

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.0422

模壁粗糙度对微注塑成型充模流动的影响研究

虞磊¹, 陈兴^{1,2*}, 王英^{1,2}

(1.宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2.浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 模壁粗糙度对微注塑成型的充模过程有着十分重要的作用, 本文从微尺度流中塑料熔体的可压缩性充模模型出发, 对模具内壁粗糙度进行了讨论和简化, 并通过连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程给出了考虑模具表面粗糙度的充模控制方程, 采用有限元/有限差分法来求解充模中的压力、温度等, 采用修正的 Cross-WLF 模型表征熔融塑料材料的非牛顿行为流变特性. 通过数值模拟, 分析了模壁粗糙度对充模流动的影响, 并设计一系列实验, 考察各种工艺参数情况下模壁粗糙度对充模流动的影响. 模拟和实验结果表明: 型腔厚度越小, 模壁粗糙度对充模流动的影响越显著; 熔体温度越低, 模壁粗糙度对充模流动的影响越显著; 注射速率对模具表面粗糙度效应影响较小.

关键词: 表面粗糙度; 微注塑; 仿真模拟; 流变数据

中图分类号: TQ320.66

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2023) 06-0042-08

随着科学技术的发展, 尤其是微机电系统^[1]领域的进步, 微注塑产品广泛应用于诸多领域, 并且增长速度极快^[2]. 微注塑(micro-injection)技术是制造微米级产品常用的方法^[3]. 在传统的注塑成型过程中, 模具表面粗糙度的作用并不明显, 可以忽略不计. 但在微注塑成型中, 模具表面粗糙度的不同, 对熔体填充过程的影响也不尽相同^[4].

已有研究表明, 在微注塑成型中, 型腔表面粗糙度在熔体填充过程中的影响不能忽略. 主要原因有: (1)影响传热性. 贾俊楠^[5]通过建立不同表面粗糙度的微流道模型, 借助数值仿真和实验表明表面粗糙度对传热性的影响. (2)对熔体流动湍流度产生一定影响. Griffiths 等^[6]研究了熔体流动与模具表面之间的相互作用, 并观察了模具表面粗糙度和熔体流动中湍流度之间的关系. (3)收缩约束. Theilade 等^[7]进行了微注塑成型过程中模具表面粗糙度对零件收缩影响的实验研究, 该研究基于具有不同表面粗糙度的模具, 由于粗糙的模具表面可以起到微观收缩约束的作用, 因此产生较

小的线性收缩.

蒋晶等^[8]在微尺度材料流变数据的基础上, 使用 Moldflow 对微模具进行优化分析仿真, 并进行了实验验证, 实验结果与模拟结果基本一致. 张拯恺等^[9]利用 Fluent 软件, 对 POM 熔体填充微模具型腔的对流换热系数进行了数值模拟研究. 胡静等^[10]利用 CAE 软件对微平板零件的填充率进行了模拟分析, 比较了 POM 和 PMMA 等不同聚合物材料的成型工艺, 研究了熔体温度、模具温度、注射速率等因素对微平板零件填充率产生的影响. Zhang 等^[11]首次提出了一个简单而有效的模型来描述圆盘类零件微注塑成型中的表面粗糙度效应.

综上所述, 目前已经进行了一些关于表面粗糙度对微通道、导管和管道中牛顿流体流动影响的研究, 但应用范围有限. 本文利用基于可压缩的 Hele-Shaw 理论模型开发的仿真模拟软件, 对具有粗糙表面模具型腔的充模过程进行仿真模拟, 并通过实验得到不同工艺参数下模壁粗糙度对充模流动的影响.

收稿日期: 2023-04-20.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 宁波市重大科技攻关暨“揭榜挂帅”项目(2022Z009, 2022Z063).

第一作者: 虞磊(1995-), 男, 浙江宁波人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 微注塑成型. E-mail: 360487912@qq.com

*通信作者: 陈兴(1963-), 男, 湖南茶陵人, 博士/副教授, 主要研究方向: 材料成型 CAD/CAE. E-mail: chenxing@nbu.edu.cn

1 理论模型

1.1 充模流动控制方程

如图1所示, 熔融的聚合物占据了一个三维区域 $\Omega(t)$. C_e 代表熔体进入模腔的入口轮廓, $C_m(t)$ 定义为移动的前沿面. 模具边界 C_o 包括型腔型芯模壁面, 以及定义与熔体接触的模具边缘的表面. 由于通常微注塑成型中微零件的厚度比宽度远小于1, 因此可假设零件的厚度 $2h$ 远小于定义零件 C_o 的长度尺度. χ 定义为固液界面的位置.

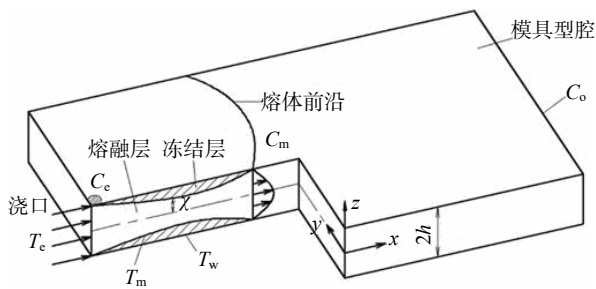


图1 模具相关示意

聚合物熔体在型腔内的流动通常遵循质量、动量和能量守恒定律. 对于非等温条件下的广义可压缩黏性 Hele-Shaw 流, 该方程组可以写成^[12-14]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad (3)$$

$$\rho C_{p,l} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k_l \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta \dot{\gamma}^2, \quad (4)$$

$$\rho_s C_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2}, \quad (5)$$

式中: ρ 为密度; u 、 v 和 w 分别为 x 、 y 和 z 上的速度分量; p 为充膜压力; η 为剪切黏度; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率; T 为温度; C_p 和 k 分别为材料的比热系数和导热系数; 下标 l 和 s 分别表示液相和固相.

在实际微注塑成型过程中, 由于受制件形状、模具结构形式以及模壁表面粗糙度的影响, 型芯和型腔与模壁热交换效果不可能完全相同, 而且型芯和型腔模壁的温度随位置变化而不同, 为此, 本文采用如下温度边界条件:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_T (T - T_w), \quad (6)$$

式中: $\mathbf{n}$ 为模壁处法向矢量; h_T 为熔体与模壁间的热交换系数; T_w 为模壁的温度. 为了简单起见, 假定流场在厚度方向上是对称的. 沿厚度方向对式(2)、(3)两个动量方程积分, 并在壁面上应用无滑移速度边界条件, 可得

$$u = \varphi A_x, \quad (7)$$

$$v = \varphi A_y. \quad (8)$$

将 $A_x = -\frac{\partial p}{\partial x}$, $A_y = -\frac{\partial p}{\partial y}$ 和 $\varphi = \int_z^h \frac{\bar{z}}{\eta} d\bar{z}$ 代入连续性方程可以得到充模控制方程^[12]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{S} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\bar{S} \frac{\partial p}{\partial y} \right) - G \frac{\partial p}{\partial t} = F, \quad (9)$$

$$\bar{S} = \int_0^h \rho \varphi dz, \quad (10)$$

$$G = \int_0^z \left(\frac{\partial \rho_l}{\partial p} \right)_T dz + \int_z^h \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial p} \right)_T dz, \quad (11)$$

$$F = \int_0^z \left(\frac{\partial \rho_l}{\partial p} \right)_p dz + \int_z^h \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial p} \right)_p dz +$$

$$(\rho_l - \rho_s)_z = \chi \frac{\partial \chi}{\partial t}. \quad (12)$$

1.2 表面粗糙度的数学建模

如图2所示, 给出型腔上下模壁的表面粗糙度, 通常采用下壁和上壁的粗糙度峰值之间的距离 H_m 来表示型腔的高度. 事实上, 由于表面粗糙度的随机性, 在不同的测量位置 H_m 大小是不同的. 型腔的表观高度 H_{app} 通常由不同测量位置 H_m 的平均值确定, 在注塑成型的常规分析中, 由于忽略模具表面粗糙度效应, H_{app} 则为型腔的高度. 然而, 当模具表面粗糙度数值与 H_{app} 相当时, 用于填充粗糙区域(即由粗糙度峰和谷组成的区域)的熔体体积不能被忽略. 在这种情况下, 如果仍使用 H_{app} 而忽略表面粗糙度内的空腔, 会导致实际型腔体积的计算明显不准确.

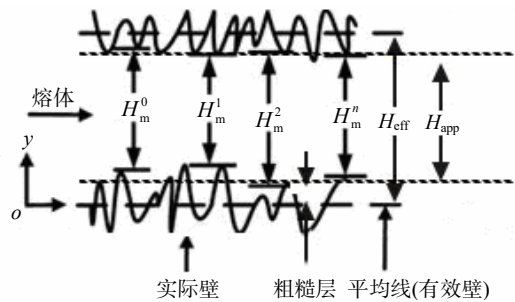


图2 模具型腔

考虑表面粗糙度对型腔实际体积的影响,在分析中应采用有效高度 H_{eff} , 而不是 H_{app} , 有效高度 H_{eff} 位于表面粗糙度轮廓的中线处(图 2). 这是为了确保两个平均线之间的体积与实际型腔的体积相当, 因为粗糙度轮廓和平均线之间的面积必须上下相等^[15].

y 横截面上所占的熔体面积分数 θ 可由空隙面积与总横截面积之比表示^[11]:

$$\theta(y) = \frac{\sum_{i=1}^Q a_i(y)}{A}, \quad (13)$$

式中: a_i 为空隙区域的面积; A 为总面积.

随着模具表面粗糙度的增加, 聚合物熔体和模具壁之间的接触面积也将增加. 基于线性规则, 图 2 所示粗糙层的导热系数为^[11]

$$k(y) = \theta(y)k_1 + [1 - \theta(y)]k_2, \quad (14)$$

式中: k_1 和 k_2 分别为熔体和模具的导热系数.

同理, 粗糙层的热容量可以表示为^[11]

$$\rho C_p(y) = \theta(y)\rho_1 C_{p1} + [1 - \theta(y)]\rho_2 C_{p2}, \quad (15)$$

式中: $\rho_1 C_{p1}$ 为熔体的热容量; $\rho_2 C_{p2}$ 为模具的热容量.

1.3 控制体积法和流前追踪

按照 Chiang 等^[12]和 Hieber 等^[16]的方法, 本文采用有限元技术求解充模平面压力场. 为求解温度场, 沿厚度方向坐标引入差分网格(图 3), 并采用向后差分格式处理时间项, 将控制体积方法用于确定随时间变化的熔体前沿位置.

模腔几何体被网格化为三角形单元. 通过将各自三角形三条边的中点连接到其质心, 每个三角形单元被进一步划分为三个子域, 每个节点处的控制体积是连接到该节点的所有子体积的集合(图 3 阴影部分).

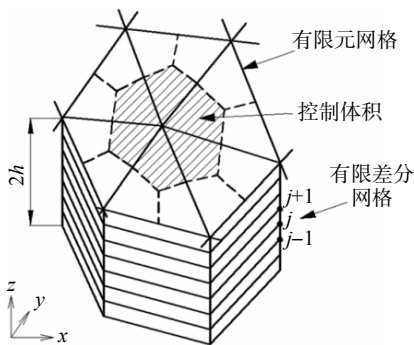


图 3 控制体积和有限差分网格

单元 l 网格质量 $m^{(l)}$ 流动的数值方程可表示为

$$m^{(l)} = \tilde{S}^{(l)} \sum_{i=1}^3 D_{ik}^{(l)} p_{N'} + \frac{A^{(l)} G^{(l)}}{3} \sum_{i=1}^3 E_{ik}^{(l)} \frac{p_{N'} - \tilde{p}_{N'}}{\Delta t} + \frac{A^{(l)} F^{(l)}}{3}, \quad (16)$$

式中: $\tilde{S}^{(l)}$ 为流导; $D_{ik}^{(l)}$ 为节点压力对于网格流动的系数; $E_{ik}^{(l)}$ 为系数矩阵; $A^{(l)}$ 为面积; i 、 k 分别为单元 l 中对应于总体节点 N 和 N' 的局部节点号, 即 $N = \text{NOD}(l, i)$ 、 $N' = \text{NOD}(l, k)$. 节点 N 处控制体积的质量守恒可以表示为^[12]

$$\sum \tilde{S}^{(l)} \sum_{i=1}^3 D_{ik}^{(l)} p_{N'} + \sum \frac{A^{(l)} G^{(l)}}{3} \sum_{i=1}^3 E_{ik}^{(l)} \frac{p_{N'} - \tilde{p}_{N'}}{\Delta t} + \sum \frac{A^{(l)} F^{(l)}}{3} = 0, \quad (17)$$

运用此方程可以求得节点压力.

在每个节点求解能量方程以获得温度分布, 使用有限差分方法, 可以在时间 t 和空间维度 z 上离散化该方程.

在每个单元处节点平均温度的能量方程可以表示为^[13]

$$[K]^N \{T_{k+1}\}^N = \{F\}^N, \quad (18)$$

式中: $[K]^N$ 、 $\{T_{k+1}\}^N$ 和 $\{F\}^N$ 分别为整体刚度矩阵、时间步 $k+1$ 的待定矩阵向量和力向量. 力向量包括对流项、黏性加热项和初始温度项. 该方程可以求解温度.

分配给每个节点控制体积的填充因子 f_{ij} 表示填充百分比, 可以表示为

$$f_{ij} = \frac{\Delta V_{ij}}{V_i}, \quad (19)$$

式中: V_{ij} 和 V_i 分别为第 j 个时间步中第 i 个节点处的占用体积和控制体积; f_{ij} 的取值范围在 0~1 之间. 依据填充因子, 所有节点被分为完全填充节点($f_{ij} = 1$)、前节点($0 < f_{ij} < 1$)或空节点($f_{ij} = 0$). 熔体进入型腔的节点定义为 $f_{ij} = 1$ 的浇口节点.

在每一个时间步中求解压力场以获得流域中的速度分布. 需要注意的是, 对于新填充体积中的 $T(z)$, 其初始值可以取为相邻上游元素的平均值.

1.4 聚合物熔体材料模型

采用广泛接受的修正 Cross-WLF 黏度模型对熔融聚合物的非牛顿行为进行表征, 该模型在较宽的温度范围内具有较好的精度^[12,17-18]. 黏度 η 可

以表示为

$$\eta(T, \dot{\gamma}, p) = \frac{\eta_0(T, p)}{1 + (\eta_0 \dot{\gamma} / \tau^*)^{1-n}}, \quad (20)$$

式中: η_0 为零剪切速率黏度; τ^* 为剪切应力.

如考虑微成型过程中材料的密度变化, 则 $\eta_0(T, p)$ 采用如下 WLF 型:

$$\eta_0(T, p) = D_1 \exp \left[-\frac{A_1(T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)} \right], \quad (21)$$

$$T^*(p) = D_2 + D_3 p, \quad (22)$$

$$A_2(p) = \tilde{A}_2 + D_3 p. \quad (23)$$

对于非晶态聚合物, 可以用 Two-domain Tait 状态方程来描述:

$$V(T, p) = V_i(T, p) + V_0(T) \left[1 - C \ln \left(1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right], \quad (24)$$

式中: C 为定值 0.089 4; $V_0(T)$ 和 $B(T)$ 的形式可以表示为

$$V_0(T) = \begin{cases} b_{1,l} + b_{2,l}(T - b_5), & T \geq T_i(p), \\ b_{1,s} + b_{2,s}(T - b_5), & T < T_i(p), \end{cases} \quad (25)$$

$$B(T) = \begin{cases} b_{3,l} \exp[b_{4,l}(T - b_5)], & T \geq T_i(p), \\ b_{3,s} \exp[b_{4,s}(T - b_5)], & T < T_i(p), \end{cases} \quad (26)$$

$$T_i(p) = b_5 + b_6 p, \quad (27)$$

$$V_i(T, p) = \begin{cases} 0, & T \geq T_i(p), \\ b_7 \exp(b_8 T - b_9 p), & T < T_i(p), \end{cases} \quad (28)$$

式中: $T_i(p)$ 为材料结晶温度; $b_{1,l}$ 、 $b_{2,l}$ 、 $b_{3,l}$ 、 $b_{4,l}$ 、 $b_{1,s}$ 、 $b_{2,s}$ 、 $b_{3,s}$ 、 $b_{4,s}$ 、 b_5 、 b_6 、 b_7 、 b_8 、 b_9 为材料常数. 使用的塑料为 POM, 牌号为 Kepital F20-03, 其比热为 $3759 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$, 热传导率为 $0.26 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$. Cross-WLF 常数、PVT 常数由 Autodesk Moldflow Plastics Labs 得到, 见表 1 和表 2.

表 1 Kepital F20-03 的 Cross-WLF 常数

符号	数值
n	0.347 5
τ^*/Pa	68 600
$D_1/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	9.96×10^{11}
D_2/K	223.15
$D_3/(\text{K} \cdot \text{Pa}^{-1})$	0
A_1	24.306
$\tilde{A}_2/\text{K}$	51.6

表 2 Kepital F20-03 的 PVT 常数

符号	数值
$b_{1,l}/(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	8.485×10^{-4}
$b_{2,l}/(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	5.548×10^{-7}
$b_{3,l}/\text{Pa}$	$1.436 9 \times 10^8$
$b_{4,l}/\text{K}^{-1}$	5.316×10^{-3}
$b_{1,s}/(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	7.551×10^{-4}
$b_{2,s}/(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	3.342×10^{-7}
$b_{3,s}/\text{Pa}$	$2.982 8 \times 10^8$
$b_{4,s}/\text{K}^{-1}$	3.049×10^{-3}
b_5/K	4.402×10^2
$b_6/(\text{K} \cdot \text{Pa}^{-1})$	4.950×10^{-8}
$b_7/(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	9.338×10^{-5}
b_8/K^{-1}	6.762×10^{-2}
b_9/Pa^{-1}	5.773×10^{-9}

2 实验

为了研究微注塑中模壁粗糙度对充模过程熔体流动的影响, 采用的矩形产品零件平面尺寸为 $30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 厚度为微米级可调. 实验中采用了 0.54、0.44 和 0.34 mm 三种厚度. 实验使用 30 g 双鹰注塑机(型号 SY300-III), 其最大注射压力为 162 MPa. 实验材料为 POM, 熔体温度范围为 $180 \sim 220 ^\circ\text{C}$. 为分析不同注射速率、型腔厚度和熔体温度情况下模壁粗糙度对充模流动的影响, 表 3 给出了详细的实验工艺参数.

表 3 实验工艺参数

工艺参数	参数值
熔体温度/ $^\circ\text{C}$	180, 190, 200, 210, 220
注射速率/%	50, 55, 60
型腔厚度/mm	0.34, 0.44, 0.54

实验步骤如下: (a)实验准备. 首先进行实验模具设计, 该模具型腔高度需可调, 模具型腔底面设计为镶嵌件结构型式, 通过增加(或减少)垫片调整产品厚度. 该镶嵌件顶面左边采用抛光加工光滑面, 右边采用电火花线切割加工粗糙面. 然后采用数字式三维视频显微镜(HIROX KH-8700)测量模具嵌件顶面粗糙面的表面粗糙度(R_a 为 $2.3 \mu\text{m}$). (b)注塑实验. 预先采用尝试法确定注射速率的范围, 然后在注射速率范围内进行短射实验, 得到对应不同实验条件的样品, 为保证结果的可靠性, 每次

实验重复三次。(c)结果处理. 由于壁面粗糙度等的影响, 短射充填面积形状不规则, 需在坐标纸上分别测量出模具光滑面与粗糙面一侧的充填面积并进行结果分析. 实验流程如图4所示.

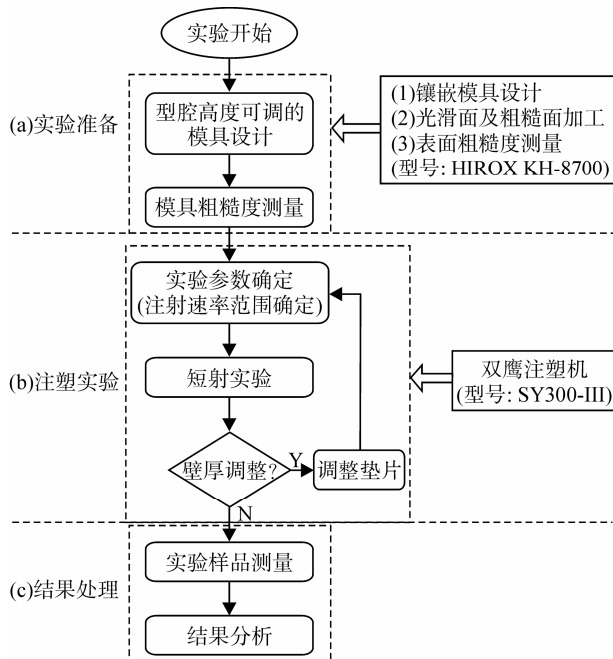


图4 实验流程

3 结果讨论

遵循 Zhang 等^[19]的分析方法, 粗糙度效应采用如下公式表示:

$$\lambda = \frac{A_r}{A_t}, \quad (29)$$

式中: A_r 为粗糙表面的流动面积; A_t 为成型部分的总流动面积; λ 为粗糙度效应, 取值在 0 到 0.5 之间. 当 $\lambda=0.5$ 时, 粗糙度效应可以忽略不计, 说明光滑面和粗糙面有相同的流动面积. λ 与 0.5 的差值越大, 粗糙度效应越显著.

3.1 短射实验结果与分析

注射速率 50% 条件下实验样品和流前模拟结果的对比如图5所示, 图中左边为实验得到的样品, 右边为样品和模拟结果对比. 自上而下可以观察到塑料在模具中的充填过程, 样品的左右两半并不对称, 光滑壁面的左半部分明显大于粗糙壁面的右半部分. 这种非均匀流动前沿的形成主要归因于粗糙表面阻碍了熔体的流动, 实验和模拟都可以观察到这一现象.

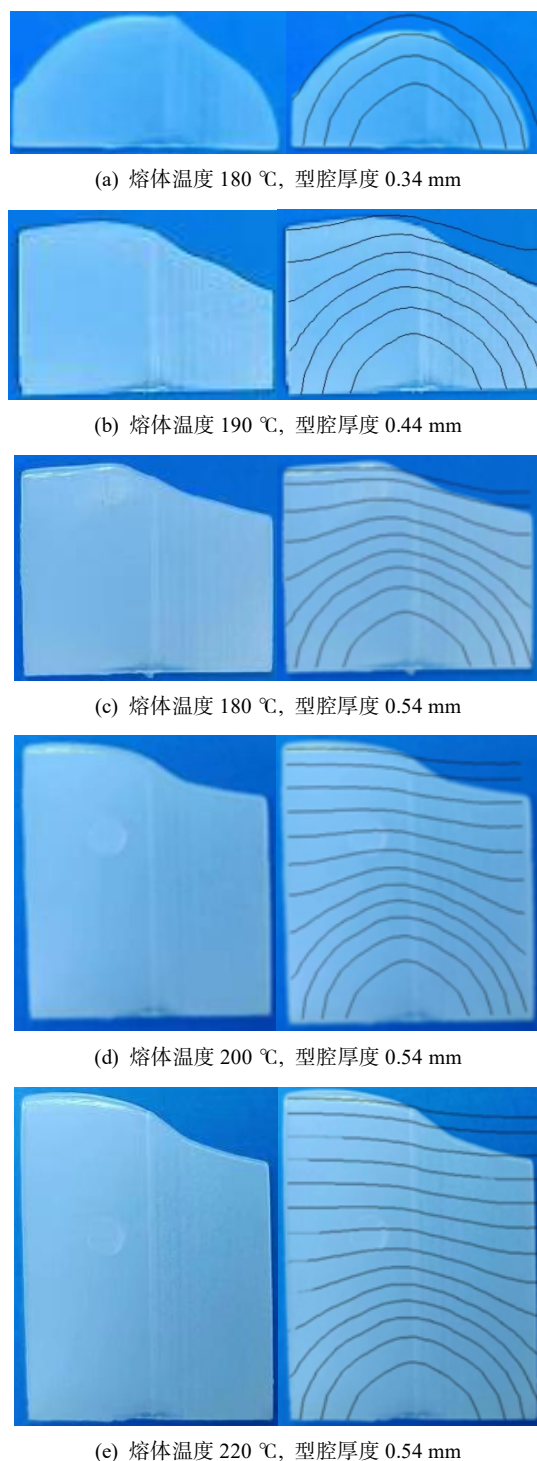
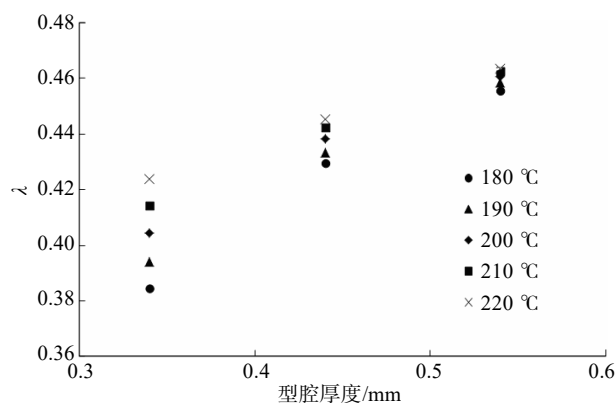


图5 仿真模拟与实验结果对比

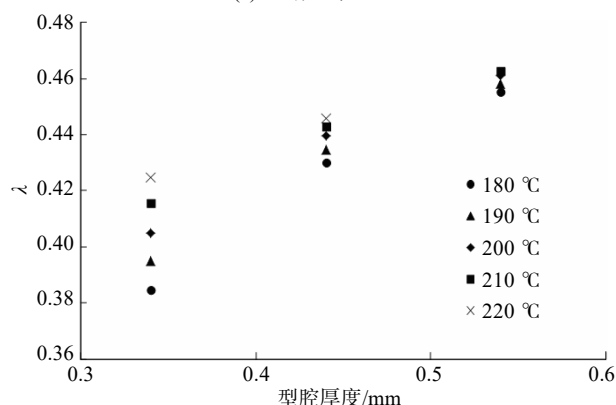
3.2 粗糙度效应与型腔厚度的关系

如图6所示, 在注射速率和熔体温度都相同的情况下, 模具的粗糙度效应 λ 随着型腔厚度增大均呈上升趋势. 型腔厚度越小, λ 与 0.5 的差值越大, 粗糙度效应越显著. 这是因为型腔厚度越小, 模壁

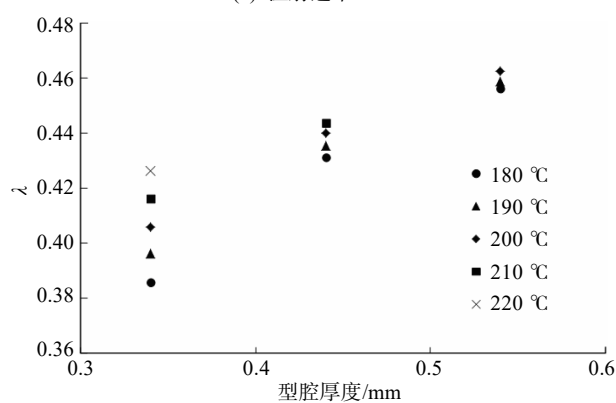
粗糙度对热传导的影响越大, 熔体与模壁之间的热交换速度越快, 熔体冻结越快, 导致模壁粗糙度对充模流动的影响越显著.



(a) 注射速率 50%



(b) 注射速率 55%



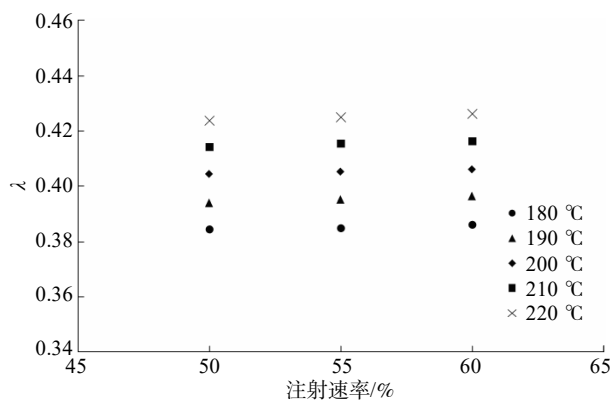
(c) 注射速率 60%

图6 粗糙度效应与型腔厚度的关系

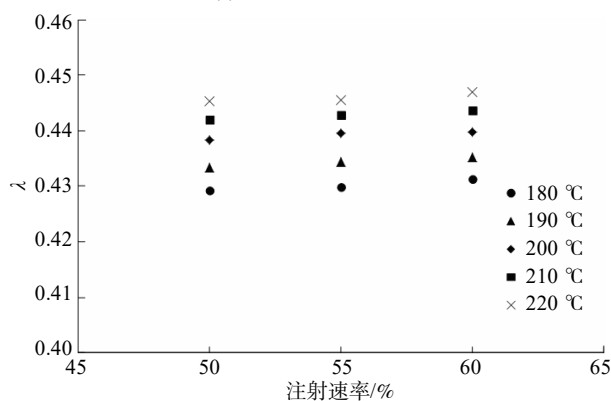
3.3 粗糙度效应与注射速率的关系

如图7所示, 在型腔厚度和熔体温度都相同的情况下, 随着注射速率的不断升高, λ 的变化较小, 粗糙度效应的趋势变化较小, 可以认为注射速率对粗糙度效应的影响较小. 这是因为材料本身的特性, 由于材料黏度对压力不敏感, 因粗糙度引起

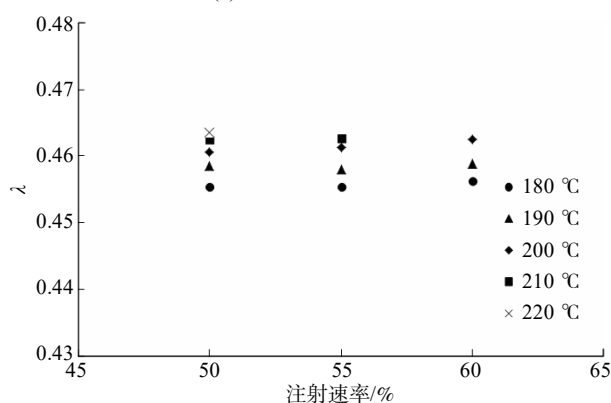
的压力上升并没有对黏度造成太大的影响, 结果反映为粗糙度效应减弱.



(a) 型腔厚度 0.34 mm



(b) 型腔厚度 0.44 mm



(c) 型腔厚度 0.54 mm

图7 粗糙度效应与注射速率的关系

3.4 粗糙度效应与熔体温度的关系

如图8所示, 在注射速率和型腔厚度都相同的情况下, 模具的粗糙度效应 λ 随着熔体温度的升高呈上升趋势, 熔体温度越低, λ 与 0.5 的差值越大, 粗糙度效应越显著. 这是因为模壁粗糙度会增强热传导, 熔体温度越低, 熔体冻结越快, 导致模壁粗糙度对充模流动的影响越显著.

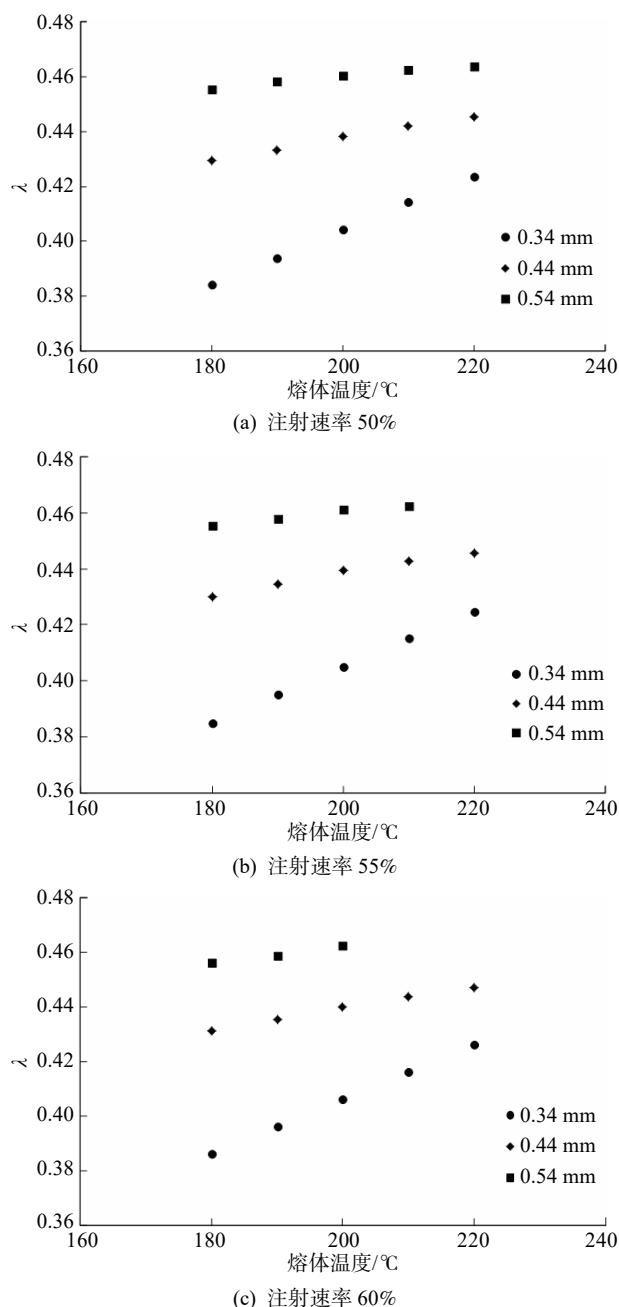


图8 粗糙度效应与温度的关系

综上所述,粗糙度效应 λ 随型腔厚度而变化的趋势最大,熔体温度次之,注射速率最小,因此,三种工艺参数的影响大小排列为:型腔厚度>熔体温度>注射速率。

4 结语

本文利用基于可压缩的 Hele-Shaw 理论模型建立的充模控制方程,研究了微注塑成型中的模壁粗糙度对充模流动的影响,并进行了相应的实

验验证,得出如下结论:

(1)型腔厚度越小,模具表面的粗糙度效应对成型流动的影响越显著,型腔厚度与模具表面的粗糙度对成型流动的影响呈负相关。

(2)随着注射速率的增大,熔体在粗糙表面上的流动面积与熔体流动的总面积之比变化较小,因此,注射速率对粗糙度效应的影响较小。

(3)熔体温度越低,模具表面的粗糙度对成型流动的影响越显著,熔体温度与模具表面的粗糙度对成型流动的影响呈负相关。

(4)三种工艺参数对表面的粗糙度效应的影响大小排列为:型腔厚度>熔体温度>注射速率。

参考文献:

- [1] 朱晓泉,周瑜,刘云飞,等.微系统技术发展现状及趋势[J].电声技术,2021,45(7):21-29.
- [2] Maghsoudi K, Jafari R, Momen G, et al. Micro-nanostructured polymer surfaces using injection molding: A review[J]. Materials Today Communications, 2017, 13(9):126-143.
- [3] Trotta G, Cacace S, Semeraro Q. Optimizing process parameters in micro injection moulding considering the part weight and probability of flash formation[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 79:250-258.
- [4] 于同敏,庄俭,王敏杰,等.微注塑成型中熔体充模流动的影响因素研究[J].塑性工程学报,2007,14(6):185-189.
- [5] 贾俊楠.微流道内流体流动特性和传热性能研究[D].济南:山东大学,2019.
- [6] Griffiths C A, Dimov S S, Brousseau E B, et al. The effects of tool surface quality in micro-injection moulding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 189(1/2/3):418-427.
- [7] Theilade U R, Kjaer E M, Hansen H N. The effect of mold surface topography on plastic part in-process shrinkage in injection molding[C]//61st SPE Annual Technical Conference (ANTEC 2003), 2003, 1:463-467.
- [8] 蒋晶,姜潇桐,张康康,等.基于CAE的微注塑模具优化设计[J].中国塑料,2018,32(8):137-142.
- [9] 张拯恺,于同敏,段春争,等.聚合物熔体充模流动中的对换热行为研究[J].应用物理,2018,8(5):204-215.
- [10] 胡静,楼白杨.微型平板件注塑成型数值模拟仿真研究[J].塑料科技,2011,39(3):71-74.
- [11] Zhang H L, Ong N S, Lam Y C, et al. Effects of surface roughness on microinjection molding[J]. Polymer

- Engineering and Science, 2007, 47(12):2012-2019.
- [12] Chiang H H, Hieber C A, Wang K K. A unified simulation of the filling and postfilling stages in injection molding. Part I: Formulation[J]. Polymer Engineering and Science, 1991, 31(2):116-124.
- [13] Kennedy P. Flow Analysis of Injection Molds[M]. New York: Hanser Publishers, 1995.
- [14] Chen B S, Liu W H. Numerical simulation of the post-filling stage in injection molding with a two-phase model [J]. Polymer Engineering and Science, 1994, 34(10):835-846.
- [15] Whitehouse D J. Surfaces and their measurement[M]. London: Kogan Page Science, 2004.
- [16] Hieber C A, Shen S F. A finite-element/finite-difference simulation of the injection-molding filling process[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1980, 7(1): 1-32.
- [17] Cross M M. Rheology of non-Newtonian fluids: A new flow equation for pseudoplastic systems[J]. Journal of Colloid Science, 1965, 20(5):417-437.
- [18] Williams M L, Landel R F, Ferry J D. The temperature dependence of relaxation mechanism in amorphous polymers and other glass forming liquid[J]. Journal of the American Chemical Society, 1955, 77(14):3701-3707.
- [19] Zhang H L, Ong N S, Lam Y C. Experimental investigation of key parameters on the effects of cavity surface roughness in microinjection molding[J]. Polymer Engineering & Science, 2008, 48(3):490-495.

Influence of mold wall roughness on mold filling flow in micro-injection molding

YU Lei¹, CHEN Xing^{1,2}, WANG Ying^{1,2}

(1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Zhejiang Provincial Key Laboratory of Part Rolling Technology, Ningbo 315211, China)

Abstract: The roughness of mold wall plays a very important role in the filling process of micro-injection molding. Based on the filling model of plastic melt in micro-scale flow, the dimension of mold inner wall roughness is discussed and simplified. The governing equation considering mold surface roughness is given through continuity equation, momentum conservation equation and energy conservation equation. The pressure and temperature in the filling process are solved by finite element/finite difference method, and the rheological characteristics of non-Newtonian behavior of plastic melting are characterized by modified Cross-WLF model. Through numerical simulation, the influence of mold wall roughness on mold filling flow is analyzed, and a series of experiments are designed to investigate the influence of mold wall roughness on mold filling flow under various process parameters. Both simulated and experimental results show that: the smaller the cavity thickness, the more significant the influence of mold wall roughness on mold filling flow; the lower the melt temperature, the more significant the influence of mold wall roughness on mold filling flow. In addition, the experimental results also show that the injection rate has little effect on the effect of the mold surface roughness in the mold filling.

Key words: surface roughness; micro injection; simulation; rheological data

(责任编辑 韩 超)