

DOI: 10.3901/JME.2022.06.052

# 聚合物熔体微尺度流动过程黏度与黏性耗散的耦合作用\*

张嘉昆 王敏杰 李红霞 于同敏

(大连理工大学机械工程学院 大连 116024)

**摘要:** 为了探究在聚合物微成型时熔体黏度与黏性耗散的耦合作用对熔体的流变特性产生的影响,采用数值计算和试验相结合的方法研究了黏度与黏性耗散之间的耦合作用。通过建立微尺度黏度和黏性耗散基于共同变量温度的耦合模型,计算并分析了不同当量直径的矩形微流道内熔体流变特性参数的变化规律,试验验证了熔体沿流动方向的温度变化。结果表明:在相同工艺参数条件下,当量直径越小,熔体黏度越小,黏性耗散作用越强,耦合作用对熔体黏度和黏性耗散的影响越强。熔体沿流动方向温度升高,不考虑耦合作用时熔体温升比考虑耦合作用时高,且偏差随当量直径的减小而增大,不同的入口速度和入口温度条件下平均温升的最大偏差分别为 7.26% 和 7.05%。数值计算与试验结果趋势一致,对于不同的入口速度,考虑耦合作用的熔体沿流动方向的计算平均温升与试验测量值最小偏差为 0.49 K;对于不同的入口温度,考虑耦合作用的熔体沿流动方向的计算平均温升与试验测量值最小偏差为 0.59 K。因此,在对聚合物微成型过程中的熔体流动分析时,考虑黏度与黏性耗散之间的耦合作用,才能够更准确地反映熔体流变特性的实际变化规律。

**关键词:** 聚合物;微尺度;黏度;黏性耗散;熔体温度

**中图分类号:** TG156

## Coupling Effect between Viscosity and Viscous Dissipation in the Microscale Flow of Polymer Melt

ZHANG Jiakun WANG Minjie LI Hongxia YU Tongmin

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

**Abstract:** There exists a coupling relationship between viscosity and viscous dissipation during polymer micro molding. In order to explore the coupling effect on the rheological properties of the melt, it is studied by combining numerical simulation and experimental. A coupling model which is based on a common variable temperature is presented, and the rheological characteristic parameters of polymer melt which flows in rectangular cross section micro channels are calculated and analyzed. Then the numerical result is evaluated by the melt experiment temperature along the flow direction. The results indicate that as the equivalent diameter decreases, viscosity decreases, viscous dissipation increases, and the coupling effect on viscosity and viscous dissipation becomes stronger. The temperature of the melt increases along the flow direction. The temperature rise value of the melt is higher when the coupling is not considered than when the coupling is considered, and the deviation increases with the decrease of the equivalent diameter. The maximum deviation where the average temperature rise value is 7.26% and 7.05% respectively for different inlet velocities and different inlet temperatures. The numerical simulation values by considering the coupling are consistent with the experimental results. As the different inlet velocities, the minimum deviation of the average temperature rise value between the numerical simulation results with considering the coupling and the experimental results is 0.49 K. As the different inlet temperatures, the minimum deviation of the average temperature rise value between the numerical simulation results with considering the coupling and the experimental results is 0.59 K. Therefore, it can be more accurately reflect the actual change regularities of melt rheological properties with considering the

\* 国家自然科学基金资助项目(51675079)。20210522 收到初稿, 20211120 收到修改稿

coupling between viscosity and viscous dissipation, when analyzing the melt flow in the polymer micro molding process.

**Key words:** polymer; microscale; viscosity; viscous dissipation; melt temperature

## 0 前言

在聚合物材料微成型过程中, 由于流道尺寸通常为微米量级, 流道的表体比(表面积与体积之比)成倍增大, 导致流道内的聚合物熔体具有含热少和散热快的特点, 熔体温度的变化很大, 严重影响到聚合物材料制品的成型质量。对于微米量级的流道, 微尺度效应明显并影响熔体的流变特性参数, 如黏度、黏性耗散等。熔体黏度受到温度、微流道尺度等多种因素的影响, 已有的宏观尺度黏度模型难以准确反应微尺度效应下实际的熔体流变特性<sup>[1-2]</sup>, 因此建立合理的微尺度黏度模型是聚合物微成型的理论基础。黏性耗散是熔体在流动过程中由黏性摩擦力引起的机械能转换成热能的现象。聚合物在宏观成型时, 通常可以忽略黏性耗散的影响<sup>[3-6]</sup>, 但在微尺度成型时, 熔体与微流道壁面的摩擦阻力以及熔体内部的剪切作用强度都将大幅增加, 会产生大量黏性耗散热, 导致熔体温度变化而不可忽略<sup>[7]</sup>。黏性耗散产生的热量引起熔体温度增加, 黏度又随温度变化, 而黏性耗散是与黏度相关的函数。因此, 聚合物微成型时, 需要考虑黏度与黏性耗散之间的耦合作用。

在微尺度黏度模型研究方面, 主要集中在微流道特征尺寸对聚合物黏度的影响上。ERINGEN 等<sup>[8]</sup>基于黏性流体非局部连续理论, 结合分子取向效应, 建立了针对黏性流体的微尺度黏度模型, 该模型能较准确地描述特征尺寸为 0~300 nm 的黏度变化。YAO 等<sup>[9]</sup>基于 ERINGEN-OKADA 方程<sup>[8]</sup>和 CROSS 黏度模型<sup>[10]</sup>, 引入微尺度尺寸因子建立微尺度黏度模型, 该模型反映特征尺寸从纳米量级到亚微米量级时的黏度变化。庄俭<sup>[11]</sup>通过在宏观尺度黏度模型中引入尺寸因子的方法, 建立了表征熔体黏度与微流道特征尺寸关系的微尺度黏度模型, 描述了流道长径比对黏度的影响。王敏杰等<sup>[12]</sup>采用唯象性方法, 同样在宏观尺度黏度模型中引入尺寸因子, 建立了特征尺寸由厘米量级到微米量级时聚合物熔体的黏度模型。然而, 上述微尺度黏度模型只考虑了流道特征尺寸的影响, 忽略了黏性耗散引起的温度变化对黏度的影响。

针对微尺度条件下熔体的黏性耗散, 通常采用数值计算或试验的方式开展研究。KOO 等<sup>[13]</sup>以非

牛顿流体水为研究对象, 指出黏性耗散对流体流动的影响不可忽略, 且黏性耗散随流道特征尺寸的减小而增强。MORINI<sup>[14]</sup>研究了不同截面形状微流道对黏性耗散的影响, 计算了黏性耗散不可忽略的最小雷诺数。XU 等<sup>[15-16]</sup>建立了微尺度黏性耗散装置, 研究了微尺度黏性耗散对流变特性的影响, 结果表明微成型充模流动时, 黏性耗散会影响熔体的黏度。于同敏等<sup>[17-18]</sup>进行了微尺度熔体黏性耗散数值模拟研究, 结果表明, 随着剪切速率的增加, 黏性耗散温升显著增大, 对于定长径比的微流道, 黏性耗散作用随着特征尺寸的减小而增强, 黏性耗散温升随着特征尺寸的减小而减小。上述的研究主要针对黏性耗散对熔体温度的影响, 没有进一步研究温度变化对黏度的影响, 以及黏度变化对黏性耗散的反作用, 即缺少对微尺度效应下熔体流变特性耦合作用的研究。

本文针对微尺度流道内熔体流变特性的耦合问题, 采用试验和数值计算相结合的方法, 研究了黏度与黏性耗散的耦合作用及其对熔体温度的影响, 得到熔体黏度、黏性耗散、以及熔体温度在耦合作用影响下的变化规律, 可以为聚合物微成型工艺优化提供有效的理论和技术依据。

## 1 微尺度黏度与黏性耗散的耦合理论模型

### 1.1 控制方程

根据 KNUDSEN 的分类标准<sup>[7]</sup>, 聚合物熔体在微流道内的流动满足连续性假设, 属于连续介质力学的范畴。熔体可视为不可压缩、非等温的广义牛顿流体, 遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒三大定律。由于聚合物熔体的高黏性, 微流道中熔体质量微小, 重力和惯性力相对于黏滞力很小, 可忽略不计。微流道中的熔体满足以下方程

质量守恒方程

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

能量守恒方程

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + \rho g_x \quad (2)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \left( \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) + \rho g_y \quad (3)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \left( \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z \quad (4)$$

能量守恒方程

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \mu \phi \quad (5)$$

式中,  $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别为熔体速度在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的分量,  $\mu$  为熔体黏度,  $p$  为熔体压强,  $T$  为熔体温度,  $\rho$  为熔体密度,  $C_p$  为熔体的恒压热容,  $k$  为熔体的导热系数, 假设  $\rho$ 、 $C_p$ 、 $k$  均为不随温度和压强变化的常数。

式(5)中的  $\mu \phi$  为黏性耗散项, 是指单位体积流体的剪切摩擦转化为热能的速率, 其为剪切应力张量与速度梯度的双点积  $\tau_{ij} : (\nabla u_i)$ , 其中  $\phi$  为黏性耗散函数, 见式(6),  $\mu$  为与黏性耗散耦合的含有变量  $T$  的黏度模型。

$$\phi = 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \quad (6)$$

## 1.2 微尺度黏度模型

聚合物熔体在微尺度下的流动同宏观尺度下一样, 主要表现为非牛顿黏性响应, 其流动过程可以采用非牛顿流体的黏度模型表征。基于宏观尺度黏度模型, 采用唯象性方法建立的微尺度熔体黏度随着特征尺寸和温度变化的黏度模型<sup>[19]</sup>, 即

$$\mu(\dot{\gamma}, T, p, D) = \phi_{\text{mic}}(D) \cdot \mu_{\text{mac}}(\dot{\gamma}, T, p) \quad (7)$$

式中,  $\mu(\dot{\gamma}, T, p, D)$  为考虑流道特征尺寸变化影响的微尺度黏度模型;  $\phi_{\text{mic}}(D)$  为与微流道特征尺寸相关的尺寸因子, 其值大于 0, 表达式如下

$$\phi_{\text{mic}}(D) = 1.1 - \left( c_1 \cdot \frac{1}{D} \right)^{c_2} / c_3 \quad (8)$$

式中,  $D$  为流道的特征尺寸, 以微通道截面的当量

直径表示;  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  为模型系数;  $\mu_{\text{mac}}(\dot{\gamma}, T, p)$  为宏观尺度黏度模型, 如幂律黏度模型、CARREAU 黏度模型、CROSS 黏度模型、HBA 黏度模型等。聚合物熔体为非牛顿流体, 其黏度受剪切速率和温度的影响。黏性耗散通过影响熔体的温度分布而影响熔体黏度, 由 CARREAU 模型和 ARRHENIUS 定律给出熔体黏度与剪切速率、温度的关系<sup>[20]</sup>如下

$$\mu_{\text{mac}}(\dot{\gamma}, T) = \mu_0 \left( 1 + \lambda^2 \dot{\gamma}^2 \right)^{\frac{n-1}{2}} \exp[-b(T - T_s)] \quad (9)$$

式中,  $\mu_{\text{mac}}(\dot{\gamma}, T, p)$  为宏观黏度, 为剪切速率,  $T_s$  为参考温度,  $n$  为熔体的非牛顿指数,  $\mu_0$  为零剪切黏度,  $b$  为黏度的温度修正系数,  $T$  为熔体温度,  $\lambda$  为 CARREAU 模型参数。

式(5)中的黏性耗散项和式(7)中的黏度模型均含有温度变量  $T$ , 如果不考虑黏度与黏性耗散之间的耦合作用, 即黏度和黏性耗散互不影响, 熔体黏度不受黏性耗散引起的热量的影响。但熔体在实际流动过程中, 黏性耗散作用产生热量引起熔体温度变化, 黏度是随温度的变化而动态变化的, 黏度的变化反作用于黏性耗散, 黏性耗散引起的熔体温度变化又使熔体黏度发生变化, 这是一个黏度与黏性耗散相互耦合最终达到动态平衡的过程。本文中的耦合计算, 首先是在初始温度下确定熔体的初始黏度, 初始黏度作用于式(5)中的黏性耗散项导致熔体温度变化, 新得到的温度再次迭代到式(7)中, 得到新的熔体黏度。以此迭代, 直至熔体流动达到平衡状态, 获得熔体流动时黏度与黏性耗散的耦合计算结果。

## 2 微尺度黏度与黏性耗散耦合作用的数值计算

### 2.1 材料及模型参数

材料选择聚丙烯(Polypropylene, PP), PP 的相关参数及黏度模型参数见表 1<sup>[20]</sup>。

表 1 PP 材料的黏度模型参数和物理性能参数

参数		数值
黏度模型参数	$n$	0.607
	$\lambda/\text{s}$	2.953
	$\mu_0/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	9 275
	$b/(1/\text{K})$	0.016 4
	$T_s/\text{K}$	453
熔体密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$		735
恒压热容 $C_p/[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$		2 100
导热系数 $k/[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$		0.15

## 2.2 微流道几何模型及初始条件

设微流道为矩形截面，三组模型的几何尺寸如表 2 所示。进行几何建模并划分网格，网格为六面体并对靠近流道边界部分的网格细分。图 1 为微流道内熔体的几何及网格模型图，截面  $x$  方向尺寸分别为  $a=0.5\text{ mm}$ 、 $0.3\text{ mm}$  和  $0.2\text{ mm}$ ，截面  $y$  方向尺寸均为  $d=0.3\text{ mm}$ ，沿流动  $z$  方向的尺寸分别为  $L=12\text{ mm}$ 、 $12\text{ mm}$  和  $9.6\text{ mm}$ 。为了对矩形截面的流道统一对比，将矩形截面尺寸等效转化为当量直径为  $D$  的圆形截面，其中  $D=2ad/(a+d)$ 。

表 2 微流道几何模型的尺寸参数

模型分组	截面尺寸 $d/\text{mm} \times a/\text{mm}$	流道长度 $L/\text{mm}$	当量直径 $D/\text{mm}$	长径比 $L/D$
模型一	$0.3 \times 0.5$	12	0.375	32
模型二	$0.3 \times 0.3$	12	0.3	40
模型三	$0.3 \times 0.2$	9.6	0.24	40

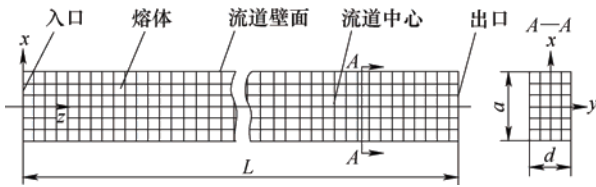


图 1 微流道内熔体的几何及网格模型

边界条件：入口温度  $T_0=518.15\text{ K}$ 。在流道入口处，沿流动  $z$  方向的平均速度为  $w_0=10.3\text{ mm/s}$ ，沿截面  $x$  和  $y$  方向速度分别为  $u=0\text{ mm/s}$  和  $v=0\text{ mm/s}$ 。出口压强为环境压强，即为  $p_{\text{ref}}=1\text{ atm}$ 。流道壁面假设为绝热壁，忽略对流换热和壁面滑移。

## 3 耦合作用计算结果与讨论

### 3.1 熔体黏度特性

在微尺度效应下，熔体黏度变化受到流道当量直径大小的影响。黏度与黏性耗散的耦合作用引起熔体温度变化，从而影响熔体黏度。为此，分别计算了当量直径为  $0.375\text{ mm}$ 、 $0.3\text{ mm}$  和  $0.24\text{ mm}$  时，考虑黏度与黏性耗散耦合作用的熔体黏度分布，在不同当量直径流道内的熔体黏度分布趋势大致相同，如图 2 所示。熔体黏度沿流动  $z$  方向变化较小，在截面沿  $x$  方向，黏度在流道中心处最大，向流道壁面方向逐渐减小，并在流道壁面处降至最小。

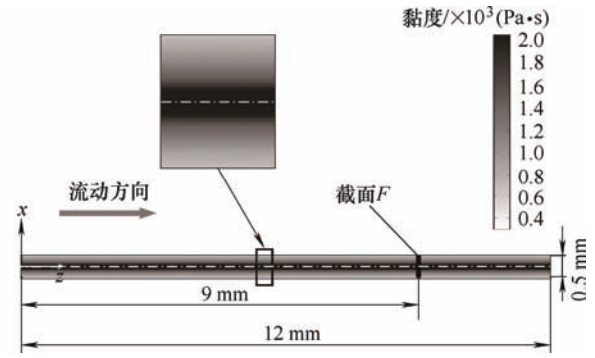


图 2 当量直径  $D=0.375\text{ mm}$  时的黏度分布

为了保证熔体达到充分稳定的流动状态，同时避免熔体在流道出口处波动的影响，以图 2 中距离流道入口  $9\text{ mm}$  处的横截面  $F$ ，分析熔体黏度在流道截面的变化，如图 3 所示。横坐标  $H$  为沿  $x$  方向从横截面中心到流道壁面的标准化距离，为无量纲参数，表达式为  $H=x/(a/2)$ ，在流道中心处为 0，在流道壁面处为 1。当量直径一定时，黏度在流道中心处最大，从流道截面中心沿  $x$  方向减小，减小速度由快变慢，靠近壁面处趋于平缓，在流道壁面处降至最低。这是因为黏度受剪切速率和温度等因素的影响，剪切速率和温度越高，黏度因熔体分子链之间的缠结作用越弱，黏度越小。由于截面中心处的熔体温度和剪切速率均最低且沿  $x$  方向逐渐增加，所以黏度在截面中心处最大，沿  $x$  方向减小。在靠近壁面处的高温度和高剪切速率区域，熔体处于低黏度状态，黏度对温度和剪切速率的敏感程度降低，所以黏度曲线于壁面处趋于平缓。对于不同当量直径的流道，熔体黏度随当量直径的减小而减小。这是因为，当入口速度相同时，当量直径越小，流道内的熔体剪切速率越高，黏度与剪切速率呈负相关，黏度随当量直径的减小而减小。

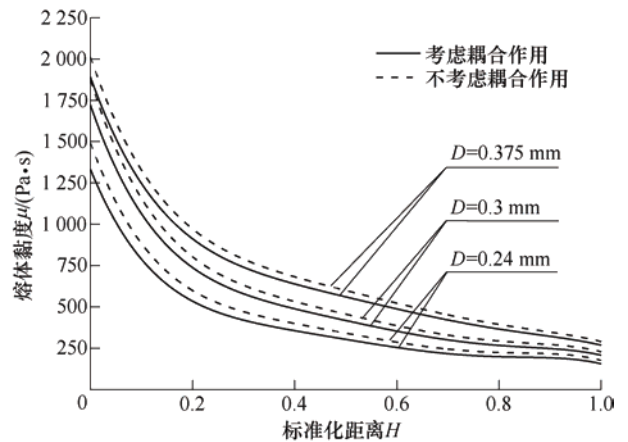


图 3 黏度沿截面  $x$  方向的变化曲线

如果在数值计算中不考虑黏度与黏性耗散之间

的耦合作用, 熔体的黏度值会受到影响, 为了研究考虑耦合作用与否对熔体黏度的影响程度, 对比计算了相同当量直径时不考虑耦合作用时的黏度变化, 在横截面  $F$  的变化曲线如图 3 中的虚线所示, 表 3 表示不同当量直径下流道中心处的熔体黏度大小。当量直径越小, 黏度在考虑耦合作用和不考虑耦合作用时的结果相差越大, 由此说明耦合作用对熔体黏度的影响随当量直径的减小而增强。这是因为当量直径越小, 流道内熔体剪切作用越强, 熔体温度变化越大, 耦合作用对黏度的影响也就越明显。对于同一当量直径的流道, 越靠近流道中心, 黏度在考虑耦合作用和不考虑耦合作用时的结果相差越大, 说明越靠近流道中心, 耦合作用对熔体黏度的影响越大。这是因为, 黏性耗散导致熔体温度增加, 黏度下降, 虽然黏性耗散主要发生在靠近壁面处, 但其产生的热量向流道中心传导, 壁面处熔体黏度较低, 受温度影响不明显, 所以变化较小, 中心处熔体黏度较高, 受温度影响显著。

表 3 流道截面中心处的熔体黏度对比

当量直径 $D/\text{mm}$	不考虑耦合 $\mu_1/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	考虑耦合 $\mu_2/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	偏差 $(\mu_1-\mu_2)/\mu_2\times 100\%$
0.375	2 013.76	1 890.86	6.50
0.3	1 872.55	1 721.80	8.76
0.24	1 493.78	1 332.64	12.09

### 3.2 熔体黏性耗散

考虑黏度与黏性耗散之间的耦合作用, 分别计算了  $D=0.375\text{ mm}$ 、 $0.3\text{ mm}$  和  $0.24\text{ mm}$  三种当量直径的流道内熔体的黏性耗散。图 4 表示  $D=0.375\text{ mm}$  时流道内的黏性耗散分布, 黏性耗散沿流动  $z$  方向变化较小, 沿截面  $x$  方向上, 在截面中心处最小, 向流道壁面方向逐渐增大并在流道壁面处增至最大。

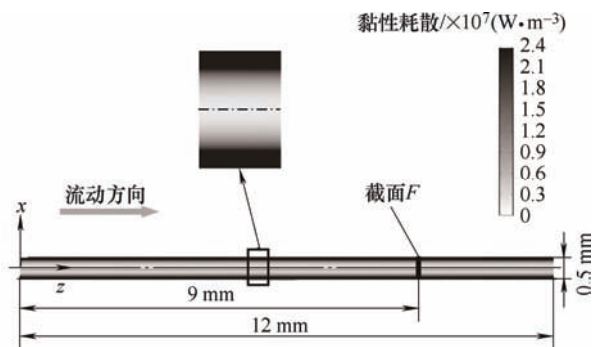


图 4 当量直径  $D=0.375\text{ mm}$  时黏性耗散分布

黏性耗散沿截面  $x$  方向的变化如图 5 所示。由于黏性耗散与剪切速率呈正向相关, 剪切速率越高,

熔体分子链之间的剪切作用越强, 同一当量直径的流道, 熔体在流道截面中心的剪切速率最低, 自中心沿  $x$  方向增加, 越靠近壁面剪切速率增加越快, 所以, 熔体在截面中心的黏性耗散最小, 自截面中心沿  $x$  方向增大, 且增大速度由慢变快。对于不同当量直径的流道, 黏性耗散随当量直径的减小而增大。这是因为流道当量直径越小, 熔体流动时分子间的剪切作用越强, 产生的黏性耗散越大。

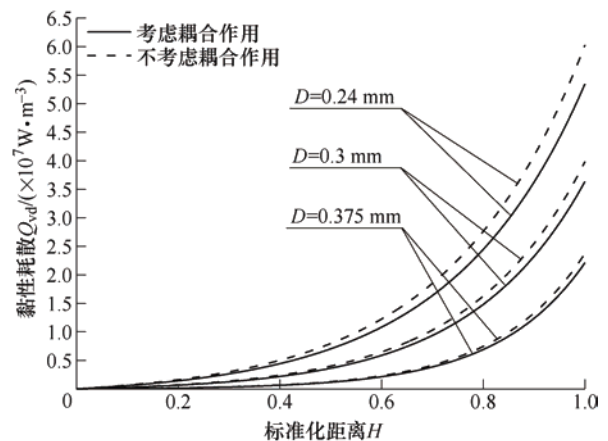


图 5 黏性耗散沿截面  $x$  方向的变化曲线

不考虑黏度与黏性耗散之间的耦合作用, 黏性耗散沿截面  $x$  方向的变化如图 5 所示, 表 4 为流道壁面处的黏性耗散值。由式(5)和式(6)可知, 黏性耗散受黏度影响, 由于耦合作用对黏度的影响随当量直径的减小而变大, 因此, 当量直径越小, 耦合作用对黏性耗散的影响越大。对于同一当量直径的流道, 越靠近流道壁面, 黏性耗散在考虑耦合作用和不考虑耦合作用时的结果相差越大, 说明越靠近流道壁面, 耦合作用对黏性耗散的影响越大。这是因为靠近壁面处的速度梯度较大, 熔体内部剪切作用较强, 导致壁面处的熔体温度变化较大, 黏度受温度影响就越大, 越靠近壁面, 耦合作用对黏性耗散的影响也就越大。

表 4 流道截面壁面处的黏性耗散对比

当量直径 $D/\text{mm}$	不考虑耦合 $Q_{vd1}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-3})$	考虑耦合 $Q_{vd2}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-3})$	偏差 $(Q_{vd1}-Q_{vd2})/Q_{vd2}\times 100\%$
0.375	$2.37\times 10^7$	$2.21\times 10^7$	7.24
0.3	$3.98\times 10^7$	$3.63\times 10^7$	9.64
0.24	$6.02\times 10^7$	$5.34\times 10^7$	12.73

## 4 微尺度黏度与黏性耗散耦合作用对熔体温度分布的影响

流道内的熔体温度是影响聚合物成型质量的重

要成型参数,在黏度与黏性耗散的耦合作用和流道当量直径的影响下,流道内熔体温度会发生变化,包括熔体沿截面  $x$  方向和流动  $z$  方向的变化。分别计算了  $D=0.375$  mm、 $0.3$  mm 和  $0.24$  mm 三种当量直径流道内的熔体温度,不同当量直径流道内的熔体温度分布大致相同,当量直径为  $0.375$  mm 时流道内的熔体温度分布如图 6 所示。熔体温度沿流动  $z$  方向逐渐升高,在同一横截面流道中心处的熔体温度最高,从流道中心沿  $x$  方向逐渐升高,并在流道壁面处增至最高。

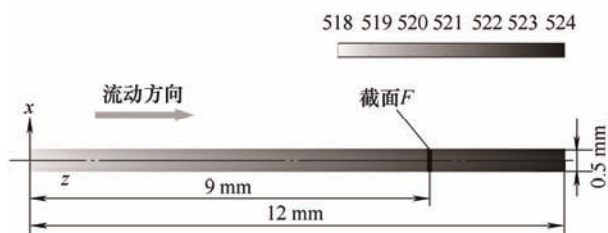


图 6 当量直径  $D=0.375$  mm 时熔体的温度分布

#### 4.1 熔体在流道截面的温度变化

为了保证熔体达到充分稳定的流动状态,同时避免熔体在流道出口处波动的影响,以图 6 中的流道横截面  $F$ ,分析熔体温度在流道截面的变化,如图 7 所示。可以看出,流道中心的温度最低,从流道中心沿截面  $x$  方向逐渐升高,这是因为黏性耗散引起熔体温度的增加。流过相同的距离,当量直径越小,黏性耗散产生的热量越多,熔体温度越高,热传导速度越快,流道中心和壁面之间的温度差也就越小。

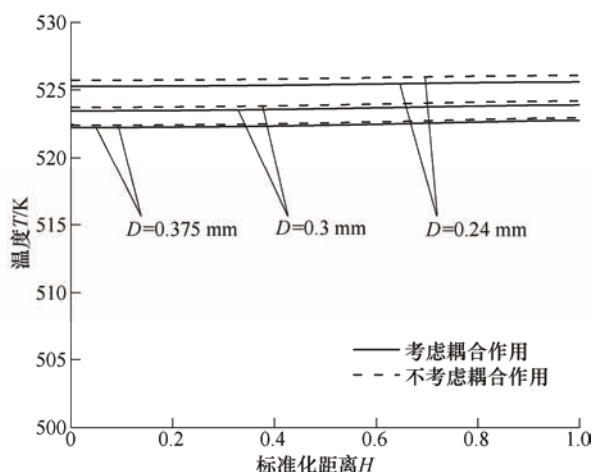


图 7 截面  $F$  温度的变化曲线

为了研究耦合作用对不同当量直径流道内熔体温度的影响程度,计算了不考虑耦合作用熔体温度的变化,如图 7 所示。当量直径越小,熔体温度在考虑耦合作用和不考虑耦合作用时的结果相差越

大,说明耦合作用对熔体温度的影响随当量直径减小而增强,当量直径越小,黏度与黏性耗散的耦合作用越不可忽略。

#### 4.2 熔体沿流动方向的温度变化

熔体在流道入口的初始速度不同,流动时聚合物分子链之间的剪切作用强度不同,从而影响熔体沿流动方向的温度变化。熔体在流道入口的初始温度不同,黏度受聚合物分子链之间的缠结作用影响会发生变化。为此,计算了不同入口速度和不同入口温度时,熔体沿流动  $z$  方向从流道入口到出口的温度变化。同时,对比了在相同工艺参数条件下试验测量的流道入口和出口的熔体温差<sup>[21]</sup>,以验证数值计算结果。

##### 4.2.1 不同入口速度条件下流道入口和出口的熔体温差

流道入口和出口之间的温差如图 8 所示,在耦合作用下,熔体从流道入口到出口温度升高,温差表示为  $\Delta T$ ,当量直径为  $0.375$  mm,入口速度从  $9.6$  mm/s 提高到  $12.4$  mm/s 时,熔体从流道入口到出口的温升  $\Delta T$  从  $5.59$  K 增大到  $6.48$  K;当量直径减小至  $0.3$  mm,入口速度从  $9.6$  mm/s 提高到  $12.4$  mm/s 时的熔体温升从  $7.88$  K 增大到  $9.00$  K;当量直径继续减小至  $0.24$  mm 时,入口速度从  $9.6$  mm/s 提高到  $12.4$  mm/s 时的熔体温升从  $7.48$  K 增大到  $8.65$  K。提高入口速度,熔体分子链之间的剪切摩擦作用增强,黏性耗散产生的热量也就越多,使熔体温度沿流动方向升高。当量直径分别为  $0.375$  mm 和  $0.3$  mm 时,熔体从流道入口到出口的平均温升分别为  $6.04$  K 和  $8.44$  K。说明熔体流动相同的距离,当量直径越小,其在出口处的温度越高。这是因为当量直径越小,熔体流动时的阻力随着流动空间的减小而增大,分子链之间及其与流道壁面之间的剪切摩擦作用越发强烈,由黏性耗散产生的热量也就越多,熔体温度的增幅也就越大。

在相同工艺参数条件下试验测量了熔体从流道入口到出口的温差,如图 8 所示。当量直径为  $0.375$  mm,入口速度从  $9.6$  mm/s 提高到  $12.4$  mm/s 时,熔体从流道入口到出口温升从  $3.78$  K 增大到  $6.05$  K;当量直径为  $0.3$  mm,入口速度从  $9.6$  mm/s 提高到  $12.4$  mm/s 时的熔体温升从  $6.08$  K 增大到  $9.03$  K;当量直径为  $0.24$  mm 时,入口速度从  $9.6$  mm/s 提高到  $12.4$  mm/s 时的熔体温升从  $4.10$  K 增大到  $7.07$  K。试验证明在相同当量直径下,提高入口速度,熔体沿流动  $z$  方向的温升变大;流经相同的距离,熔体温升随当量直径的减小而增大。对

比考虑黏度与黏性耗散耦合作用的数值计算结果和试验测量值的结果表明, 数值计算的温度变化趋势与试验测量的结果一致相似, 但仍有一定差别。试验结果曲线可知, 当量直径不变时, 随着速度的增加熔体沿流动  $z$  方向的温度升高趋于平缓, 分析原因可知, 熔体在低速流动时, 黏度较大, 提高一定流动速度, 熔体沿流动  $z$  方向温度升高明显。当熔体流动处于较高速度时, 剪切速率增大导致熔体黏度降低, 如果再提高相同的速度, 熔体沿流动  $z$  方向的温度升高便趋于平缓。另外, 对比数值计算和试验曲线发现, 两者温升存在一定偏差, 偏差在当

量直径为 0.375 mm 和 0.3 mm 时较小, 分析其原因为试验中熔体流动时与流道壁面产生换热而时熔体散失一定的热量, 可知流道长度相同时, 当量直径为 0.375 mm 的流道内熔体散失热量更多。当量直径为 0.24 mm 时的流道长度较短, 试验和计算值偏差较大, 是由流道壁面与熔体之间换热引起, 当量直径越小, 流道内熔体表体比增大导致其包含的热量减小, 换热对熔体温度的影响更大, 试验得到的数据与计算结果偏差也就越大。

不考虑黏度与黏性耗散的耦合作用, 熔体从流道入口到出口的温差如图 8 所示, 熔体温度沿流动方向升高, 在不考虑耦合作用时的温升高于考虑耦合作用时的温升, 且当量直径为 0.375 mm、0.3 mm 和 0.24 mm 时两者之间的平均温升偏差分别为 5.50%、6.28% 和 7.26%。当量直径为 0.375 mm、0.3 mm 和 0.24 mm 时, 不考虑耦合作用时的计算平均温升比试验测量平均温升偏差分别高 1.38 K、1.02 K 和 2.77 K。当量直径为 0.375 mm、0.3 mm 和 0.24 mm 时, 考虑耦合作用时的计算平均温升比试验测量平均温升偏差分别高 1.05 K、0.49 K 和 2.19 K。显然, 不考虑耦合作用时的熔体流道入口、出口之间的平均温差与试验值偏差较大。所以, 对聚合物熔体微尺度流变特性分析计算时, 考虑黏度与黏性耗散之间的耦合作用能够更准确地反映熔体流变特性的实际变化规律。

#### 4.2.2 不同入口温度条件下流道入口和出口的熔体温差

入口温度的不同, 对熔体沿流动方向的温度变化也产生影响, 考虑黏度与黏性耗散耦合作用的影响, 流道入口和出口之间的温差如图 9 所示。在耦合作用下, 熔体从流道入口到出口温度升高, 温差表示为  $\Delta T$ , 当量直径为 0.375 mm、入口温度从 508.15 K 提高到 528.15 K 时, 熔体从流道入口到出口的温升  $\Delta T$  从 6.80 K 减小到 4.98 K。当量直径为 0.3 mm、入口温度从 508.15 K 提高到 528.15 K 时, 熔体温升从 9.40 K 减小到 7.12 K。当量直径为 0.24 mm、入口温度从 508.15 K 提高到 528.15 K 时, 熔体温升从 9.07 K 减小到 6.67 K。提高熔体入口温度, 熔体在出口处的温度虽然在升高, 但升高的幅度随着入口温度的升高而减小。这是因为熔体温度越高, 黏度越低, 熔体流动时的剪切摩擦减弱, 黏性耗散产生的热量减少。当量直径分别为 0.375 mm 和 0.3 mm 时, 熔体从入口到出口的平均温升分别为 5.86 K 和 8.22 K。说明流经

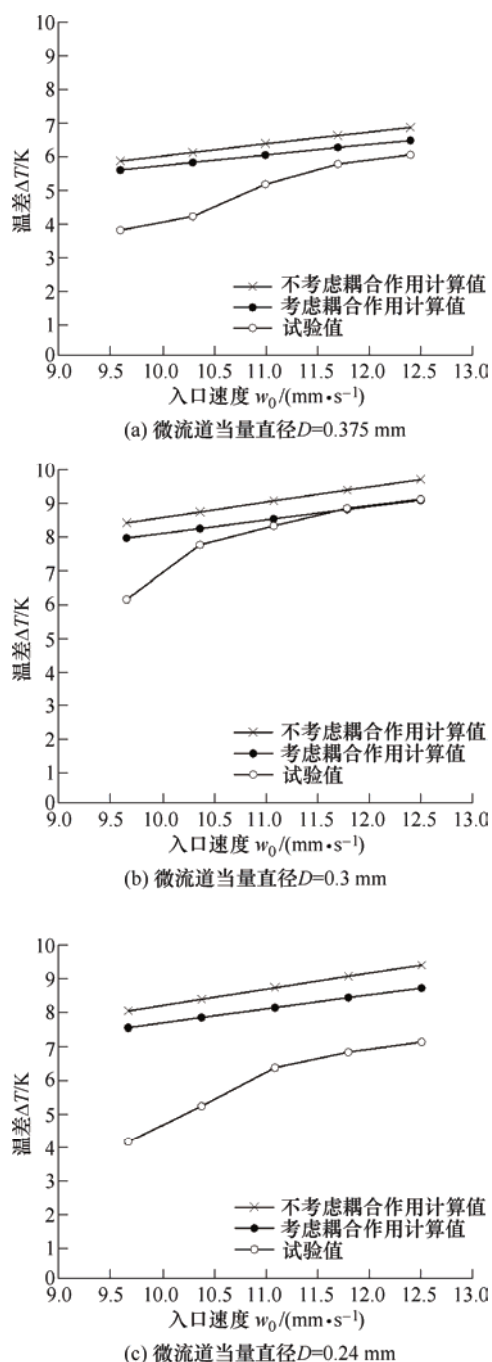


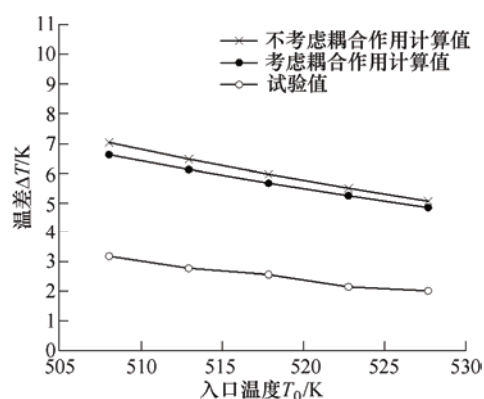
图 8 流道入口和出口的熔体温差与入口速度的关系曲线

相同的距离, 当量直径越小熔体沿流动  $z$  方向的温升越大。这是因为当量直径越小, 熔体分子链之间的剪切作用越强, 由黏性耗散产生的热量越多, 温升也就越大。

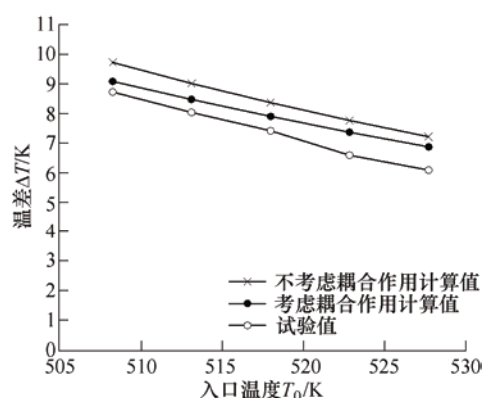
在相同工艺参数条件下试验测量了熔体从流道入口到出口的温差, 以验证熔体沿流动  $z$  方向的温升的数值计算结果, 如图 9 所示。熔体从流道入口到出口的温度升高, 当量直径为 0.375 mm、入口温度从 508.15 K 提高到 528.15 K 时, 熔体从流道入口到出口的温升从 3.28 K 下降到 2.09 K。当量直径为 0.3 mm、入口温度从 508.15 K 提高到 528.15 K 时, 熔体温升从 9.03 K 下降到 6.31 K。当量直径为 0.24 mm、入口温度从 508.15 K 提高到 528.15 K 时, 熔体温升从 7.02 K 下降到 4.31 K。试验证明提高入口处的熔体温度, 其沿流动  $z$  方向的温度依然升高, 但升高的幅度随入口温度的升高而减小。对比上述数值计算结果表明, 考虑黏度与黏性耗散时的数值计算结果与试验测量的结果趋势相似, 但在流道当量直径不同时仍有一定差别。通过对比图 9 中的数值计算和试验曲线发现, 得到的温升值存在偏差, 当量直径为 0.375 mm 和 0.3 mm 时, 微流道长度相同, 证明流经相同的距离, 当量直径越小, 试验结果和计算结果偏差越小。分析其原因是, 虽然当量直径减小时熔体剪切作用增强, 黏性耗散增加, 但同时, 熔体温度升高, 熔体黏度显著降低, 黏性耗散对熔体温度的贡献降低, 所以当量直径越小, 计算和试验的偏差越小。另外, 试验测量时熔体和流道壁面产生换热而失去一些热量, 消除这种偏差需要进一步考虑熔体的换热。当量直径为 0.24 mm 时, 流道长度较短, 相比于当量直径为 0.3 mm 时试验和计算值偏差较大, 是由流道壁面与熔体之间换热引起, 当量直径越小, 流道内熔体表体比增大导致其包含的热量减小, 换热对熔体温度的影响更大, 试验的得到的数据与计算结果偏差也就越大。所以, 下一步可以通过考虑换热与黏度、黏性耗散的耦合作用来消除这种偏差。

不考虑黏度与黏性耗散的耦合作用, 熔体从流道入口到出口的温差如图 9 所示。熔体温度沿流动方向升高, 在不考虑耦合作用时的温升高于考虑耦合作用时的温升, 且当量直径为 0.375 mm、0.3 mm 和 0.24 mm 时两者之间的平均温升偏差分别为 5.36%、5.99%和 7.05%。当量直径为 0.375 mm、0.3 mm 和 0.24 mm 时, 不考虑耦合作用时的计算平均温升比试验测量平均温升分别高 3.55 K、1.08 K

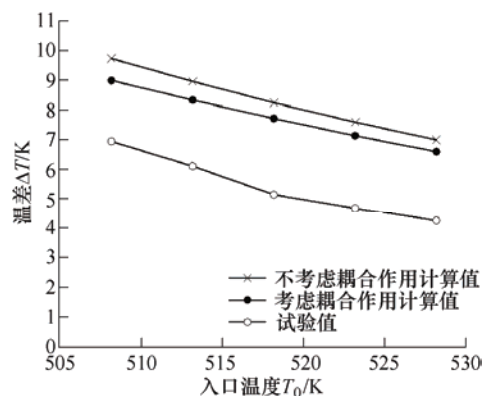
和 2.89 K。当量直径为 0.375 mm、0.3 mm 和 0.24 mm 时, 考虑耦合作用时的计算平均温升比试验测量平均温升偏差分别高 3.23 K、0.59 K 和 2.34 K。不考虑耦合作用时的熔体流道入口、出口之间的平均温升与试验值偏差较大。所以, 通过对比不同入口温度的计算结果和试验测量结果可以证明, 考虑黏度与黏性耗散之间的耦合作用的计算结果与试验测量结果一致, 能反映熔体流变特性的实际变化。在对聚合物熔体微尺度流变特性进行计算时, 黏度与黏性耗散的耦合作用不可忽略。



(a) 微流道当量直径  $D=0.375$  mm



(b) 微流道当量直径  $D=0.3$  mm



(c) 微流道当量直径  $D=0.24$  mm

图 9 流道入口和出口的熔体温差与入口温度的关系曲线

## 5 结论

聚合物微成型过程中, 熔体黏度与黏性耗散之间的耦合作用影响到微尺度流道内的熔体流动特性。本文基于微尺度黏度模型和黏性耗散方程, 对不同当量直径的微流道进行了耦合数值计算, 并进行了试验对比, 得到结论如下。

(1) 在相同的成型工艺参数条件下, 受到微尺度效应的影响, 微流道当量直径越小, 流道内熔体剪切作用越强, 黏性耗散作用也就越强, 其对熔体温度的影响越大, 越不可忽略, 因此, 黏度与黏性耗散的耦合作用对熔体温度的影响也越大。

(2) 当量直径一定时, 熔体流动速度越大, 内部的剪切作用越强, 熔体沿流动  $z$  方向的温度上升越高。黏度和黏性耗散随流动速度的增加变化增大, 两者之间的耦合作用对熔体温度的影响也就更大。当量直径越小, 熔体剪切作用越强, 不同速度下的熔体平均温升在不考虑耦合作用和考虑耦合作用时的偏差也越大, 即耦合作用对熔体温度影响越大。

(3) 同一当量直径的微流道, 熔体入口温度越高, 熔体黏度越小, 随着入口温度的提高, 熔体内部的剪切作用增加越小, 黏性耗散作用对熔体温度升高的贡献越小, 熔体沿流动  $z$  方向的温度虽然仍在增加但幅度逐渐减小。当量直径越小, 熔体剪切作用越强, 不同温度下的熔体沿流动  $z$  方向的平均温升在不考虑耦合作用和考虑耦合作用时的偏差也越大, 即耦合作用对熔体温度影响越大。

(4) 聚合物成型过程中, 考虑黏度与黏性耗散的耦合作用对熔体温度的影响, 通过调整入口速度和入口温度, 有利于提高成型工艺参数的准确性。

## 参 考 文 献

- [1] KOO J, KLEINSTREUER C. Liquid flow in microchannels: experimental observations and computational analyses of microfluidics effects[J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2003, 13(5): 568-579.
- [2] CHAN H B, AKSYUK V, KLEIMAN R, et al. Quantum mechanical actuation of microelectromechanical systems by the Casimir force[J]. *Science*, 2001, 293(5536): 1766-1766.
- [3] KOO Jo, KLEINSTREUER C. Viscous dissipation effects in microtubes and microchannels[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2004, 47(14-16): 3159-3169.
- [4] TUNC G, BAYAZITOGLU Y. Heat transfer in microtubes with viscous dissipation[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2001, 44(13): 2395-2403.
- [5] DINH S, ARMSTRONG R. Non-isothermal channel flow of non-newtonian fluids with viscous heating[J]. *Aiche Journal*, 1982, 28(2): 294-301.
- [6] YBARRA R, ECKERT R. Viscous heat generation in slit flow[J]. *Aiche Journal*, 1980, 26(5): 751-762.
- [7] 徐斌, 王敏杰, 于同敏, 等. 微通道聚合熔体粘性耗散尺度效应[J]. *高分子材料科学与工程*, 2014, 30(7): 105-109.  
XU Bin, WAGN Minjie, YU Tongmin, et al. Viscous dissipation scale effect on polymer melt in micro channels[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2014, 30(7): 105-109.
- [8] ERINGEN A, OKADA K. A lubrication theory for fluids with microstructure[J]. *International Journal of Engineering Science*, 1995, 33(15): 2297-2308.
- [9] YAO Donggang, KIM B. Simulation of the filling process in micro channels for polymeric materials[J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2002, 12(5): 604-610.
- [10] CROSS M. Relation between viscoelasticity and shear-thinning behavior in liquids[J]. *Rheologica Acta*, 1979, 18(5): 609-614.
- [11] 庄俭. 微注塑成型充模流动理论与工艺试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.  
ZHUANG Jian. Research on filling flow theory and processing experiment in micro injection molding[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
- [12] 王敏杰, 田慧卿, 赵丹阳. 聚合物熔体微尺度剪切黏度测量方法与黏度模型[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(16): 21-29.  
WANG Minjie, TIAN Huiqing, ZHAO Danyang. Micro-scale shear viscosity testing approach and viscosity model of polymer melts[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(16): 21-29.
- [13] KOO J, KLEINSTREUER C. Liquid flow in microchannels: Experimental observations and computational analyses of microfluidics effects[J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2003, 13(5): 568-579.
- [14] MORINI G. Viscous heating in liquid flows in micro-channels[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(17): 3637-3647.

- [15] XU Bing, WANG Minjie, YU Tongmin, et al. Viscous dissipation influencing viscosity of polymer melt in micro channels[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2010, 24(7): 1417-1423.
- [16] 庄俭, 于同敏, 王敏杰. 微注塑成形中熔体充模流动分析及其数值模拟[J]. 机械工程学报, 2008, 44(9): 43-49. ZHUANG Jian, YU Tongmin, WANG Minjie. Analysis and numerical simulation of polymer melt filling in micro injection molding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(9): 43-49.
- [17] 于同敏, 永恒, 贝海鑫, 等. 微尺度通道中聚合物熔体的黏性耗散效应[J]. 化工学报, 2013, 64(8): 2781-2787. YU Tongmin, YONG Heng, BEI Haixin, et al. Viscous dissipation effects of polymer melts in micro-channels[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2013, 64(8): 2781-2787.
- [18] 于同敏, 贝海鑫. 微注塑充模流动中的粘性耗散效应[J]. 高分子材料科学与工程, 2012, 28(12): 164-168. YU Tongmin, BEI Haixin. Viscous dissipation effects in micro-injection molding filling flow[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2012, 28(12): 164-168.
- [19] 田慧卿. 聚合物多腔微管挤出成型理论与模具设计方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- TINA Huiqing. Extrusion theory and die design method of polymer multi-lumen micro tubes[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [20] ISHIKAWA T, KIHARA S, FUNATSU K. 3-D non-isothermal flow field analysis and mixing performance evaluation of kneading blocks in a co-rotating twin screw extruder[J]. Polymer Engineering and Science, 2001, 41(5): 840-849.
- [21] 于同敏, 张拯恺, 邹德健. 矩形截面微模具通道中熔体的黏性耗散效应[J]. 化工学报, 2017, 68(4): 1306-1317. YU Tongmin, ZHANG Zhengkai, ZOU Dejian. Viscous dissipation effect of polymer melt in a rectangular cross section micro mold channel[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2017, 68(4): 1306-1317.

作者简介: 张嘉昆, 男, 1990 年出生, 博士研究生。主要研究方向为聚合物材料成型技术。

E-mail: zjk990@mail.dlut.edu.cn

王敏杰(通信作者), 男, 1958 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为模具设计制造及其计算机辅助技术、聚合物材料成型技术等。

E-mail: mjwang@dlut.edu.cn