统质量变化幅度不到 0.2%, 表明在浇口尚未封闭的情况下, 增加熔体温度和模具温度能使保压压力更有效地通过浇注系统传递到微型腔, 从而增加制品质量; 影像测量观测结果表明, 成型质量大的制品, 微结构的填充要好于质量轻的制品, 微结构零件复制制度与成型质量存在对应关系。对于具有广泛应用前景的精细微结构零件——微透镜阵列而言, 制品质量可初步评价微结构零件的复制制度; 研究各工艺参数对制品质量的影响规律对提高微结构零件的复制制度有重要意义。

关键词: 微结构零件; 复制制度; 注射成型; 工艺参数; 制品重量

中图分类号: TH703; TH161 **文献标识码:** A

Influence of processing parameters in injection molding on replication fidelity of microstructure parts

JIANG Bing-yan, SHEN Rui-xia, SHEN Long-jiang, HU Jian-liang

(College of Mechatronics Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In order to improve replication fidelity of microstructured parts, the influence of different processing parameters on the part weight of microstructured parts was studied by taking the micro lens array as the application case and the part weight as the preliminary quantitative index of replication fidelity. A simplified analysis model of PMMA micro column arrays was set up and the effects of different processing parameters in injection molding on the weight of microstructured parts were studied. Results of the single factor experiments reveal that the influence degree of process parameters on part weight can be ordered in packing pressure > melt temperature > mold temperature > packing time > injection time, and it can be proved that the part weight increases about 1% with increasing packing pressure, while the change of runner system weight do not exceed 0.2%. This results show that the increases of melt temperature and mold temperature can make the packing pressure transfer to micro cavity more effectively through runner system, and can increase the part weight. From the images of measuring apparatus, it is discovered that the weightier the part weight, the better the filling of the

收稿日期: 2007-09-03; 修订日期: 2007-10-22.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50475140); 教育部科学技术研究重点资助项目(No. 107086)

microstructures. In conclusion, the part weight can be used to evaluate the replication fidelity of microstructure parts primarily; the investigation of the influence of processing parameters on the part weight can be used to improve the replication fidelity of microstructured parts.

Key words: microstructured part; replication fidelity; injection molding; processing parameter; part weight

1 引言

精细微结构零件作为国家高科技领域的重大需求产品,在光电通讯、航空航天、生物医疗和信息存储等领域得到了广泛的应用,始于20世纪80年代末期的微注射成型技术开创了此类零件低成本、大批量生产的新途径^[1-2],成为目前世界先进制造技术的研究热点之一。

高的复制度是注射成型微结构零件需要满足的首要条件,成型工艺参数的改变直接影响到微结构零件复制度的高低。Li Yong-yu 等人研究了生物微机电系统产品中微尺度薄板的注射成型,2D 仿真和实验结果都表明注射速度和模具温度对微结构的复制度影响最大^[3-4]。Yu-chuan Su, Jatan Shah and Liwei Lin 等人通过仿真和实验方法研究了微型腔内聚合物的流动行为,结果显示温度在诸多影响微结构成型质量的注射成型工艺参数中占主导地位^[5]。W B Young 等人仿真研究了带微通道零件的充填过程,发现微结构的充填深度取决于熔体在微特征的流动速率和冷却速率^[6]。L James Lee 等人提出了聚合物 CD 微流控芯片的注射成型方法,发现当注射速度不低于 50 mm/s 时复制精度较高,且残余应力随着流动速率的增加而减小^[7]。B K Lee 等人研究了注射成型工艺条件对微透镜阵列复制度的影响,实验结果表明,保压压力和流动速率对微透镜阵

列的最终表面轮廓影响最大^[8]。

本文以具有广泛应用前景的精细微结构零件—微透镜阵列为例,将不同形状的微透镜阵列简化成微圆柱阵列,采用 LIGA 工艺制作了微圆柱阵列模芯镶件;在理论分析的基础上采用成型重量作为制品复制度的初步量化衡量指标,从成型性能的角度实验研究了注射成型工艺参数(熔体温度、模具温度、注射时间、保压压力、保压时间)对微圆柱阵列成型重量的影响。

2 微透镜阵列实验模型简化及模芯镶件的制造

根据不同的应用场合,折射式微透镜阵列的单元微透镜设计有不同的形状^[9](如矩形、圆环形、六边形等),它们共同的几何特征是薄板上分布有凸起的功能微结构阵列。这些功能微结构阵列的复制性能是注射成型成功与否的关键^[10]。目前,微透镜阵列模芯镶件的制造技术国内还不是很成熟,且价格昂贵,由于本文研究的重点在于注射成型工艺参数对微透镜阵列微结构成型复制性能的影响,为未来使用微透镜阵列的注射成型技术做探索研究,故将不同形状的单元微透镜简化为微圆柱,简化后的微透镜阵列实验模型及其模芯镶件如图1所示。

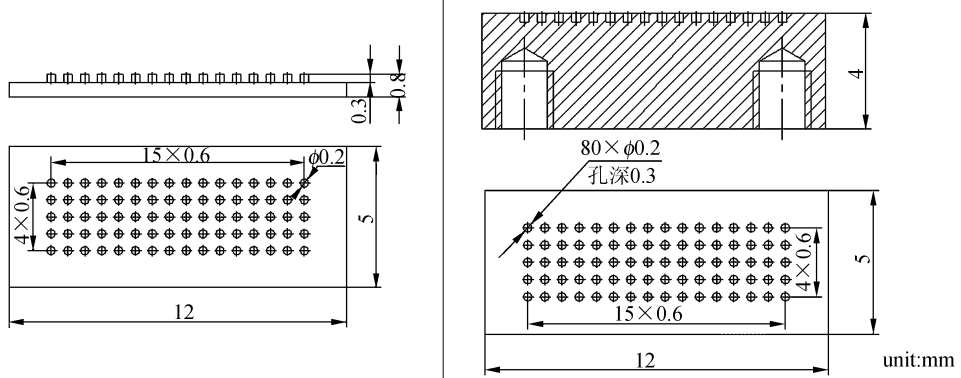


图1 简化的微透镜阵列模型及其模芯镶件

Fig. 1 Simplified model of micro lens array and its mold insert

本实验所用微透镜阵列模芯镶件是在北京中科院高能物理研究所的协助下采用 LIGA 技术制作而成的。LIGA 技术是制作微透镜阵列模芯镶件的最佳方法之一,其工艺过程如图 2 所示。将涂有一定厚度光刻胶的基板在具有适当孔径的圆形图案的掩模遮蔽下,进行深度 X 射线曝光,经显影后在基底上即可形成相对应的孤立的岛状圆柱形胶体,即微圆柱阵列的表面结构;在制作好的微圆柱阵列图案的光刻胶板基础上,进行电铸成型复制,制成金属模芯镶件^[11]。制作的微圆柱阵列镍模芯镶件如图 3 所示。

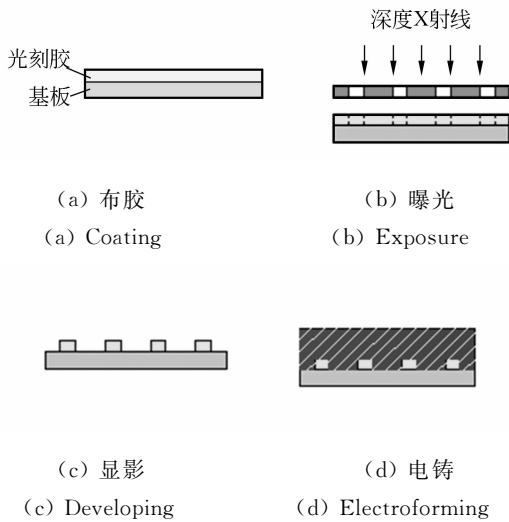
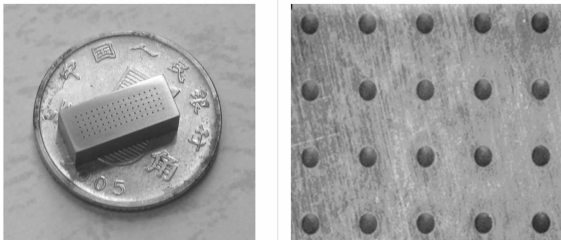


图 2 LIGA 技术制作微圆柱阵列模芯镶件工艺过程
Fig. 2 Fabrication sequence of micro-column array mold insert by LIGA technology



(a) 镍模芯镶件 (b) 200 μm 微圆柱孔阵列显微照片
(a) Mold insert (b) Micrograph of micro-column array

图 3 LIGA 技术制作的微圆柱阵列模芯镶件

Fig. 3 Fabricated micro-column array mold insert by LIGA technology

3 复制度量化衡量指标

为了提高微结构零件的成型制品质量,特别是制品复制度,国内外学者在微注射成型工艺参

数优化方面开展了许多研究工作。一类研究者借助快速影像系统、扫描电镜、光学显微镜等设备将微结构零件放大,通过微结构零件成型形貌的对比来定性评价复制度^[12-13],以探讨各个工艺参数的影响。但这种成型形貌对比的评价方法只能用于定性分析,不能量化衡量,且结果不够准确。研究者们给出的结论相互之间差别很大,甚至相互矛盾。另一类研究者通过微结构某一方向尺寸的显微镜观测来定量评价微结构零件的复制度^[14-16],此种方法使对制品复制度的评价准确性有了保证,且针对不同微结构零件进行工艺参数优化研究的结论也趋于一致。但是该方法仅适用于微结构规则和单一的零件,且在整个工艺参数优化过程中都需要借助扫描探针显微镜、扫描电镜等高档仪器来进行微结构尺寸测量,不利于在生产中推广使用。

制品体收缩率过大和微结构充填不足是造成微结构零件注射成型复制度不高的主要因素。制品内某点体收缩率定义为^[17]:

$$V_i = \frac{\rho(t_{\text{room}}, p_{\text{atm}}) - \rho(t_i, p_i)}{\rho(t_{\text{room}}, p_{\text{atm}})}, \quad (1)$$

式中: V_i —制品内某点体收缩率;

$\rho(t_{\text{room}}, p_{\text{atm}})$ —室温和大气压下的密度;

$\rho(t_i, p_i)$ —注射成型周期内的密度。

注射成型保压结束后,若工艺参数设置合理,浇口同时冻结(设浇口冻结时间为 $t_{g,i}$),制品质量将不再改变,则制品质量 W 可由式(2)计算:

$$W = \int_{V_p} \rho(x, y, z, t_{g,i}) dV = \bar{\rho}_{V_p} \cdot V_p, \quad (2)$$

式中: W —制品质量;

V_p —充填体积;

$t_{g,i}$ —浇口冻结时间。

由式(1)、(2)和上述的分析可知,制品质量包含了制品体收缩和微结构充填的信息,充填率越高,体积收缩率越小(密度越大),则制品质量越大,制品精度越高。换言之,制品成型质量的大小初步反映了微结构零件注射成型复制度的高低,在微结构零件注射成型中,可用制品成型质量来初步量化评价其复制度,此前的一些研究者也利用制品成型质量作为评价指标来进行工艺过程和制品质量的控制,证实了此种方法的可行性^[18-20]。

4 注射成型实验和表征

4.1 实验原料

实验原料为台湾奇美实业公司的 CM-205 型号 PMMA,主要性能参数如表 1 所示。

表 1 型号为 CM-205 的 PMMA 性能参数

Tab.1 Properties of CM-205 type PMMA

Properties	Values
Specific gravity	1.19
Elastic modulus (GPa)	2.74
Poisson ratio	0.355
Transition temperature $-t_g$ (°C)	95
Refractive index	1.491
Light transmission (%)	92

4.2 实验设备

4.2.1 注射成型机

采用海天 HTF86X1/J1 型注塑机,主要技术参数为:螺杆直径 36 mm、螺杆长径比 21.2、最大注射压力 183 MPa、最大注射量 131 cm³。

4.2.2 注射成型模具

自制微透镜阵列注射成型实验模具,如图 4 所示。

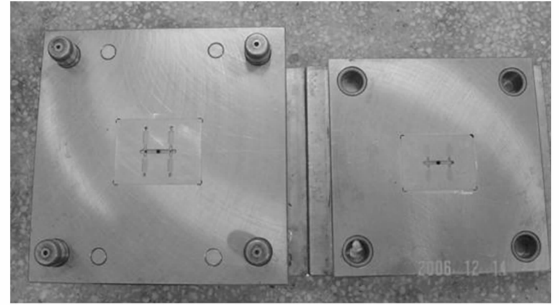


图 4 微透镜阵列注射成型实验模具

Fig.4 Assembly view of actual micro-lens array mold

4.3 单因素实验方法

运用 Moldflow Plastics Insight (MPI) 软件的 MPI/Flow 3D 模块对微透镜阵列的成型质量进行仿真研究^[21],分析其正交实验结果,得到最优的工艺参数组合为:熔体温度 235 °C,模具温度 70 °C,注射时间 0.4 s,保压压力 95%,保压时间 2.4 s。以此组最优工艺参数为参考,逐一改变单个工艺参数,研究各工艺参数对微透镜阵列成型质量的影响。

表 2 单因素实验方案

Tab.2 Schemes of single factor experiments

Processing parameters	Variations											
Melt temperature (°C)	220	225	230	235	240	245	250	255	260	/	/	/
Mold temperature (°C)	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
Injection time (s)	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	/	/
Packing pressure (MPa)	70	75	80	85	90	95	100	/	/	/	/	/
Packing time (s)	0.4	0.8	1.2	1.6	2	2.4	2.8	/	/	/	/	/

由于微透镜阵列制品很小,制品体积占注射体积(制品体积+流道系统凝料体积)的百分比很小(约为 6%),流道系统的存在影响了微透镜阵列成型质量对工艺参数调变的响应。为更深入地了解各工艺参数对制品复制度的影响,实现在不增加流道系统质量的前提下增加制品质量的目的,采用单因素实验方案分别研究了各工艺参数对微透镜阵列成型质量和流道系统质量的影响规

律。单因素实验方案如表 2 所示。

4.4 表征

4.4.1 精密电子天平称重

沿浇口将微制品与浇注系统切开,如图 5 所示,用分析天平称量制品质量。实验中使用的称量微透镜阵列质量的仪器为梅特勒-托利多公司生产的 AB135-S 型精密电子天平,精度为 0.01/0.1 mg,最大称量范围 31 g/120 g(双量程)。

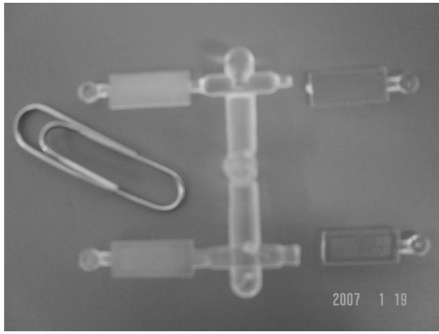


图 5 制品和浇注系统

Fig. 5 Part and runner system

4.4.2 影像测量仪观测

用 VMS-1510A 影像测量仪观测微结构的外观形貌,比较不同质量制品微结构的充填情况。

4.5 结果分析与讨论

4.5.1 微透镜阵列及其流道系统成型质量分析与讨论

根据分析天平称重的结果,计算样品质量的均值,绘制各工艺参数对微透镜阵列及其流道系统的影响曲线,如图 6 至图 15 所示。

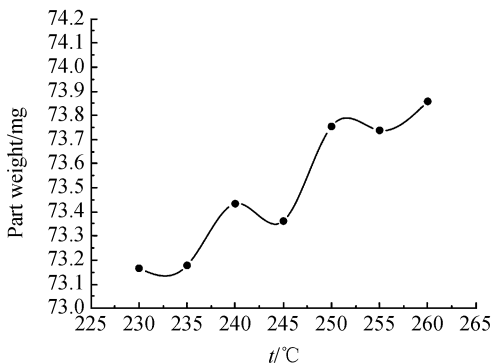


图 6 熔体温度对制品质量的影响

Fig. 6 Influence of melt temperature on part weight

根据各工艺参数对微透镜阵列及其流道系统成型质量影响的曲线图分析可得:

(1) 随熔体温度或模具温度的增加,流道系统的质量减小,模具温度的影响幅度较小;但是,微透镜阵列质量随熔体温度或模具温度的增加呈上升趋势,与流道系统的变化趋势相反,这是因为实验中,在维持注射压力、保压压力不变的情况下,随温度升高,PMMA 黏度下降,在流道系统中损失的压力减少,传递到型腔内的压力增加,有利于补料,增加密度。

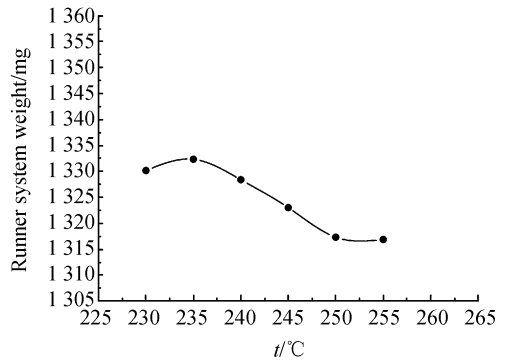


图 7 熔体温度对浇注系统质量的影响

Fig. 7 Influence of melt temperature on runner system weight

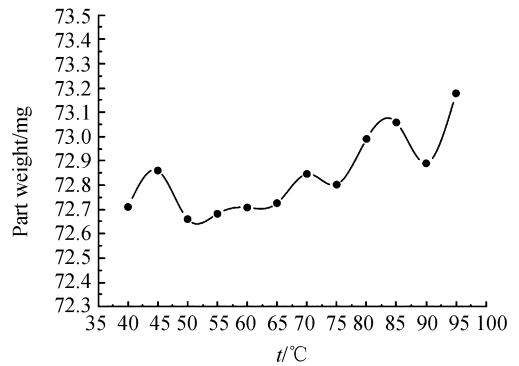


图 8 模具温度对制品质量的影响

Fig. 8 Influence of mold temperature on part weight

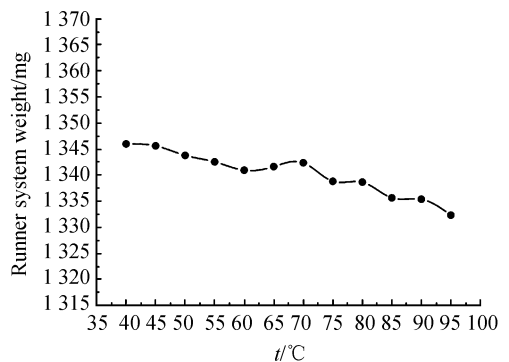


图 9 模具温度对浇注系统质量的影响

Fig. 9 Influence of mold temperature on runner system weight

(2) 随注射时间的增加,流道系统的质量单调增加,而微透镜阵列质量则先升后降,在注射时间为 0.8 s 时出现最大值,这是由于注射时间过短时,注射速率太大,熔体为湍流状态,严重时

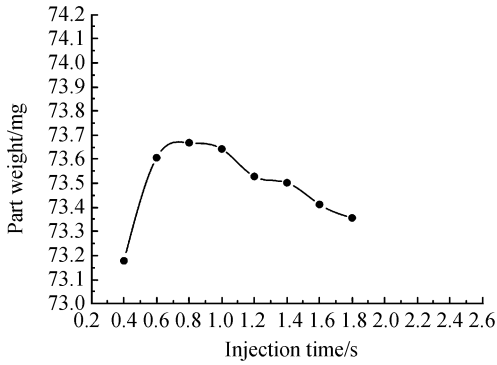


图 10 注射时间对制品质量的影响

Fig. 10 Influence of injection time on part weight

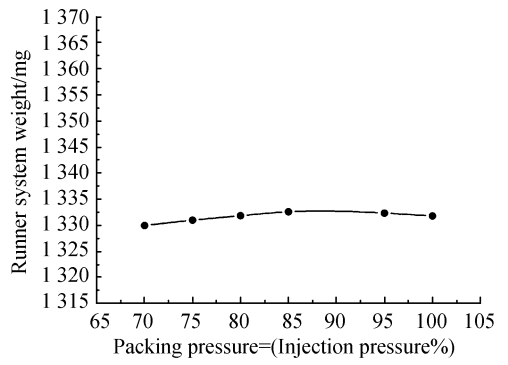


图 13 保压压力对浇注系统质量的影响

Fig. 13 Influence of packing pressure on runner system weight

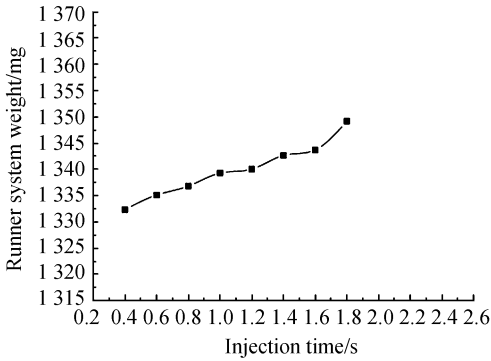


图 11 注射时间对浇注系统质量的影响

Fig. 11 Influence of injection time on runner system weight

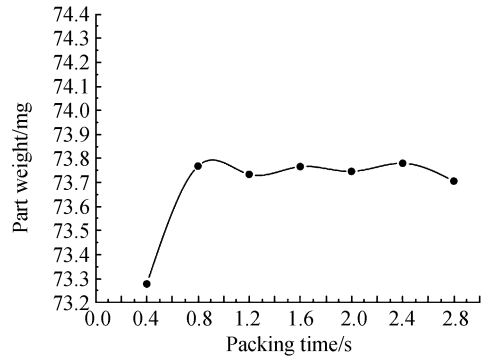


图 14 保压时间对制品质量的影响

Fig. 14 Influence of packing time on part weight

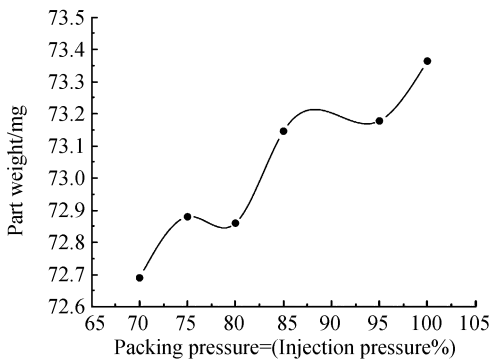


图 12 保压压力对制品质量的影响

Fig. 12 Influence of packing pressure on part weight

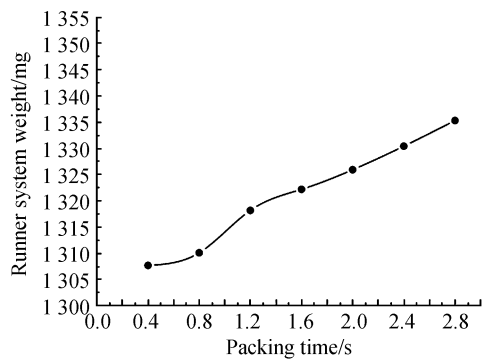


图 15 保压时间对浇注系统质量的影响

Fig. 15 Influence of packing time on runner system weight

引起熔体在模内喷射,减少进入型腔的塑料熔体,相反,如果注射时间过长,注射速率太低,熔体前沿过早凝固,微结构出现充填不足。

(3) 随保压压力的增加,微透镜阵列质量呈上升趋势,上升幅度约为 1%,保压压力对流道系

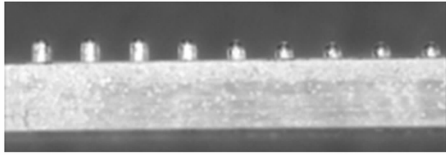
统的影响曲线较平缓,流道系统质量变化幅度不到 0.2%,这表明在浇口尚未封闭的情况下,保压压力能够更有效地从流道系统传递到制品,增加制品质量。

(4) 保压时间为 0.8 s 时, 制品质量不再变化, 而流道系统的质量随保压时间增加而单调增加, 上升幅度约为 2.1%, 这是因为浇口在保压时间为 0.8 s 时已经封闭, 再增加保压时间对制品重量不会产生影响, 但却能使流道系统质量增加。

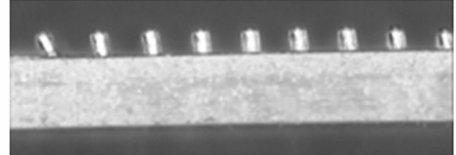
4.5.2 微结构阵列的成型形貌定性分析

为了定性分析制品微结构成型形貌与成型质量之间的关系, 由影像测量仪采集了不同注射时

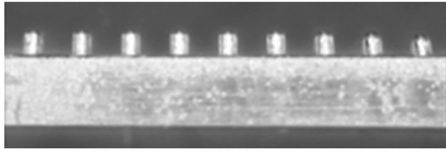
间下成型制品的侧视图, 如图 16 所示。由图中可以看出: 在注射时间为 0.6~1.2 s 时, 微结构充填较好, 即成型质量大的制品, 微结构充填要好一些, 微结构复制度高一些。因此以成型重量作为微结构零件注射成型复制度的量化评价指标进行工艺参数优化能够有效缩小工艺参数窗口, 最后再结合 SEM、AFM 等高档仪器可以找到实现微制品高复制度的工艺参数。



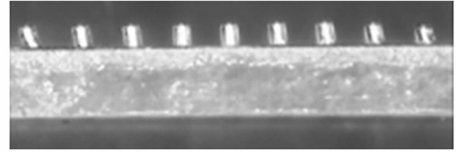
(a) $t=0.4$ s, $W=73.15$ mg



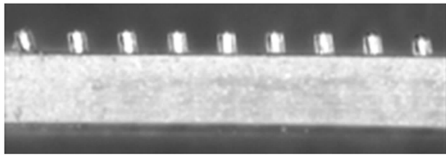
(b) $t=0.6$ s, $W=73.58$ mg



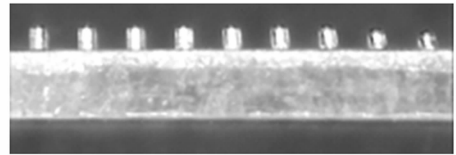
(c) $t=0.8$ s, $W=73.72$ mg



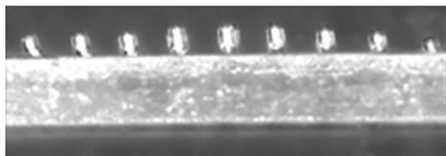
(d) $t=1.0$ s, $W=73.62$ mg



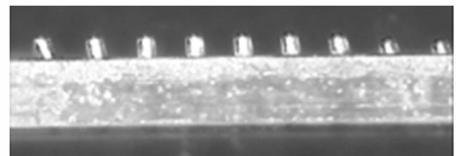
(e) $t=1.2$ s, $W=73.55$ mg



(f) $t=1.4$ s, $W=73.46$ mg



(g) $t=1.6$ s, $W=73.32$ mg



(h) $t=1.8$ s, $W=73.30$ mg

t - 注射时间, W - 制品质量

图 16 不同注射时间下成型制品侧视图

Fig. 16 Side views of molded parts vs. injection time

5 结 论

本文以微透镜阵列为例, 首次将制品成型质量作为制品复制度的初步量化衡量指标, 采用单

因素实验方法实验研究了各工艺参数对微结构零件复制度的影响规律。实验结果表明, 对于 PMMA 微圆柱阵列, 增加保压压力, 制品重量约增加 1%, 但浇注系统质量变化幅度不到 0.2%, 表明在浇口尚未封闭的情况下, 增加熔体温度和模具

温度能够使保压压力更有效地通过流道系统传递到微型腔,增加制品质量;影像测量仪观测结果发现,成型质量大的制品,微结构充填效果好,即微结构的复制度高。综上所述,制品质量大小可作

为制品复制制度的初步量化衡量指标,初步评价微结构零件的复制制度并研究各工艺参数对制品质量的影响规律对生产中指导微结构零件注射成型复制制度的提高有重要意义。

参考文献:

- [1] HECKELE M, SCHOMBURG W K. Review on micro molding of thermoplastic polymers[J]. *Micromech. Microeng.*, 2004, 14(3): 1-14.
- [2] RUPRCHT R, GIETZELT T, MULLER K, *et al.*. Injection molding of microstructured components from plastics, melts and ceramics[J]. *Microsystem Technologies*, 2002, 8(4/5): 351-358.
- [3] LI Y Y, CHEE G K, LEE L J, *et al.*. Experimental investigation and numerical simulation of injection molding with micro-features[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2002, 42(5):871-888.
- [4] LI Y Y. *Experimental and numerical analysis of injection molding with microfeatures*[D]. Graduate of the Ohio State University, 2004.
- [5] SU Y CH, SHAH J, LIN L W. Implementation and analysis of polymeric microstructure replication by micro injection molding[J]. *Micromesh. Microeng.*, 2004, 14(3):415-422.
- [6] YOUNG W B. Simulation of the filling process in molding components with micro channels[J]. *Microsystem Technologies*, 2005, 11(6/7): 410-415.
- [7] JAMES L, MADOU L, KOELLING K W, *et al.*. Design and fabrication of CD-like microfluidic platforms for diagnostics: polymer-based microfabrication[J]. *Biomedical Microdevices*, 2001, 3(4):245-254.
- [8] LEE B K, KIM D S, KWON T H. Replication of microlens arrays by injection molding [J]. *Microsystem Technologies*, 2004, 10(6):531-535.
- [9] 蒋炳炎,沈龙江,罗建华,等. 微特征结构对导光板翘曲变形影响的仿真研究[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(2):30-36.
- [10] JIANG B Y, SHEN L J, LUO J H, *et al.*. Effects of different micro-feature structures on the warpage and deformation of light guide plate[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2):30-36. (in Chinese)
- [10] 勾治践,樊仲维,卢铿,等. 光学塑料透镜注射成型关键技术的研究[J]. *光学精密工程*, 2000, 8(6):526-531.
- [10] GOU ZH J, FAN ZH W, LU E, *et al.*. Injection molding method for optical plastics lens[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(6):526-531. (in Chinese)
- [11] 许乔,叶钧,周光亚,等. 折射型微透镜阵列的光刻热融法研究[J]. *光学学报*, 1996, 16(9):1326-1331.
- [11] XU Q, YE J, ZHOU G Y, *et al.*. Fabrication of refractive microlens array by melting photoresist[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(9): 1326-1331. (in Chinese)
- [12] SHA B, DIMOV S, GRIFFITHS C, *et al.*. Investigation of micro-injection moulding: factors affecting the replication quality[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 183: 284-296.
- [13] ZHAO J, MAYES R H, CHEN G, *et al.*. Effects of process parameters on the micro molding process [J]. *Polymer Engineering and Science*, 2003, 43(9): 1542-1554.
- [14] DESPA M S, KELLY K W, COLLIER J R. Injection molding of polymeric LIGA harms [J]. *Microsystem Technologies*, 1999, 6(2): 60-66.
- [15] SCHIFT H, GLAUS F, GOBRECHT J, *et al.*. V-groove replication: a tool for quality control of a compact disc injection molding process[R]. *PSI Annual Report*, 2000.
- [16] ONG N S, KOH Y H. Experimental investigation into micro injection molding of plastic parts [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2005, 20(2): 245-253.
- [17] 王利霞,杨杨,王蓓,等. 注塑成型工艺参数对制品收缩率变化的影响及工艺参数优化[J]. *高分子材料科学与工程*

程, 2004, 20(2): 173-176.

WANG L X, YANG Y, WANG B, *et al.*. Investigation of the influence of processing parameter on volumetric shrinkage variation of plastic injection molded parts and process optimization[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2004, 20(2): 173-176. (in Chinese)

- [18] YANG Y, GAO F R. Injection molding product weight: online prediction and control based on a nonlinear principal component regression model[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2006, 46(4): 540-548.
- [19] KAMAL M R, VARELA A E, PATTERSON W. Control of part weight in injection molding of amorphous thermoplastics[J]. *Polymer Engineering and Science*, 1999, 39(5): 940-952.
- [20] POSTAWA P, KOSZKUL J. Change in injection moulded parts shrinkage and weight as a function of processing Conditions[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005: 109-115.
- [21] 沈龙江. 微透镜阵列注射成型复制度评价与工艺参数优化[D]. 中南大学硕士论文, 2007.
- SHEN L J. *Replication fidelity evaluation of microlens array injection molding and optimization*[D]. Central South University, 2007. (in Chinese)

作者简介: 蒋炳炎(1963—), 男, 教授, 主要从事先进制造技术、微注射成型及 MEMS 的研究。E-mail: jby@mail. csu. edu. cn

● 下期预告

一种新型磁悬浮飞轮用永磁偏置径向磁轴承

房建成, 杨 磊, 孙津济, 韩邦成

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

针对现有径向磁轴承结构电励磁磁路耦合的特点, 分析了一种新型磁悬浮飞轮用永磁偏置径向磁轴承结构及其工作原理。采用等效磁路法对磁轴承的永磁磁路和电励磁磁路进行计算, 得出磁轴承的数学模型, 并给出磁轴承主要参数的设计方法。最后, 通过有限元法对该磁轴承进行仿真分析, 从磁场分布以及 x 方向通电流时对力 F_y 的影响两方面验证该结构电励磁回路在 x 、 y 方向间的解耦性, 其中 $F_y < 3\% F_x$ 。理论研究和仿真分析表明: 这种径向磁轴承结构有效地避免了磁通在两个径向自由度间的耦合, 从而能够扩大系统线性工作范围和稳定裕度, 提高磁轴承系统的控制性能。