

微细胞皿注塑模具变温系统设计

徐 斌¹ 高春雨² 王敏杰³ 于同敏³

1. 西南科技大学制造过程测试技术教育部重点实验室, 绵阳, 621010

2. 国家安全生产监督管理总局研究中心, 北京, 100713

3. 大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 大连, 116024

摘要:采用微细电火花技术铣削加工了细胞皿模具型腔,以聚丙烯(PP)为例进行了成形工艺数值模拟分析,结果表明,注射速率、模具温度、熔体温度对充模过程影响较大,模具温度需要达到 120℃ 型腔才能充满。提出了油水电相结合的变模温技术,变模温实验结果表明,型腔温度从 80℃ 变化到 120℃ 大约需要 6min。填充实验表明,油水电相结合的变模温技术对实现微注塑模具成形过程的变模温是可行的。

关键词:微注塑成形; 细胞皿; 变模温系统; 成形工艺; 数值模拟

中图分类号: TG76; TQ320

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2012.09.022

Variothermal System Design of Injection Mold for Micro Cell Container

Xu Bin¹ Gao Chunyu² Wang Minjie³ Yu Tongmin³

1. Key Laboratory of Testing Technology for Manufacturing Process of Ministry of Education, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan, 621010

2. State Administration of Work Safety Research Center, Beijing, 100713

3. Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning, 116024

Abstract: Using micro-EDM milling, a three-dimensional mold cavity was machined. The molding process was carried out with polypropylene (PP) by numerical simulation. The results indicate that mold temperature, melt temperature and injection rate play significant role on the filling process. In addition, the simulation shows that the micro cavity can be filled when the mold temperature is up to 120℃. Therefore, variothermal technology with the combination of oil, water and electricity is developed. After testing, variothermal time is about 6 minutes when the cavity temperature is changed from 80℃ to 120℃. After injection experiments, the results explain that the developed variothermal method is feasible to micro injection molding.

Key words: micro injection molding; cell container; variothermal system; molding process; numerical simulation

0 引言

随着微纳米技术的快速发展,微型化和精密化已经成为产品设计和开发的趋势,微注塑成形制品特征尺寸越来越小^[1-5]。有关研究表明,微塑件成形过程并不是宏观塑件成形工艺的成比例缩小,随着型腔结构尺寸与体积的不断减小,微尺度下多种影响因素的作用显现出来^[6-10],导致常规注塑模具的设计理论与方法已不能完全适用,因此需要从微尺度角度考虑各种微尺度下的影响因素及其特点,采用新的思维理念形成微注塑模具设计的理论与方法。微注塑模具设计与传统注塑模具设计不同,其中与传统注塑模具设计不同之一是模具型腔表体比较大,充模流动时熔体极易

冷却,因此在微注塑成形时需要较高的模具温度,而塑件脱模时又要求模具温度迅速降低至脱模温度,故微注塑模具需具有快速变温系统。

目前变温方式主要有电热水冷变模温控制,感应加热变模温控制,薄膜电阻式加热变模温控制,复合模壁绝热—压缩热空气加热变模温控制,以及红外加热、高频临界加热、激光加热、感应加热^[11-18]等。微注塑成形对模具的温度均匀性要求较高,否则会造成结晶分布不均,影响制品的力学性能^[19]。笔者在加工细胞皿模具微型腔的基础上,通过数值模拟,找出了影响充模流动的关键因素,提出了油水电相结合的变模温方式(电加热升温速度快,水冷却传热效率高,热油主要起稳定和均匀模具温度的作用),这种方法易于实现,成本较低,升降温速度快,成形制品质量稳定。通过实验测试,采用此方法能够达到微注塑成形的要求。

收稿日期: 2011—10—24

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助重点项目(2006BAF04B13); 西南科技大学校博士基金资助项目(10zx7143)

1 细胞皿结构

本文所研究的细胞皿整体尺寸为 $1000\mu\text{m} \times 1000\mu\text{m} \times 350\mu\text{m}$ ，其上阵列 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。

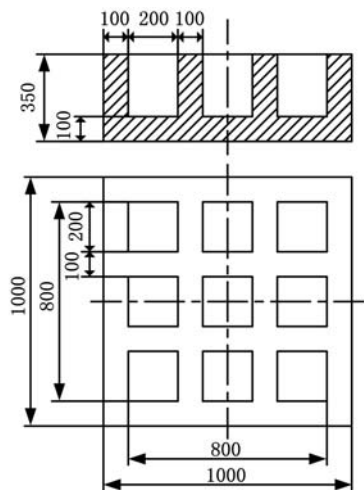


图 1 细胞皿结构图(单位: μm)

2 微小型腔加工

镶块的材料为 P20 模具钢，微型腔、浇口和引气槽由大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室自行研制的微细电火花铣削机床加工而成，如图 2 所示。用 Newview 5022 型 ZYGO 表面轮廓仪测量了模腔方块顶面的表面粗糙度， R_a 为 $0.273\mu\text{m}$ 。

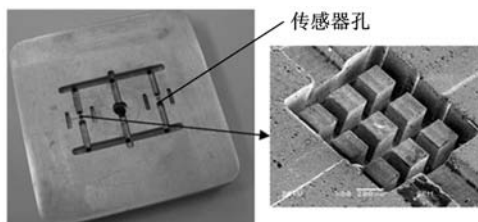


图 2 模具型腔照片

3 数值模拟

由于受微尺度效应的影响，微尺度聚合物熔体的流变特性和熔体的壁面滑移与宏观尺度下的不同，但壁面滑移对熔体的充模流动影响随微通道的特征尺寸减小而降低^[20]，对于微通道特征尺寸为 $100\mu\text{m}$ 的模具，其影响小于 5%，故忽略壁面滑移的影响。本文借助传统注塑充模流动过程分析方法进行微注塑成形过程分析。

3.1 几何模型

为了准确分析工艺参数的设置对熔体经过主流道、分流道、浇口进入微型腔的充填物流动过程

的影响，采用型腔与其浇注系统一体的几何模型。浇注系统及制品采用四面体 3D 网格划分，如图 3 所示。由于流道尺寸比浇口和型腔尺寸大很多，对浇口和微型腔进行局部网格细化可以缩短计算时间，提高仿真精度。制品三维网格模型如图 4 所示。

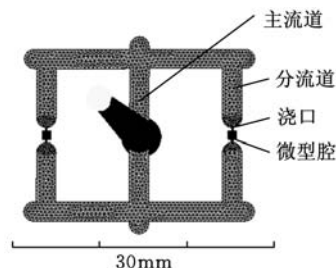


图 3 浇注系统及制品网格模型

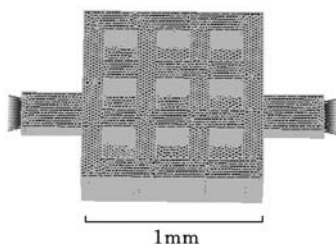


图 4 制品网格模型

3.2 控制方程

熔体在微型腔中流动时，根据 Knudsen 数的分类标准，当微通道的特征尺寸大于聚合物熔体分子尺寸时，熔体流动仍然满足连续性假设，则用来描述熔体充模流动的基本方程(即连续方程、动量方程和能量方程)仍然适用。

熔体的流变行为由 Cross-WLF7 参数模型表示为

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \eta_0(T, p) / [1 + (\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*})^{1-n}] \quad (1)$$

$$\eta_0(T, p) = D_1 \exp(\frac{-A_1(T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)}) \quad (2)$$

$$T^* = D_2 + D_3 p \quad (3)$$

$$A_2 = \tilde{A}_2 + D_3 p \quad (4)$$

式中， $\dot{\gamma}$ 、 T 和 p 分别为熔体的剪切速率、温度和压力； n 为非牛顿指数； τ^* 为材料常数； D_1 、 D_2 、 D_3 、 A_1 、 \tilde{A}_2 为模型常数。

3.3 计算结果与分析

熔体材料选用聚丙烯 PP(T30S)，采用 RH7 型双料筒毛细管流变仪和 $350\mu\text{m}$ 毛细管口模进行黏度测试，其数据拟合曲线如图 5 所示，通过数据拟合得式(1)、(2)中参数如表 1 所示。参数 T^* 由生产厂家提供，为 263.15K。将实验获得流变数据代入 Moldflow 软件中进行数值计算，通过多次数值模拟，选择较优的工艺参数组合作为参考，结果如表 2 所示。逐一改变单个工艺参数，

研究各工艺参数对细胞皿填充率的影响,各实验因素的水平取值见表 3。实验指标为填充率(%) ,即型腔的填充熔体体积与型腔体积之比。典型填充结果如图 6~图 10 所示。根据模拟结果,对单个影响因素各个因素水平下的填充率作图,结果如图 11 所示。微注塑机选用德国 BOY 公司生产的 BOY12A 型注塑机,最大注射速率为 240mm/s。表中注射速率为实际注射速率与最大注射速率之比。

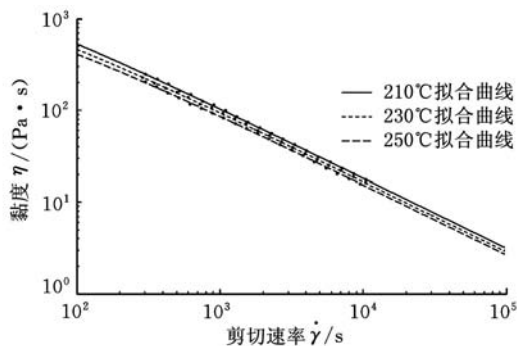


图 5 黏度曲线

表 1 材料 Cross-WLF 黏度模型参数

材料	τ^*	n	D_1	A_1	A_2
T30S(PP)	34 933.5	0.236 56	4.68×10^{20}	44.41	28.35

表 2 参考工艺参数

模具温度 (°C)	熔体温度 (°C)	注射速率 (%)	注射压力 (MPa)	注射量 (cm ³)	保压时间 (s)	保压压力 (MPa)
70	205	1.6	60	1.2	5	28

表 3 PP 材料因素水平表

因素水平	模具温度 (°C)	熔体温度 (°C)	注射速率 (%)	注射压力 (MPa)	注射量 (cm ³)
1	70	205	0.8	20	0.8
2	80	210	1.6	30	1.0
3	90	215	2.4	40	1.2
4	100	220	3.2	50	1.4
5	110	225	4.0	60	1.6
6	120	230	4.8	70	1.8

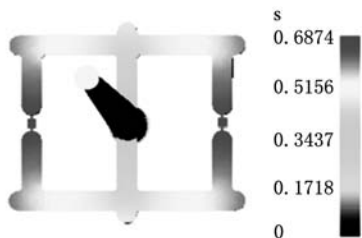


图 6 模具温度 120°C、 $t=0.6875s$ 时充模状态

从图 11 可以看出,随着注射速率、模具温度、熔体温度增大,填充率显著增大。采用极差分析比较发现,注射速率对微型塑件细胞培养皿注射成形填充率的影响起主要作用,其次是熔体温度和模具温度。这是因为 PP 材料熔体的黏度对剪切速率较敏感,增大注射速率,会使材料的黏度降

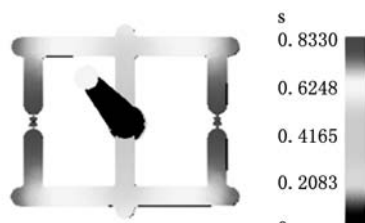


图 7 熔体温度 220°C、 $t=0.8331s$ 时充模状态

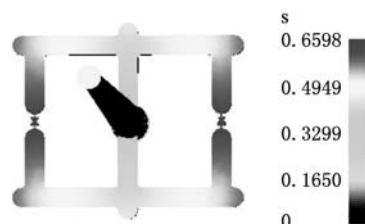


图 8 注射速度 8mm/s、 $t=0.6599s$ 时充模状态

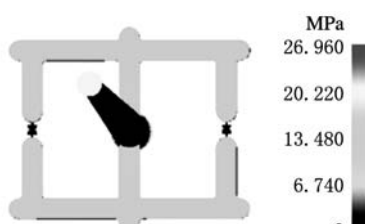


图 9 注射压力 70MPa、 $t=0.7150s$ 时充模状态

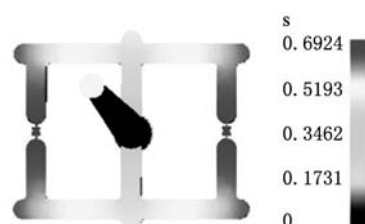


图 10 注射量 1.4cm³、 $t=0.6925s$ 时充模状态

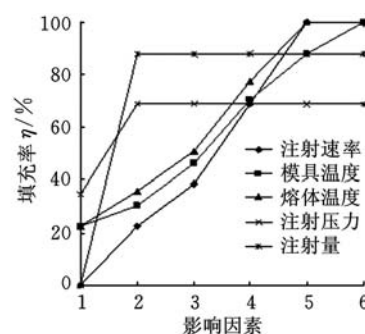


图 11 各工艺参数填充率影响曲线

低较多,从而提高熔体的流动性能,因此增大注射速率能有效地提高填充率。PP 材料熔体导热系数小,使得浇口中心和型腔中心处熔体热量散失较少,同时黏度受温度影响较大,升高温度易降低熔体黏度,此外,提高熔体温度会有效地减少热量损失,因此熔体温度升高对提高填充率影响较大。对于模具温度,由于 PP 材料的导热系数较小,熔体流入浇口和型腔时,在壁面处极易形成冷凝层,易产生壁面滑移,阻碍熔体与壁面间的热交换,因此提高模具温度对提高填充率作用明显。

此外,从模具温度对填充率的影响曲线可以看出,当模具温度为 120℃ 时,填充率为 100%。可见由于微尺度型腔表体比变化较大,使充模过程中熔体的热量极易散失,因此需要较高的模具温度。

4 变模温设计

本文所采用的变模温设计方案如图 12 所示。在镶块的两侧布置 4 根电加热棒②—②、③—③,单根加热棒的功率为 450W;在加热棒的外围对称布置 8 个油道⑤—⑤、⑥—⑥、⑦—⑦、⑧—⑧,油道的直径为 8mm;在油道与加热棒之间布置冷却水道①—①、④—④,水道直径为 6mm。其工作过程是注塑成形之前用热油使模具温度均匀并保持为脱模温度,用电热棒对模具加热,达到预定温度后,通过温度传感器⑨控制电源断开,开始注塑填充型腔,模具冷却时保持油温,切断电热棒电源,接通冷却水路对模具快速降温。塑件脱模时,断开冷却水路。连续成形时,只需按设定时间切换加热和冷却开关,即可实现模具的快速加热和冷却。

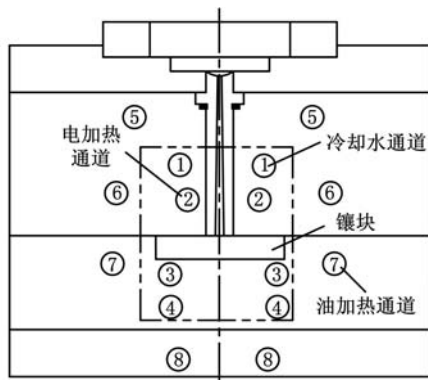


图 12 变模温设计方案示意图

按图 12 所示设计,在图 2 所示的镶块传感器孔位置安装温度传感器进行变模温实验。合模后用油将模具加热到 80℃ 并使模具温度保持均匀,通过加热棒加热模具至 120℃ 时,断开电源进行注塑,注塑完毕后,进行保压,停留 5s,通冷却水使模具快速降温,管中进口冷却水温度由冷水机设置为 21℃,流速为 2.2m/s。从图 13 中可以看出,变温过程大约需要 360s。

聚丙烯 PP(T30S)成形塑件如图 14 所示,不过模具温度较高,会在边上产生飞边。

5 结论

(1)通过 PP 材料数值模拟分析可知,对细胞皿塑件充模流动影响的关键因素是注射速率、熔

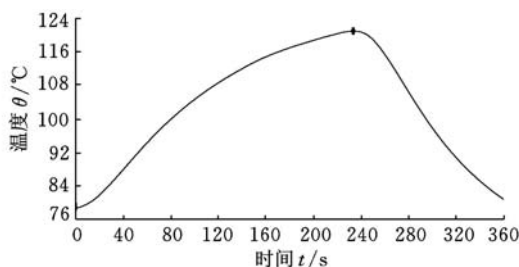


图 13 80~120℃ 变模温曲线

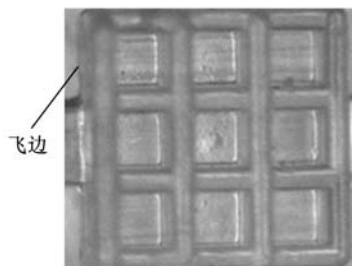


图 14 成形细胞皿

体温度、模具温度。

(2)在充模流动过程中,当型腔充满时,需要模具温度较高,达到 120℃。

(3)设计的油水电相结合的变模温方法对实现微注塑成形过程是可行的。

参考文献:

- [1] Despa M S. Molding Large Area Plastic Parts Covered with HARMS[D]. Louisiana: Louisiana State University, 2001.
- [2] Gornik C. Injection Moulding of Parts with Microstructured Surfaces for Medical Applications [J]. Macromolecular Symposia, 2004,217:365-374.
- [3] Yao D G, Kim B. Scaling Issues in Miniaturization of Injection Molded Parts[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126(4):733-738.
- [4] Lion A C, Chen R H. Injection Molding of Polymer Micro- and Sub- micron Structures with High-aspectratios [J]. Int. J. Adv. Manuf. Tech., 2006,28(11):1097-1103.
- [5] Kalima V, Pietarinew J, Siitonen S, et al. Transparent Thermoplastics: Replication of Diffractive Optical Elements Using Micro- injection Molding [J]. Optical Materials, 2007,30:285-291.
- [6] Yao D G, Kim B. Simulation of the Filling Process in Micro Channels for Polymeric Materials[J]. Micro-mech. Microeng., 2002,12(5):604-610.
- [7] Koo J, Kleinstreuer C. Liquid Flow in Microchannels: Experimental Observations and Computational Analyses of Microfluidics Effects [J]. J. Micro-mech. Microeng., 2003,13(5):568-579.
- [8] Yao D G, Kim B. Scaling Issues in Miniaturization of

- Injection Molded Parts[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126(4):733-738.
- [9] 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 [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2005, 15(8):1389-1396.
- [10] 徐斌,于同敏,王敏杰,等. 微尺度聚合物熔体粘性耗散效应对流变行为影响[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14):47-52.
- [11] 蒋炳炎,沈龙江,彭华建. 微注射成形中变模温控制技术[J]. 中国塑料, 2006, 20(3):99-102.
- [12] Yao D G. Development of Rapid Heating and Cooling Systems for Injection Molding Applications[J]. Polymer Engineering and Science, 2002, 42(12): 2471-2481.
- [13] Yao D G, Kim B. Developing Heating and Cooling Systems Using Pyrolytic Graphite [J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23: 341-352.
- [14] Yao D G, Kimerling T E, Kim B. High-frequency Proximity Heating for injection Molding Applications [J]. Polymer Engineering and Science, 2006, 46(7): 938-945.
- [15] Michaeli W, Klaiber F. Development of a System for Laser-assisted Molding of Micro and Nanostructures[J]. Journal of Vacuum Science and Technology B, 2009, 27(3):1323-1326.
- [16] Chen S C, Peng H S, Chang J A, et al. Simulation and Verifications of Induction Heating on a Mold Plate[J]. Int. Comm. Heat Mass Transfer, 2004, 31(7): 971-980.
- [17] Chang P C, Hwang S J. Experimental Investigation of Infrared Rapid Surface Heating for Injection Molding[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 102: 3704-3713.
- [18] Huang M S, Tai N S. Experimental Rapid Surface Heating by Induction for Micro-injection Molding of Light-guided Plates[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 113: 1345-1354.
- [19] 杨灿. 注塑微结构复制性能及形态研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [20] 徐斌. 微注塑充模流动尺度效应及其模具关键技术研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- (编辑 王艳丽)
- (上接第 1111 页)
- [9] 镇璐, 蒋祖华, 苏海. 知识网格辅助产品创新平台及其关键技术[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(6): 876-880.
- [10] 黄兆飞, 李彦, 熊艳. 面向创新设计的专利知识库系统研究[J]. 机械设计与制造, 2009(9): 240-142.
- [11] 于芳芳, 黄翔, 廖文和. 实例推理在冲模设计中的应用[J]. 机械制造与研究, 2005, 34(1): 11-17.
- [12] Altshuller G S. Suddenly the Inventor Appeared [M]. Worcester: Technical Innovation Center, Inc., 1994.
- [13] Altshuller G S. The Innovation Algorithm: TRIZ, Systematic Innovation and Technical Creativity[M]. Worcester: Technical Innovation Center, Inc., 2000.
- [14] Guillermo C R, Stephane N. Case-based Reasoning and TRIZ: a Coupling for Innovative Conception in Chemical Engineering[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2009, 48(1):239-249.
- [15] Rosenman M A. An Exploration into Evolution Models for Non-routine Design[J]. Artificial Intelligence in Engineering, 1997, 11(3):287-293.
- [16] 王生发, 顾新建, 郭剑锋. 面向实例推理的产品设计本体建模研究及应用[J]. 机械工程学报, 2007, 43(3): 112-117.
- [17] 邓志鸿, 唐世渭. Ontology 研究综述[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2002, 38(5):730-738.
- [18] 张东民, 廖文和, 胡建. 基于本体的设计知识建模[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2005, 33(5): 26-31.
- [19] 张祥唐. 整合 TRIZ 与可拓方法之绿色创新设计研究[D]. 台南: 台湾成功大学, 2004.
- [20] Chen J L, Liu C C. An Eco-Innovative Design Approach Incorporating the TRIZ Method without Contradiction Analysis[J]. Journal of Sustainable Product Design, 2001, 1(4):263-272.
- [21] 王仁庆. TRIZ 创新设计方法的改良研究[D]. 台南: 台湾成功大学, 2003.
- [22] Sun C C. A Performance Evaluation Model by Integrating Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS Methods [J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(12): 7745-7754. (编辑 王艳丽)

作者简介: 徐斌, 男, 1975 年生. 西南科技大学制造科学与工程学院讲师. 主要研究方向为微模具技术及高分子材料微注塑成形技术. 获中国专利 1 项. 发表论文 17 篇. 高春雨, 男, 1979 年生. 国家安全生产监督管理总局研究中心工程师. 王敏杰, 男, 1958 年生. 大连理工大学机械工程学院教授、博士研究生导师. 于同敏, 男, 1953 年生. 大连理工大学机械工程学院教授.

作者简介: 刘志峰, 男, 1963 年生. 合肥工业大学机械与汽车工程学院院长、教授、博士研究生导师. 主要研究方向为产品的绿色设计理论与方法、拆卸理论与方法、回收理论、回收工艺方法与回收装备制造. 出版专著 6 部, 发表论文 20 余篇. 高洋, 男, 1981 年生. 合肥工业大学机械与汽车工程学院博士研究生. 胡迪, 男, 1983 年生. 合肥工业大学机械与汽车工程学院博士研究生. 张敬东, 男, 1985 年生. 合肥工业大学机械与汽车工程学院硕士研究生.