

## 带有微结构特征的微注塑过程充填分析

崔志香<sup>1</sup>, 刘春太<sup>1</sup>, 司军辉<sup>2</sup>, 申长雨<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 橡塑模具国家工程研究中心, 河南 郑州, 450002; 2. 周口师范学院 数学与信息科学系, 河南 周口, 466000)

**摘要:** 由于宏观制件尺寸与微特征尺寸的巨大差别, 具有微特征的注塑充填过程是一个典型的几何多尺度结构流动和传热问题。采用数值和解析方法分析了带有微结构注塑成型过程的流动和传热行为, 基于有限元/有限差分法动态模拟了宏观充模过程, 并用解析法建立了微结构中的充填距离与微结构入口压力、尺寸、流动速度以及材料性质之间的定量关系, 详细分析了宏观模温、注射速率及微特征尺寸等因素对微特征填充距离的影响。

**关键词:** 微注塑成型; 微结构特征; 填充距离

**中图分类号:** TQ 320.66<sup>2</sup> **文献标识码:** A

### 0 引言

微注塑件由于具有非常好的生物相容性、易加工性和高可复制性而逐渐得到普遍使用, 除了重量以 mg 计, 几何尺寸以  $\mu\text{m}$  计的微塑件外, 宏观尺度的制件上局部带有微观特征的注塑制品更是成为世界各国研究和开发的重点<sup>[1]</sup>, 如芯片实验室 (lab-on-a-chip) 带有微流道系统生物和医学检测片等。对于具有低长径比 (low aspect ratios) 微特征的注塑或注压制件目前已广泛应用到各个领域如 CD、DVD 等, 具有挑战性的课题是如何将微注塑技术成功推广到成型具有高长径比 (high aspect ratios) 微特征制件中。

目前市场上具有各种各样的商业化注塑成型模拟软件, 尽管可以详细分析宏观模具型腔中的流动行为, 但由于大量的假设和简化以及结构尺度的巨大差别, 对微观结构行为的模拟往往会湮灭在宏观分析中, 无法真正预测微观结构特征中的详细流动行为。而采用完全的三维模拟时, 巨大的计算量使得集成模拟过程非常困难。因此, 带有高长径比微特征注塑成型过程的模拟仍是一个挑战性问题。Young<sup>[2-3]</sup> 采用一个解析的模型分析了带有矩形和圆柱形微流道平板的流动行为, 但是, 解析模型只能很好地描述微特征中的流动行为,

而无法准确表征宏观制件中的流动行为, 它会过高或过低估计微流道入口处的压力, 对于复杂形状的宏观型腔, 甚至得不到微特征入口处的压力变化曲线。

基于此, 笔者采用数值分析和解析方法相结合来分析微特征注塑成型过程的流动和传热行为, 即采用黏性广义 Hele-Shaw 流动理论, 耦合利用有限元/有限差分法得到微特征处的压力随时间的演化。在此基础上, 建立起微特征中非等温条件下压力与充填距离之间的解析关系, 并分析了宏观模温、注射速率、宏观型腔厚度及微特征尺寸等因素对微特征充填行为的影响。

### 1 数学模型

图 1 是带有微特征的注塑实验模具<sup>[4]</sup>, 由于微结构的体积尺寸远小于主型腔, 微结构的存在对宏观型腔流动行为的影响微乎其微, 宏观型腔中流动过程是一个典型的完全发展 Hele-Shaw 流动<sup>[5]</sup>。而微结构特征区域的流动行为数学模型如图 1 所示, 入口点  $O$  的压力  $P_0$  会随着主型腔的充填而随时间变化, 在压力  $P_0$  的驱动下熔体充入微特征, 如果不考虑流道表面张力影响, 其流动行为就是一个变压力驱动下的一维平板流。

对于微特征中的流动过程, 雷诺数  $Re$  只有

收稿日期: 2008-09-15; 修订日期: 2008-10-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10590352); 河南省杰出青年基金资助项目 (0612002000)

作者简介: 崔志香 (1981-), 女, 河南周口人, 郑州大学博士研究生, 主要研究方向为注塑模成型多尺度模拟。E-mail: cuizhixiang2006@126.com

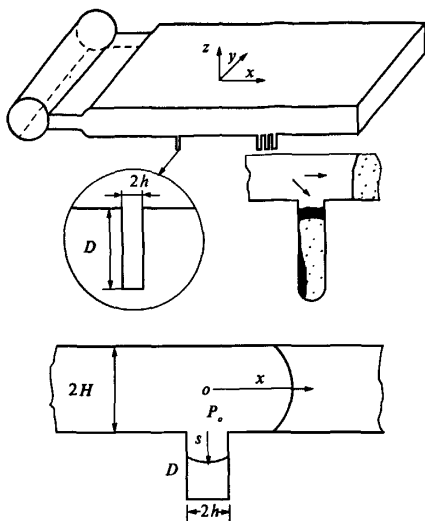


图1 带有微特征的注塑成型模及数学描述

Fig.1 Schematic and Mathematical description of the mold with microfeatures

$O(10^{-8})$ , 忽略惯性项, 不可压缩幂律黏性流体在微流道中的动量方程可以表示为

$$-\partial p / \partial s + \eta \partial v_s / \partial r = 0 \quad (1)$$

$$\eta = m \dot{\gamma}^{n-1}, m(T) = m_0 e^{-\alpha_0(T-T_0)} \quad (2)$$

式中:  $r, s$  分别为厚度和充填方向;  $n$  为幂率指数;  $m$  与熔体的温度有关;  $T_i$  为微结构中的平均温度;  $T_0$  为参考温度, 将方程(1)积分可以得到入口压力与微特征中熔体流速之间的解析关系

$$v_s = \frac{ds}{dt} = \frac{nh^{\frac{n+1}{n}}}{2n+1} \left( \frac{P_0(t)}{\beta} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

其中:  $\beta = \int_0^s m ds$ ;  $h$  为微特征半厚度. 在某一时刻  $t^i = t^{i-1} + \Delta t^{i-1}$ , 微特征填充距离的变化可表示为

$$s^i = s^{i-1} \Delta s^{i-1}, \Delta s^{i-1} = \left( \frac{ds}{dt} \right)^{i-1} \Delta t^{i-1},$$

$$\left( \frac{ds}{dt} \right)^{i-1} = \frac{nh^{\frac{n+1}{n}}}{2n+1} \left( \frac{P_0(t^{i-1})}{\beta^{i-1}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

方程(4)描述了时间步长  $\Delta t^{i-1}$  内, 在入口压力  $P_0(t^{i-1})$  作用下微特征填充距离, 将每一时刻的填充距离相累加就可以得到总的填充距离. 从方程(3)和(4)还可以看到, 在任一时刻, 充填速度以及充填距离不仅与微特征入口处压力有关, 还与熔体的温度相关参数  $\beta$  有关. 由于微特征的厚度很小, 熔体在微特征中具有快速的冷却速率. 在时刻  $t^i$ , 如果入口处为宏观充填温度  $T_m$ , 模温保持恒定的温度  $T_w$ , 考虑沿微特征厚度方向的热传导和沿着流动方向的热对流, 微特征中热传导方程和相应的边界条件可以表示为

$$\begin{cases} v_s \frac{\partial T}{\partial s} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \\ -k \frac{\partial T}{\partial r}(s, 0) + h_1 T(s, 0) = -T_w \\ -k \frac{\partial T}{\partial r}(s, a) - h_1 T(s, a) = -T_w \\ T(0, r) = T_m \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $h_1, k$  为传热系数和热传导率,  $\alpha = k / \rho C_p$  为熔体的热扩散系数, 上述方程的求解过程可以通过齐次方程的解和非齐次方程的解得到, 即  $T(s, r) = T_1(r) + T_2(s, r)$ .  $T_1(r), T_2(s, r)$  分别满足

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T_1(s, r)}{\partial^2 r} = 0 \\ -k \frac{\partial T_1}{\partial r}(s, 0) + h_1 T_1(s, 0) = -T_w \\ -k \frac{\partial T_1}{\partial r}(s, a) + h_1 T_1(s, a) = -T_w \\ T_1(0, r) = T_m \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} v_s \frac{\partial T_2(s, r)}{\partial s} = \alpha \frac{\partial^2 T_2(s, r)}{\partial^2 r} \\ -k \frac{\partial T_2}{\partial r}(s, 0) + h_1 T_2(s, 0) = 0 \\ -k \frac{\partial T_2}{\partial r}(s, a) + h_1 T_2(s, a) = 0 \\ T_2(0, r) = T_m - T_1(0, r) \end{cases} \quad (7)$$

求解方程(6)得  $T_1(s, r) = T_w$ , 通过分离变量来求解方程(7), 令  $T_2(s, r) = G(s) \varphi(r)$ , 代入方程(7)可得

$$\frac{dG(s)}{\beta G(s) ds} = \frac{1}{\varphi(r)} \frac{d^2 \varphi(r)}{d^2 r} = -\lambda \quad (8)$$

其中  $\beta = \alpha / v_s$ , 分别求解关于  $s$  和  $r$  的方程可得

$$G(s) = e^{-\lambda \beta s}, \varphi(r) = c_1 \cos \sqrt{\lambda} r + c_2 \sin \sqrt{\lambda} r \quad (9)$$

由边界条件得

$$\varphi(r) = \frac{\sqrt{\lambda} k}{h_1} \cos \sqrt{\lambda} r + \sin \sqrt{\lambda} r. \text{ 其中 } \lambda > 0 \text{ 且 } \tan \lambda a = 2e\lambda / (\lambda^2 - e^2), \text{ 其中 } e = h_1 / k.$$

$$\text{由此得到: } T_2(s, r) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \varphi_n(r) e^{-\frac{\lambda_n \beta s}{v_s}},$$

$$\varphi_n(r) = \frac{\lambda_n k}{h_1} \cos \lambda_n r + \sin \lambda_n r \quad (10)$$

其中,  $a_n = ((T_m - T_w) \int_0^a \varphi_n(r) dr) / \int_0^a \varphi_n^2(r) dr$  则温度场的解为

$$T(s, r) = T_1(r) + T_2(s, r) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \varphi_n(r) e^{-\frac{\lambda_n \beta s}{v_s}} + T_w \quad (11)$$

沿厚度方向的平均温度  $T_s$  为

$$\frac{T_s - T_w}{T_m - T_w} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \left( \int_0^a \varphi_n(r) dr \right)^2}{a \int_0^a \varphi_n^2(r) dr} e^{-\frac{\lambda_{2m}^2}{\alpha} t} \quad (12)$$

需要指出的是,在方程(12)中,微特征中熔体的平均温度  $T_s$  不仅是填充距离  $s$  的函数,而且是充填速度  $v_s$  的函数。而充填速度  $v_s$  依赖于熔体平均温度  $T_s$ ,也就是说  $T_s$  和  $v_s$  是相互耦合的。因此,在每个熔体流速计算时间步长内,需要先假设一速度初值用来计算出熔体在微流道中的平均温度,然后积分计算得变量  $\beta$ ,从而得到更新的速度,一直迭代到速度收敛为止。

综合上述方程,可以看到,只要知道了微结构入口处压力  $P_0$  随时间的变化,就可以得到微结构中详细的流动和传热行为,而入口点的压力是由宏观结构充填过程所决定的。对于宏观结构型腔的充填过程,其流动过程是一个典型的完全发展 Hele-Shaw 流动。动量方程和连续性方程可以化简为一个关于压力的 Laplace 方程<sup>[5]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( S \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( S \frac{\partial P}{\partial y} \right) \quad (13)$$

式中:  $P$  为压力;  $S = \int_0^H \frac{z'^2}{\eta} dz'$  为流度;  $H$  是宏观型腔半厚度。相应的能量控制方程可以表示成关于温度的控制方程

$$\rho C_p \left[ \frac{\partial T}{\partial t} + u \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) + v \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] = K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (14)$$

式中:  $u$ 、 $v$  分别是宏观型腔中  $x$ 、 $y$  方向的速度分量;  $T$ 、 $\rho$ 、 $C_p$ 、 $\eta$  为宏观型腔中的温度、密度、比热和剪切粘度;  $\dot{\gamma}$  为剪切速率。为了处理任意三维空间中薄壁型腔流动状况,利用控制体积法建立型腔面内压力场求解的有限元方程,对时间和沿厚度方向差分建立温度场求解的差分方程,并根据节点体积的充填状况更新流动前沿<sup>[5]</sup>,通过流动模拟可以得到任意时刻模具型腔中任意位置的压力变化。

## 2 结果讨论

采用上述模型,考虑一个带微结构特征的注塑成型过程<sup>[4]</sup>,重点讨论宏观结构模具工艺条件、微结构的位置等对微结构充填行为的影响。模具长度为 200 mm,宽度为 50 mm,厚度  $2H = 4$  mm,微结构特征距离浇口 60 mm,微结构深度为  $D = 1\ 000\ \mu\text{m}$ ,厚度为  $2h = 100\ \mu\text{m}$ ;传热系数为  $10\ 000\ \text{W/m}^2\text{℃}$ ,热传导率为 0.155;树脂材料

采用 GE 公司的 ABS(CYCOLAC-EPB),相应的材料参数见表 1。

表 1 黏度模型中的材料常数  
Tab. 1 Constants for the viscosity model

$m_0/$ ( $\text{Ns} \cdot \text{m}^{-2}$ )	$a_0$	$T_\infty/\text{k}$	$T_0/\text{k}$	$n$	$\alpha/$ ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )
$3.75 \times 10^5$	0.065 3	493	381	0.272 8	$8.129 3 \times 10^{-8}$

图 2 是宏观结构模具在不同充填速率下,距离浇口 60 mm 处微结构入口压力随时间的变化,可以发现,对于不同的注射速率,当熔体到达微特征后,微特征入口处的压力随着充填时间几乎成线性关系增加,但变化的梯度会随着注射速率的不同而不同。一旦得到微特征入口处的压力,就可以解析得到微流道充填距离与传热系数及微特征尺寸之间的关系。图 3 为模温  $80\text{℃}$ ,注射速率  $90\text{ cm}^3/\text{s}$ ,注射时间为  $5.8 \times 10^{-4}\text{ s}$ (总的填充距离为  $540\ \mu\text{m}$ ) 条件下温度沿微结构不同截面的分布。可以看到,沿厚度方向,在模壁处温度最低,中心层的温度变化不大,这主要是由于热传导所引起的;而沿充填方向,越靠近入口点,温度越高,这主要是由热对流所控制。无论如何,沿横截面的温度分布是热传导和热对流共同作用的结果。

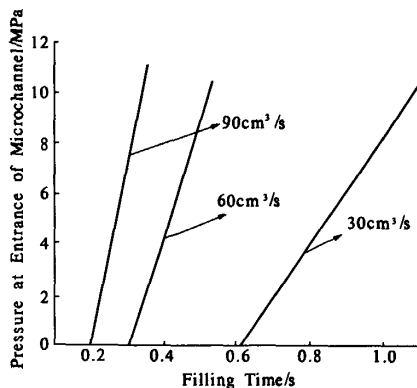


图 2 不同注射速率下微结构入口压力随时间的变化  
Fig. 2 Profiles of pressure at entrance of microchannel under different injection rates

图 4 为不同模具温度和不同注射速率对微结构内熔体流动速度的影响。可以看到,在熔体到达微结构开始阶段,由于微结构入口处压力梯度的剧烈变化,其速度会发生振荡变化,随着填充距离的增加,以及熔体的冷却过程的持续,微结构中熔体的流速逐渐呈非线性下降关系。当熔体温度降至接近转变温度或者不流动温度时,熔体流速迅速降低至零,微结构将不再被充填。一个有趣的现象是,对于不同的注射速率,微结构中熔体流速几

乎在同一时间降低至零,即微结构中熔体的流动速度在相同的模具温度条件下几乎同时停止,因此,微结构中填充距离几乎与注射速率成正比,并且会随着模具温度的变化而变化。在不同模具温度相同的注射速率条件下,熔体流速的降低趋势是相同的,但模温越高,流速降低的越缓慢,所以熔体填充时间越长。

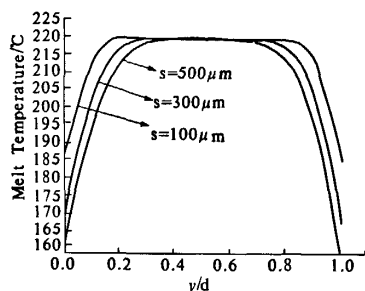


图3 微结构不同横截面上的熔体温度分布

Fig. 3 Temperature profile at different cross sections of microchannel

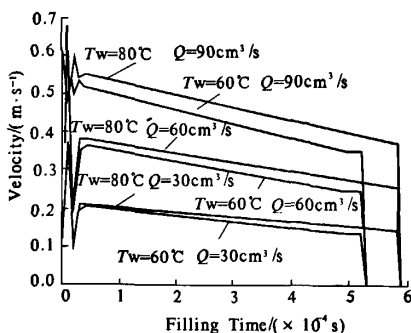


图4 不同模温和注射速率微结构中熔体速度随时间变化

Fig. 4 Profiles of filling velocity in the microchannel with different mold temperatures and injection rates

图5为相同注射速率( $Q = 60 \text{ cm}^3/\text{s}$ )不同模具温度条件下,微特征中的填充距离随其结构尺寸的变化。可以发现,随着微特征厚度的增大,熔体的填充距离呈非线性增长,并且模具温度对填充距离的影响非常大,同样的厚度( $100 \mu\text{m}$ ), $40^\circ\text{C}$ 的模温,只能填充 $137.1 \mu\text{m}$ , $80^\circ\text{C}$ 的填充距离会增加到 $195.7 \mu\text{m}$ 。因此,增加模具温度是一个改善微特征填充距离的有效手段。但整体加热模具势必会需要过长的冷却时间而牺牲生产效率。目前,有大量的研究者致力于局部可控快速加热和快速冷却技术,如Yao和Kim<sup>[6]</sup>将微结构表面涂覆上导电层和隔热层,电流通过导电层将模具快速加热,而隔热层阻止热传递到模板上。Chen<sup>[7]</sup>

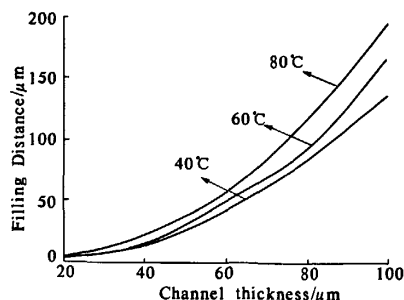


图5 不同模具温度条件下微结构尺寸与填充距离的关系

Fig. 5 Filling distance in the microchannels with different thicknesses and mold temperatures

等采用感应加热来提高模具温度,Saito和Satoh<sup>[8]</sup>直接采用红外加热的方法控制熔体的温度等。

用最大的可填充距离除以对应的微流道厚度,可以得到不同厚度、温度下微特征可填充最大纵横比如图6所示,从图中可以看到,当微特征厚度为 $80 \mu\text{m}$ 时, $40^\circ\text{C}$ 的模具温度可填充最大纵横比为1,也就是说,在目前的条件下(宏观注射速率 $Q = 60 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,微特征距浇口 $60 \text{ mm}$ )只能填充 $80 \mu\text{m}$ 。而当模具温度提高为 $80^\circ\text{C}$ 时,其可填充最大纵横比增大到1.46,即可填充 $116.8 \mu\text{m}$ 。当微特征厚度为 $100 \mu\text{m}$ 时, $40^\circ\text{C}$ 的模具温度可填充最大纵横比为1.4,而 $80^\circ\text{C}$ 可填充最大纵横比接近于2。图7为模温 $80^\circ\text{C}$ 、注射速率为 $60 \text{ cm}^3/\text{s}$ 时,微特征中填充距离与宏观模具型腔厚度之间的关系。可以发现,微特征中的填充距离随着宏观型腔厚度的增加而呈非线性减少,宏观型腔的厚度越厚,在微特征入口处建立起的压力越小,填充距离也就越短。因此,要提高微特征中的填充距离,可以减小宏观型腔的厚度以利于在微特征入口处建立起足够大的压力。

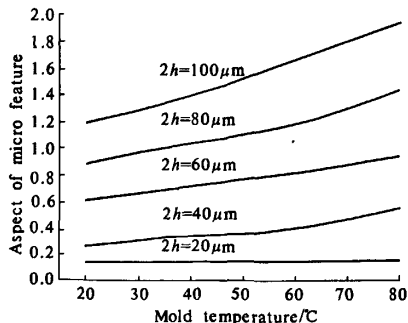


图6 不同模温下微流道填充的最大纵横比( $Q = 60 \text{ cm}^3/\text{s}$ )

Fig. 6 Maximum aspect ratio of microchannel that can be filled with different mold temperatures

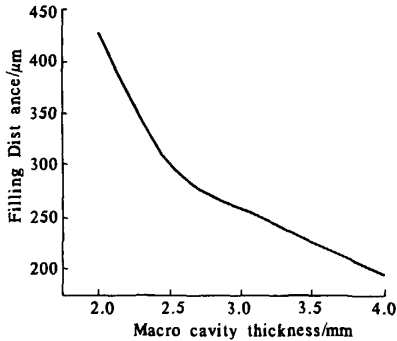


图7 宏观模具型腔尺寸对微特征充填距离的影响

Fig.7 Filling distance in the microchannel for different macro cavity dimension

### 3 结论

笔者采用数值和解析相耦合的方法分析了带有微特征的微注塑成型过程的充填行为,详细讨论了宏观模温、注射速率、宏观型腔尺寸及微特征尺寸等因素对微特征充填距离的影响.研究发现,模具温度和微特征尺寸是微特征充填距离的控制性因素,同时注射速率、宏观模具型腔厚度等都直接影响着微特征的充填状况.

### 参考文献:

- [1] MADOU M J. Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization[M]. Second Edition, Boca Raton: CRC Press, 2002.
- [2] YOUNG W B. Simulation of the filling process in molding components with micro channels[J]. Microsystem Technologies, 2005, (11): 410-415.
- [3] YOUNG W B. Analysis of filling distance in cylindrical microfeatures for microinjection molding[J]. Applied Mathematical Modeling, 2007, 31: 1798-1806.
- [4] HU X, LIU C T, XU G, et al. Viscoelastic flow in micro-injection molding[C]. Society of Plastics Engineers Annual Technical Conference, Cincinnati, USA, May, 2007, 3: 1603-1607.
- [5] 刘春太, 申长雨, 陈静波. 注射模充模流动和传热过程的理论与算法[J]. 高分子材料科学与工程. 2002, 18(6): 101-105.
- [6] YAO D, KIM B. Injection molding high aspect ratio microfeatures[J]. Journal of Injection Molding Technology, 2002, 6(1): 11-17.
- [7] CHEN S C, JONG W R, CHANG Y J, et al. Rapid mold temperature variation for assisting micro injection of high aspect ratio micro-feature parts using induction heating technology[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2006, 16: 1783-1791.
- [8] SAITO T, SATOH I, KRUOSAKI Y. A new concept of active temperature control for an injection molding process using infrared radiation heating[J]. Polymer Engineering and Science, 2002, 42(12): 2418-2429.

## Filling Analysis of Microinjection Molding with Microstructure

CUI Zhi-xiang<sup>1</sup>, LIU Chun-tai<sup>1</sup>, SI Jun-hui<sup>2</sup>, SHEN Chang-yu<sup>1</sup>

(1. Zhengzhou University, NERC for Advanced Polymer Processing Technology, Zhengzhou 450002, China; 2. Department of Mathematics and Information Science in Zhoukou Normal University, Zhoukou 466000, China)

**Abstract:** Injection molding of regular-sized plastic parts with microstructure is a specific flow and heat transfer problem with multi-scale geometric structure because of tremendous difference in dimensions. In this study, a hybrid method combining numerical simulation and analytical solution was used to analyze the flow behavior of this multi-scale geometric structure. Finite element /finite difference method was used to simulate the filling processing in macro cavity, and an analytical model is formulated to correlate the injection distance in the microstructure with entrance pressure, micro geometric dimensions, flow rates and material properties. The effects of the mold temperature, injection rate, and microstructure dimension on the filling distance were investigated.

**Key words:** micro-injection molding; micro-structure; filling distance