

研究论文

细胞皿微型塑件注射成型工艺

徐 斌, 王敏杰, 于同敏, 徐 华

(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 微尺度聚合物熔体充模流动过程较复杂, 涉及影响因素较多, 针对微尺度聚合物熔体的充模流动特点, 以细胞皿塑件为研究对象, 采用变模温、抽真空排气及微细电火花加工技术, 设计制造了微注塑模具。基于 Taguchi 实验设计方法, 以高密度聚乙烯 (HDPE) 和聚甲醛 (POM) 两种材料研究了工艺参数及其交互作用对微塑件成型质量的影响规律。实验结果表明, 对于 HDPE 材料, 模具温度对填充率的影响最大, 保压压力次之, 熔体温度和保压时间影响相对较小; 对于 POM 材料, 熔体温度对填充率的影响最大, 保压压力次之, 模具温度和保压时间影响相对较小。

关键词: 微注塑成型; 细胞皿; 成型工艺; 正交实验

中图分类号: TG 76; TQ 320

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2010) 11-2999-07

Micro injection parts based on cell container

XU Bin, WANG Minjie, YU Tongmin, XU Hua

(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: Microscale polymer melt filling process is complex due to many factors involved. In this paper, depending on the characteristics of microscale filling flow of polymer melt, the micro injection mold for cell container was designed and manufactured with several technologies, including variotherm system, vacuum system and micro-electrical discharge machining (EDM). Based on the Taguchi experimental design method, the process parameters were studied with high-density polyethylene (HDPE) and polyoxymethylene (POM), and their interactions on the quality of molding micro part were investigated. The results showed that for HDPE, the influence of mold temperature on filling rate was the principal parameter in the molding process. Packing pressure was the secondary factor. The impact of melt temperature and packing pressure time was relatively small. The experimental results also indicated that for POM, the influence of melt temperature on filling rate was the main parameter in the molding process. Packing pressure was the secondary factor. The impact of mold temperature and packing pressure time were relatively small.

Key words: micro injection molding; cell container; molding process; orthogonal test

引 言

随着机电系统 (MEMS)、微系统 (MST)

及纳米科学技术的快速发展, 微小型化已经成为产品设计和开发的趋势, 促进了微型零件的大量需求。微注塑成型作为微成型领域中高效、高一一致性

2010-02-08 收到初稿, 2010-05-03 收到修改稿。

联系人及第一作者: 徐斌 (1975-), 男, 博士研究生。

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划重点项目 (2006BAF04B13); 国家重点基础研究发展计划项目 (2007CB714502)。

Received date: 2010-02-08.

Corresponding author: XU Bin, Haroldexu@163.com

Foundation item: supported by the National Key Technology R&D Program of China (2006BAF04B13) and the National Basic Research Program of China (2007CB714502).

的注塑成型微小精密制件的加工方法之一^[1-2]，近年来得到了迅速发展，现已能成型出质量为毫克级的具有微米级尺寸的微小制件。微塑件具有微米级的精度，因此对其成型质量要求较高。聚合物在微型腔流动时，由于型腔表体比较大而引发的微尺度效应以及表面张力、黏性耗散、壁面滑移、动电效应等微尺度因素使聚合物流动与宏观尺度不同^[3-13]，因此传统注塑成型工艺参数不再适用于微注塑成型。目前，许多学者^[14-24]对微注塑成型工艺的研究主要集中在具有宏观尺寸带有微结构的塑件，因塑件所用材料及其几何结构特征不同，得出的结论也不尽一致。对于微型塑件，Shen 等^[25]采用 Moldflow 软件数值模拟研究了微齿轮成型工艺，可见对于微型塑件成型工艺的研究还没形成较完善的工艺体系，有必要进行较为深入的实验研究。

在生物，特别是组织工程和干细胞应用领域的研究中，细胞皿得到了广泛应用。其整体结构尺寸微小，而且薄壁，本文以其为研究对象，设计并制造了微模具。在此基础上，利用微注塑机完成短射实验，计量填充塑件的质量，以填充率作为实验指标，通过正交实验方法研究了注塑工艺参数对微型塑件填充率的主次影响顺序及其最优水平组合。

1 细胞皿结构

本文以简化的细胞皿为微注塑成型研究对象，整体尺寸为 $1000\ \mu\text{m} \times 1000\ \mu\text{m} \times 350\ \mu\text{m}$ ，阵列 9 个长宽高为 $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m} \times 250\ \mu\text{m}$ 的微腔，壁厚为 $100\ \mu\text{m}$ ，结构如图 1 所示。

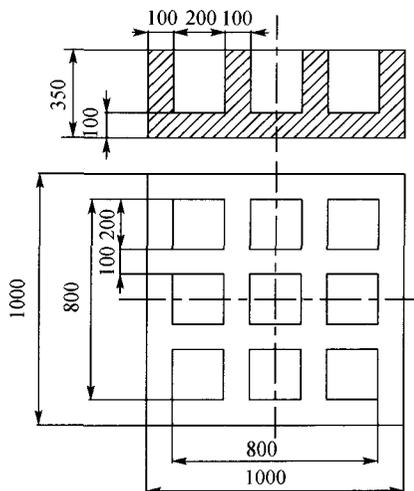


图 1 细胞皿结构

Fig. 1 Diagram of cell container

2 模具设计与制造

2.1 变模温系统

微注塑充模流动过程中，由于型腔表体比大，微熔体所含热量较少极易散失，导致熔体温度降低较快，在模具表面形成冷凝层，造成充填困难；但高的模温导致冷却时间加长，影响成型周期。因此，研制变模温系统是十分必要的。

由于水油电相结合的变模温技术成本相对较低，效率高，易实现，本文所采用的变模温设计方案如图 2 所示。在镶块的两侧布置 4 根电加热棒②-②、③-③，单根功率为 450 W；在加热棒的外围对称布置 8 个油道⑤-⑤、⑥-⑥、⑦-⑦、⑧-⑧，油道的直径是 8 mm；在油道与加热棒之间布置冷却水道①-①、④-④，水道直径是 6 mm。其工作过程是注塑前用热油道将模具温度调到塑件脱模温度，同时也起均匀模温的作用，用加热棒加热到预定温度，注塑时断开加热棒电源，完成后通冷却水快速冷却。

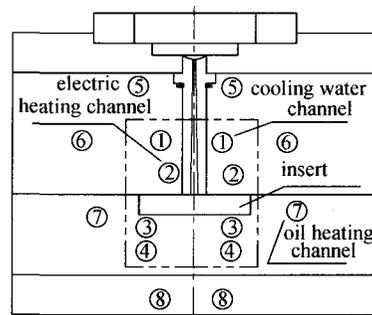


图 2 变模温示意图

Fig. 2 Schematic diagram of mold variothermal

2.2 抽真空系统

注塑成型时，微型腔中熔体流动速率较高，合模后，模具的型腔有如盲孔一样，同时模具加工精度较高，型腔中的气体无法有效从分型面排出。若熔体注入型腔前空气无法有效排出，将造成短射或烧焦等质量缺陷，故需对微型腔采用抽真空进行排气。本文所设计的抽真空方案为在浇口套、顶杆、拉料杆、传感器、分型面处采用耐高温硅胶密封圈密封，结构如图 3 所示。当注塑机的喷嘴顶在主流道入口处时，主流道、分流道、型腔之间形成一个密闭的空间。

2.3 镶块设计

镶块是模具的核心部件，在镶块上加工有型

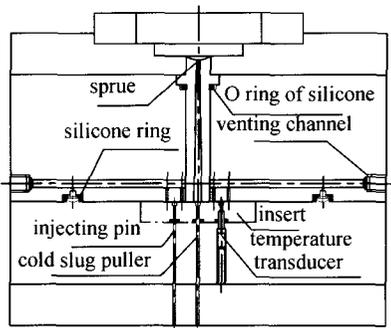


图 3 抽真空示意图

Fig. 3 Schematic diagram of mold vacuum

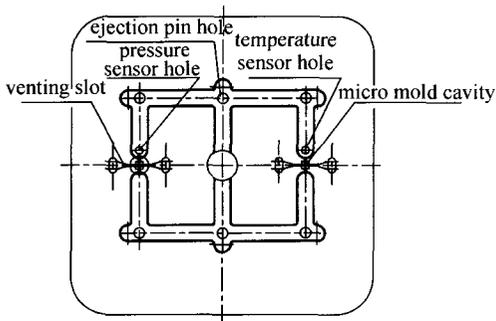


图 4 模具镶块示意图

Fig. 4 Schematic diagram of mold insert

腔、排气通道、流道、传感器安装孔、顶杆孔以及密封槽，结构如图 4 所示。塑件中的微结构几何尺寸在微米级，传统的直接顶出塑件的脱模方法已不再适用，采用在塑件的两侧的流道对称布置顶杆，通过顶出流道凝料，由浇口带动塑件脱模。

在型腔的两侧加工引气道，抽真空时型腔里的气由此引出。

在两型腔浇口的附近安装压力传感器，温度传感器，用于成型时模具温度和注塑压力的测试。

2.4 微型腔加工

微型腔加工质量的好坏关系到塑件成型质量、脱模问题，由于传统加工方法已不适用于微型腔的加工，因而微型腔的加工是微注塑模具制造的难点。本文所用的微型腔由微细电火花铣削机床加工

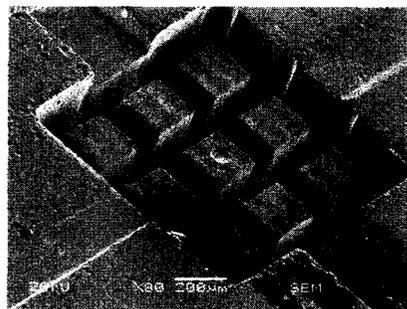


图 5 型腔 SEM 照片

Fig. 5 SEM photo of micro cavity

而成，如图 5 所示。

3 微注塑成型工艺实验

3.1 实验设备与材料

实验用材料为盘锦石化公司生产的 5070 型 HDPE 和日本宝理公司生产的 M90-44 型 POM。实验前先在干燥机烘干 3 h，温度为 70℃。变模温装置采用 4 根直径为 7 mm、功率为 450 W 的电热棒进行电加热。同时，采用自动模具控温机进行油加热。模具温度测量装置采用瑞士奇石乐仪器股份有限公司生产的直径为 1 mm 的 6193A 型温度传感器，数据采集系统为 (Kistler como injection) 记录实验数据。冷却装置采用冷水机。注塑前用真空泵抽真空，经真空表测试，型腔的真空度可达到 -0.098 MPa。微注塑机选用德国 BOY 公司生产的 BOY12A 型，最大注射速度为 240 mm · s⁻¹。

3.2 实验设计

选择模具温度、熔体温度、注射速度、保压压力、保压时间 5 个工艺参数作为影响填充的因素，每个因素选择 4 个水平，采用 L₁₆(4⁵) 正交表进行正交实验，其中注射速度取实际注射速度与最大注射速度的比值，各实验因素的水平取值见表 1、表 2。实验指标为填充率 (%), 即型腔短射填充质量与充满后的塑件质量之比。

表 1 HDPE 材料因素水平

Table 1 Level of factors for HDPE

Level	A (mold temperature/℃)	B (melt temperature/℃)	C (injection velocity/%)	D (packing pressure /MPa)	E (packing pressure time/s)
1	65	205	0.5	34	0.8
2	70	210	1.0	36	1.2
3	75	215	1.5	38	1.6
4	80	220	2.0	40	2.0

表 2 POM 材料因素水平
Table 2 Level of factors for POM

Level	A (mold temperature/°C)	B (melt temperature/°C)	C (injection velocity/%)	D (packing pressure /MPa)	E (packing pressure time/s)
1	65	200	1	44	0.8
2	70	205	3	46	1.2
3	75	210	5	48	1.6
4	80	215	7	50	2.0

4 结果与讨论

为减少实验过程中外界干扰对实验结果的影响, 相同工艺条件下的每组实验进行多次, 直到塑件填充形状稳定后再选取塑件进行测量。切断浇口与流道的连接部位, 每组实验选 30 个塑件, 堆放到上海精天电子仪器有限公司生产的型 FA1004A 电子天平上称质量。天平的精度为 0.0001 g。扣除浇口熔体质量, 其余则为型腔中填充的熔体质量。其结果如表 3、表 4 所示。

4.1 HDPE 材料的实验结果及分析

HDPE 材料塑件填充显微照片如图 6 所示。根据表 3 的实验结果, 对各个水平因素下的实验指标求和取平均值, 结果如图 7 所示。

根据图 7 的结果, 采用极差分析方法得到各工艺参数对填充率影响的次序顺序为模具温度、保压压力、注射速度、熔体温度、保压时间。其原因分析如下: 对于 HDPE 材料, 实验测得熔体的非牛顿指数较大, 熔体流动过程中喷泉涌动现象严重, 易导致熔体与型腔壁面间热传递加剧; 微尺度流动时, 由于微型腔表体比较大, 微通道中心处熔体的热量极易散失, 因此改变模温能在较大程度上补偿热量的损失, 有助于提高填充率。相反提高熔体温度, 在流入浇口时, 由于浇口细长且薄, 散热能力较强, 熔体流入型腔时温度变化不大, 另外 HDPE 材料的黏度受温度影响较小, 因此提高熔体温度不能有效提高填充率。

增大保压压力和提高注射速度能增大熔体的剪切速率, 由于型腔较小, 注射速度在较小范围变化会引起型腔中熔体剪切速率范围变化较大。HDPE 材料的黏度对剪切速率较敏感, 由于剪切变稀, 熔体黏度降低较多, 因此提高注射速度能有效提高填充率。

对于保压时间, 塑件在较短时间内填充完毕, 由于浇口尺寸较小, 浇口处熔体冷却固化很快, 增

表 3 HDPE 材料实验结果
Table 3 Results of experiment for HDPE

No.	Mass/mg	Volume fill percentage/%
1	0.004	1.5
2	0.022	8.9
3	0.053	21.2
4	0.190	75.8
5	0.046	18.4
6	0.061	24.58
7	0.056	22.2
8	0.087	34.9
9	0.080	31.8
10	0.204	81.7
11	0.074	29.4
12	0.059	23.6
13	0.200	80.15
14	0.059	23.5
15	0.241	96.37
16	0.229	91.65

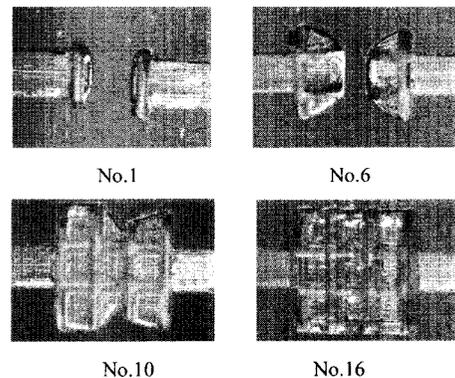


图 6 HDPE 材料塑件填充显微照片
Fig. 6 Photos of micro parts for HDPE

加保压时间不能使熔体流入型腔, 因此增加保压时间对提高填充率影响不大。

4.2 POM 材料的实验结果及分析

POM 材料塑件填充显微照片如图 8 所示。根据表 4 的实验结果, 对各个水平因素下的实验指标求和取平均值, 结果如图 9 所示。

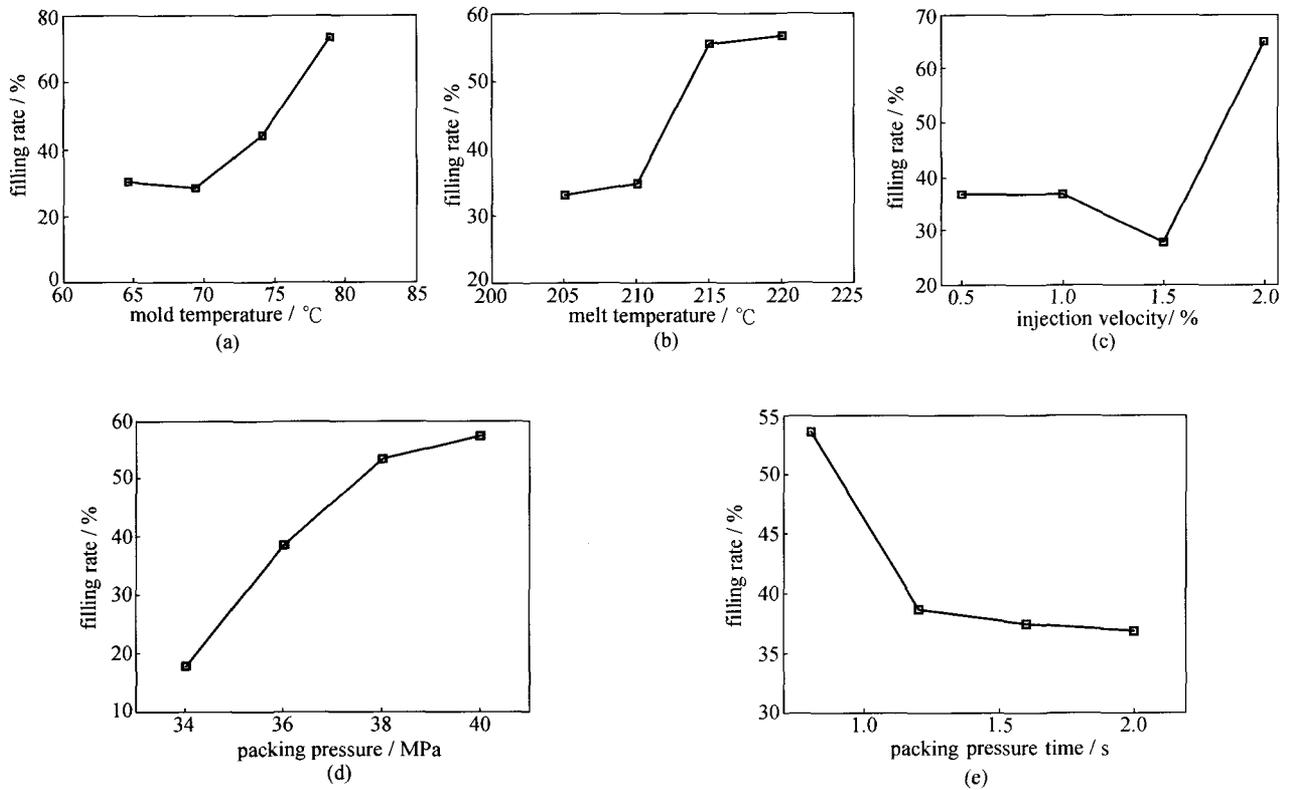


图 7 HDPE 材料各因素对填充率的影响
Fig. 7 Effect of factors on filling rate for HDPE

表 4 POM 材料实验结果

Table 4 Results of experiment for POM

No.	Mass/mg	Volume fill percentage/%
1	0.009	2.5
2	0.029	8.45
3	0.133	38.23
4	0.280	80.65
5	0.068	19.6
6	0.078	22.4
7	0.129	37.13
8	0.263	75.8
9	0.221	63.83
10	0.228	65.67
11	0.033	9.6
12	0.088	25.4
13	0.091	26.15
14	0.089	25.68
15	0.233	67.23
16	0.262	75.52

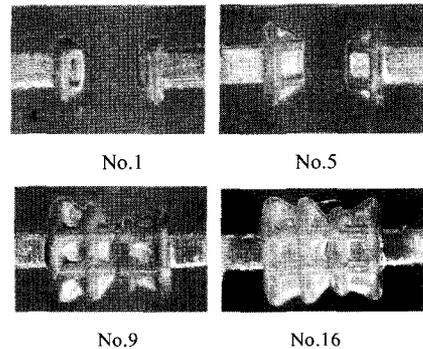


图 8 POM 材料塑件填充显微照片
Fig. 8 Photos of micro parts for POM

根据图 9 的结果，采用极差分析方法得到各工艺参数对填充率影响的主次顺序为熔体温度、保压压力、注射速度、保压时间、模具温度。其原因分析如下，对于 POM 材料，熔体的非牛顿指数较小，流动过程中极易形成柱塞流，喷泉效应较弱，在壁面处易发生滑移。另外，POM 是热敏性材料，提高熔体温度能有效降低熔体黏度，因此增加熔体的温度能有效改善填充率。相反增加模具温度，

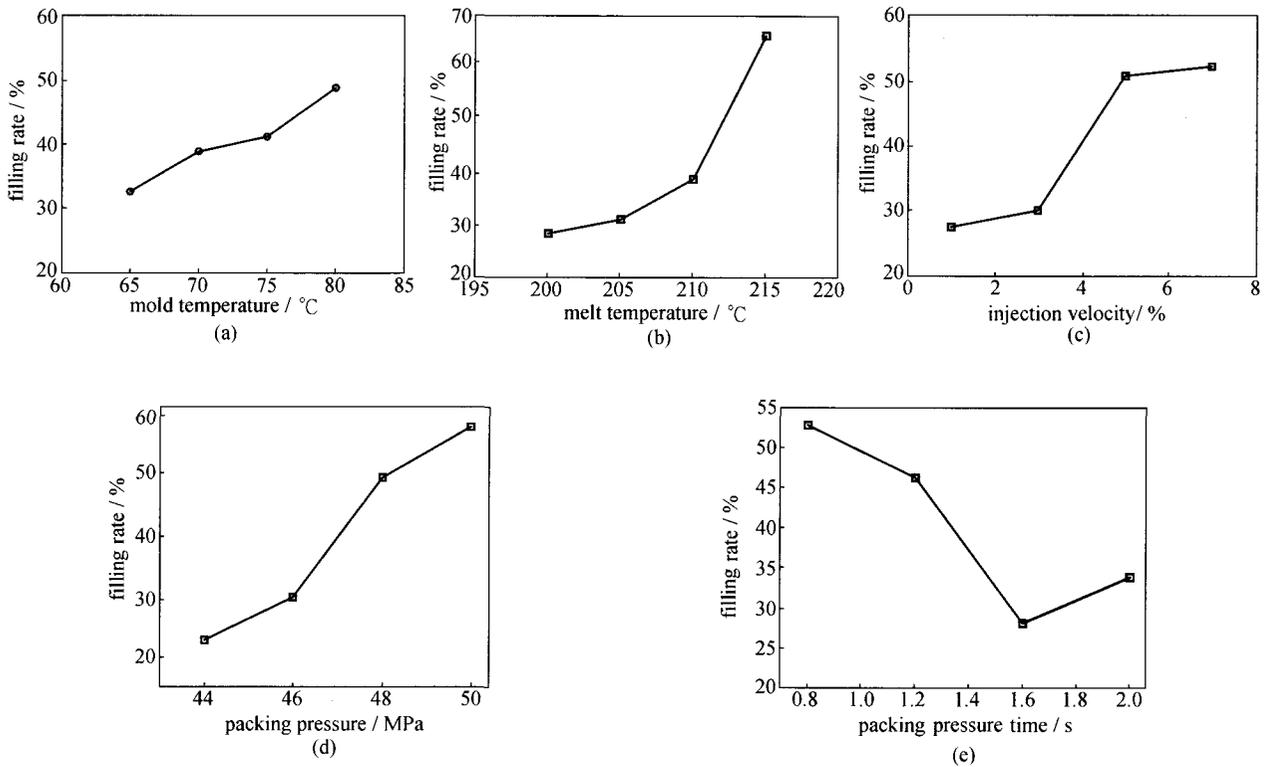


图 9 POM 材料各因素对填充率的影响
Fig. 9 Effect of factors on filling rate for POM

由于熔体流动过程中的壁面滑移效应，在壁面处易形成冷凝层，另外熔体较低的导热率，熔体的温度瞬间较难变化，因此增加模温不会对提高填充率带来很大变化。

增大保压压力和提高注射速度能增大熔体的剪切速率，由于型腔较小，注射速度在较小范围变化会引起型腔中熔体剪切速率范围变化较大，由于剪切变稀，熔体黏度降低较多，因此增大保压压力和提高注射速度能有效提高填充率。

对于保压时间，由于塑件在较短时间内填充完毕，浇口尺寸较小，浇口处熔体冷却固化很快，增加保压时间不能使熔体流入型腔，因此增加保压时间对提高填充率影响不大。

根据图 9 极差分析结果，对于 POM 材料的成型工艺最优水平组合为 A4-B4-C4-D4-E1。通过填充实验，结果如图 10 所示，填充率为 100%。

5 结 论

(1) 以细胞皿为研究对象，研制了微型塑件注塑模具，通过注塑实验，脱模后获得了完整的制

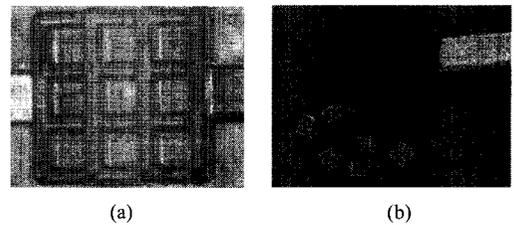


图 10 细胞皿照片
Fig. 10 Photo of cell container

品，这表明所设计的微注塑模具对于解决微型塑件的注塑成型技术难题是有效的。

(2) 通过正交实验，研究了细胞皿微型塑件成型过程中影响填充率因素大小。实验结果表明，对于不同材料，成型工艺影响因素的主次顺序不同。

(3) 以正交实验找出 POM 材料的最优成型工艺参数组合，通过注塑成型实验，填充率为 100%。表明提高塑件填充率是各个工艺参数综合作用结果，有必要对工艺参数进行优化以提高塑件的成型质量。

References

- [1] Piotter V, Holstein N, Plewa K, *et al.* Replication of micro components by different variants of injection molding. *Microsystem Technologies*, 2004, **10** (6/7): 547-551
- [2] Michaeli W, Spennemann A, Gärtner R. New plastification concepts for micro injection molding. *Microsystem Technologies*, 2002, **8** (1): 55-57
- [3] Yao D G, Kim B. Scaling issues in miniaturization of injection molded parts. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, **126** (4): 733-738
- [4] Yao D G, Kim B. Simulation of the filling process in micro channels for polymeric materials. *Micromech. Microeng.*, 2002, **12** (5): 604-610
- [5] Chien R D, Jong W R, Chen S C. Study on rheological behavior of polymer melt flowing through micro-channels considering the wall-slip effect. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, **15** (8): 1389-1396
- [6] Chen S C, Tsai R I, Chien R D, *et al.* Preliminary study of polymer melt rheological behavior flowing through micro-channels. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2005, **32**: 501-510
- [7] Chen C S, Chen S C, Liaw L W, *et al.* Rheological behavior of POM polymer melt flowing through micro-channels. *European Polymer Journal*, 2008, **43** (6): 1891-1898
- [8] Eringen A C, Okada K. A lubrication theory for fluid with microstructure. *Int. J. Eng. Sci.*, 1995, **33** (15): 2297-2308
- [9] Zhuang Jian (庄俭), Wang Minjie (王敏杰), Yu Tongmin (于同敏). Study on the effects of wall slip on melt filling flow in micro injection molding. *China Mechanical Engineering* (中国机械工程), 2007, **18** (16): 1995-1999
- [10] Yu Tongmin (于同敏), Zhuang Jian (庄俭), Wang Bin (王斌), Li Youmin (李又民). Study on wall slip in micro injection molding flow. *Polymer Materials Science & Engineering* (高分子材料科学与工程), 2007, **23** (6): 20-23
- [11] Xu Bin (徐斌), Wang Minjie (王敏杰), Yu Tongmin (于同敏), Zhao Danyang (赵丹阳). Study on micro-scale effect on the impact of polymer melt wall slip. *Journal of Materials Engineering* (材料工程), 2008, **10**: 16-20, 24
- [12] Kim D S, Lee K C, Kwon T H, *et al.* Micro-channel filling flow considering surface tension effect. *Micromech. Microeng.*, 2002, **12** (3): 236-246
- [13] Morini G L. Viscous heating in liquid flows in micro-channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, **48**: 3637-3647
- [14] Piotter V, Holstein N, Plewa K, *et al.* Replication of micro components by different variants of injection molding. *Microsystem Technologies*, 2004, **10** (6/7): 547-551
- [15] Michaeli W, Spennemann A, Gärtner R. New plastification concepts for micro injection molding. *Microsystem Technologies*, 2002, **8** (1): 55-57
- [16] Despa M S. Molding large area plastic parts covered with HARMs [D]. Louisiana: Louisiana State University, 2001
- [17] Xu G J, Yu L Y, Lee L J, *et al.* Experimental and numerical of injection molding with micro-features. *Polym. Eng. Sci.*, 2005, **42** (5): 866-875
- [18] Sha B, Dimov S, Griffiths C, *et al.* Investigation of micro-injection moulding: factors affecting the replication quality. *Mater. Proc. Tech.*, 2007, **183** (2/3): 284-296
- [19] Ong N S, Koh Y H. Experimental investigation into micro injection molding of plastic parts. *Materials and Manufacturing Processes*, 2005, **20** (2): 245-253
- [20] Theilale U A, Hansen H N. Surface microstructure replication in injection molding. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, 2007, **33**: 157-166
- [21] Lion A C, Chen R H. Injection molding of polymer micro- and sub-micron structures with high-aspect ratios. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, 2006, **28** (11): 1097-1103
- [22] Jiang Bingyan (蒋丙炎), Chu Chunpeng (楚纯朋), Tang Meilin (汤美林), Shen Longjiang (沈龙江). Influence of part's geometry characters on filling length of injection molded parts with high aspect ratio micro structures. *Journal of Central South University: Science and Technology* (中南大学学报: 自然科学版), 2008, **39** (5): 1000-1004
- [23] Zhuang Jian (庄俭), Wu Daming (吴大明), Zhao Zhongli (赵中里), Zhang Hongbo (张洪波). Experimental investigation into process of micro injection molding. *CIESC Journal* (化工学报), 2009, **60** (4): 1040-1045
- [24] Song Mancang (宋满仓), Liu Zhu (刘柱), Yu Tongmin (于同敏), Zhao Danyang (赵丹阳). Experiment research and numerical simulation of injection molding characteristics for ultra-thin wall plastic parts. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* (机械工程学报), 2008, **44** (8): 148-151
- [25] Shen Y K, Wu W Y. An analysis of the three-dimensional micro-injection molding. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 2002, **29** (3): 423-431