

6-4-2020

Modeling and Numerical Simulation of Micro-tube Scale Effects in 3DP Process

Congping Chen

College of Mechanical & Power Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

Xiaoyun Wang

College of Mechanical & Power Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

Jieguang Huang

College of Mechanical & Power Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

Li Bo

College of Mechanical & Power Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling and Numerical Simulation of Micro-tube Scale Effects in 3DP Process

Abstract

Abstract: Wall slip and viscous dissipation are two main scale effects in 3DP (Three dimensional printing) process, which has influences on the material's flow properties and thermophysical properties and the printing quality. *According to the two phenomena above, theoretic models of wall slip and viscous dissipation were established, respectively, and the software Polyflow was used to study the two scale effects and their interactions with molten ABS in micro-tubes of different radius.* Simulation results show that wall slip level increases with the slip coefficient decreasing, and material's velocity decreases with the increase of tube radius; Viscous dissipation level decreases with inlet temperature rising and tube radius decreasing. Furthermore, material's temperature in wall considering wall slip is lower than that without wall slip, and both wall slip and viscous dissipation level decrease when the inlet temperature rises.

Keywords

3DP, wall slip, viscous dissipation, modeling, numerical simulation

Recommended Citation

Chen Congping, Wang Xiaoyun, Huang Jieguang, Li Bo. Modeling and Numerical Simulation of Micro-tube Scale Effects in 3DP Process[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(6): 1359-1365.

3D 打印过程微流道尺度效应建模与数值模拟

陈从平, 王小云, 黄杰光, 李波

(三峡大学机械与动力学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 3D 打印微流道尺度效应主要表现为壁面滑移和粘性耗散, 它们影响熔体的流动特性和热物理特性, 进而影响打印质量。针对上述两种效应, 分别建立了理论模型, 并运用流体仿真软件 Polyflow 对丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(Acrylonitrile butadiene styrene, ABS)熔体在不同长径比的微流道中的壁面滑移和粘性耗散效应及其相互影响进行了研究。结果表明, 壁面滑移程度随滑移系数减小而增大, 熔体流速分布随管径增大而整体减小; 粘性耗散程度随着微喷管入口温度升高和管径增大而减小; 考虑壁面滑移时熔体的粘性耗散程度降低; 粘性耗散和壁面滑移随着入口温度升高而同时减弱。

关键词: 3D 打印; 壁面滑移; 粘性耗散; 建模; 数值模拟

中图分类号: O351.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 06-1359-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201706027

Modeling and Numerical Simulation of Micro-tube Scale Effects in 3DP Process

Chen Congping, Wang Xiaoyun, Huang Jieguang, Li Bo

(College of Mechanical & Power Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Wall slip and viscous dissipation are two main scale effects in 3DP (Three dimensional printing) process, which has influences on the material's flow properties and thermophysical properties and the printing quality. According to the two phenomena above, theoretic models of wall slip and viscous dissipation were established, respectively, and the software Polyflow was used to study the two scale effects and their interactions with molten ABS in micro-tubes of different radius. Simulation results show that wall slip level increases with the slip coefficient decreasing, and material's velocity decreases with the increase of tube radius; Viscous dissipation level decreases with inlet temperature rising and tube radius decreasing. Furthermore, material's temperature in wall considering wall slip is lower than that without wall slip, and both wall slip and viscous dissipation level decrease when the inlet temperature rises.

Keywords: 3DP; wall slip; viscous dissipation; modeling; numerical simulation

引言

3D 打印是通过将材料逐层叠加构造实体的先进制造技术(如图 1 所示), 广泛应用于航天、机械、



收稿日期: 2015-07-30 修回日期: 2015-11-11;
基金项目: 国家自然科学基金(51475266, 51005134),
三峡大学研究生科研创新基金(2014CX027);
作者简介: 陈从平(1976-), 男, 湖北荆州, 博士,
教授, 研究方向为 3D 打印。

电子、生命科学等领域, 特别在加工具有微细结构的精密零部件方面具有很大的优势^[1]。3D 打印过程中, 由于喷头特征尺寸较小(微/纳米级)和表体比较大, 流体的流变行为与宏观尺度下的表现明显不同, 宏观条件下可被忽略的微尺度效应如表面张力、壁面滑移、粘性耗散等对微管道流动造成很大影响^[2], 其中壁面滑移和粘性耗散为主要影响因素。

<http://www.china-simulation.com>

• 1359 •

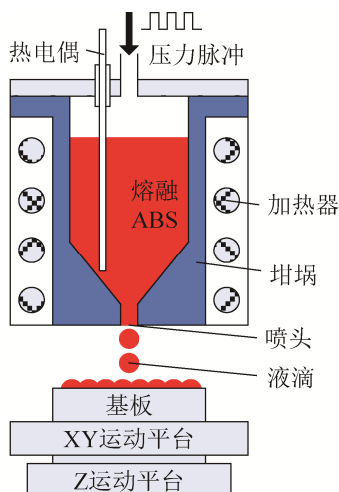


图 1 3D 打印原理图

Fig. 1 Schematic Diagram of 3D Printing

近年来,人们分别对微管道流动的壁面滑移和粘性耗散效应进行了大量的研究,并取得了一定成果。于同敏等运用数值模拟方法研究了微小通道中熔体的壁面滑移对流动速度、熔体压力等的影响^[3]。傅志红等结合不同边界条件分析了机头压缩段长度在 20~30mm 变化时对制品变形的影响,结果表明壁面滑移使熔体流动阻力减小、速度分布均匀^[4]。Azese 等运用了一种新的三系数滑移定律分析了一类粘弹性非牛顿流体,结果表明合理选用该模型能够与实验数据吻合^[5]。布文峰等对微管道流动产生的粘性耗散问题进行了数值模拟和实验验证,实验结果与数值模拟结果相吻合,表明忽略粘性耗散会影响微管摩擦系数和雷诺数的表观实验结果^[6]。Alves 等在研究多孔层水平流动中小振幅扰动的热不稳定性问题时考虑了粘性耗散效应,结果显示用较大 Peclet 数能够近似描述粘性耗散与粘弹性的组合效应^[7]。

然而,事实上微尺度条件下壁面滑移与粘性耗散会相互影响,并最终影响流体在微流道中的流动特性。本文以 3D 打印 ABS 熔体过程为研究对象,建立了打印过程壁面滑移和粘性耗散模型,并选用三组不同长径比的微尺度喷管进行数值模拟,研究壁面滑移及粘性耗散对微喷管出口流速的影响,在此基础上,进一步研究壁面滑移与粘性耗散间的相

互作用关系及对打印流速的影响,为实际加工提供理论依据。

1 理论模型

1.1 壁面滑移

壁面滑移现象的产生机理比较复杂,人们从不同的角度对其进行了解释,主要有缠结-解缠和吸附-解吸附两种观点。缠结-解缠机理认为,管道壁面依附着一层很薄的聚合物,当流体所受剪切应力超过临界值时,会与该层聚合物内侧分子发生解缠作用并随之一起流动产生滑移现象。吸附-解吸附机理则认为,管道壁面处的流体所受剪切应力超过临界值时,吸附于壁面的分子发生解吸附产生相对滑动。同时,人们还对壁面滑移的数值模型进行了广泛的研究,提出了 Threshold 模型^[8]、Asymptotic 模型^[9]、Navier 模型^[10]等多种理论模型。其中,Navier 模型基于吸附-解吸附机理并结合了广义 Navier 定律,广泛应用于微喷管熔体流动问题,具体为

$$\tau_w = k(v_w - v_s)|v_s - v_w|^{e-1} \quad (1)$$

式中: τ_w 为熔体在壁面处的剪切应力; k 为滑移系数; v_w 为壁面的切向速度; v_s 为熔体在壁面处的速度; e 为材料参数,通常取值为熔体幂律指数。由于在喷射过程中喷管在熔体流速方向通常是静止的,即 $v_w=0$,式(1)改写为

$$\tau_w = -k v_s^e \quad (2)$$

需要说明的是, k 值越小表示滑移程度越大,当 $k=0$ 时,壁面完全滑移;当 $k=\infty$ 时,壁面无滑移。

1.2 粘性耗散

3D 打印中,熔体材料受喷管微尺度效应的影响,熔体与喷管壁面的粘性摩擦阻力相对宏观流动大幅增强,同时熔体快速流动形成的较大速度梯度增大了剪切应力,从而引起机械能转化为热能的显著粘性耗散效应,进而影响材料流动特性,这在微喷管流动中不可忽略。熔体流动的控制方程为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} = 0 \quad (3)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \eta \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] \quad (4)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \eta \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \frac{v^2}{r^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (5)$$

$$\rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\zeta \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \zeta \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \eta \varphi \quad (6)$$

式中: x 为轴向坐标; r 为径向坐标; u 为轴向速度, v 为径向速度; p 为压力; ρ 为密度; η 为动力粘度; C_p 为定压热容; ζ 为热导率; T 为熔体温度。 φ 为粘性耗散函数, 且有

$$\varphi = 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \quad (7)$$

1.3 粘度模型及参数

针对聚合物 ABS 熔体材料, 综合考虑温度、剪切速率以及压力等因素对其流动特性的影响, 采用 Cross-WLF 粘度模型^[11]可描述为

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \frac{\eta_0}{1 + (\eta_0 \dot{\gamma} / \tau^*)^{1-n}} \quad (8)$$

$$\eta_0 = D_1 \exp \left[-\frac{A_1(T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)} \right] \quad (9)$$

$$A_2 = \tilde{A}_2 + D_3 p \quad (10)$$

$$T^* = D_2 + D_3 p \quad (11)$$

式中: $\dot{\gamma}$ 为剪切速率; η_0 为零剪切粘度; τ^* 为材料由牛顿粘度过渡到幂律粘度时的剪切应力水平; n 为熔体幂律指数; D_1 、 A_1 、 \tilde{A}_2 为模型常数; T^* 为材料的玻璃化转变温度; D_2 为对应低压下的玻璃态转化温度; D_3 为压力影响系数。模型及材料各参数如表 1 所示。

表 1 模型及材料参数

参数	数值
熔体幂律指数 n	0.22
剪切应力水平 τ^*/Pa	119 000
模型常数 $D_1/\text{Pa}\cdot\text{s}$	1.3×10^{12}
玻璃态转化温度 D_2/K	373.15
压力影响系数 $D_3/(\text{K}/\text{Pa})$	0
模型常数 A_1/K	27.452
模型常数 \tilde{A}_2/K	51.6
密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	956.24
定压热容 $C_p/(\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$	2 620
热导率 $\zeta/(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$	0.21

2 数值模拟

采用 Polyflow 商用流体仿真软件对打印熔融 ABS 过程进行数值仿真, 所用计算机配置为: CPU Intel Core i5-4590, 内存 4GB, Windows 10 操作系统, 软件的操作界面如图 2 所示。熔体流动状态设置为稳态层流, 不考虑惯性和重力影响, 流体速度和温度采用耦合计算。粘度插值选用 Picard 迭代法, 该方法将 n 元的隐式非线性方程组 $F_i(x_i) = 0 (i=1, 2, \dots, n)$ 改写成为 n 个等价的 $x_i = \varphi_i(x_i) (x_i \in C)$ 显式单元, 接着求解按 $x_{i,k+1} = \varphi_i(x_{i,k}) (k=0, 1, 2, \dots)$ 右左轮回迭代生成的 n 个序列 $\{x_{i,k}\}$ 的极限, 能够将解 n 维空间复杂问题化解为解平面问题^[12], 适用于非牛顿流体 ABS 的粘度插值。求解器类型为代数多波前算法 (Algebraic multi-frontal, AMF) 直接求解。多波前算法是一种求解大规模系数线性代数方程组的方法, 其基本原理是寻找并构造出大规模稀疏矩阵中的密集子块, 即波前, 接着将原矩阵的分解转化为对所有波前的分解^[13]。传统多波前算法直接求解器基于几何分解, 而 AMF 求解器基于代数分解和优化, 计算速度更快且需要内存更小。

考虑喷管内半径分别为 0.25 mm、0.3 mm、0.35 mm、长度均为 10 mm 的三种打印情况, 入口流量均设为 $10 \text{ mm}^3/\text{s}$ 。首先将模型的入口温度设为 443.15 K, 壁面为绝热边界条件, 微喷管壁面滑移系数分别设为 300 000、500 000、 ∞ , 以此研究壁

面滑移对流速的影响。然后在滑移系数为 500 000 的情况下, 改变各组入口温度依次为 433.15 K、453.15 K, 研究熔体入口温度对考虑壁面滑移下粘性耗散的影响。

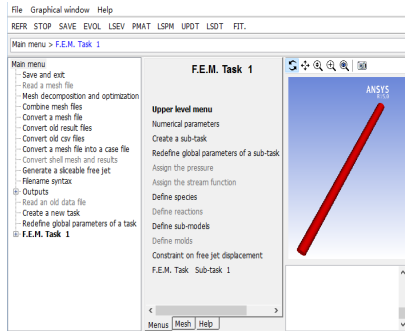


图 2 Polyflow 软件操作界面

Fig. 2 Operation Interface of Polyflow Software

2.1 壁面滑移结果及讨论

壁面滑移对喷管速度分布影响较大, 主要表现为流体在管壁的速度不为零, 且随滑移系数的变化而变化。设定三种喷管的材料入口温度均为 443.15 K, 考查不同管径、不同壁面滑移系数下熔体流经喷口的速度分布。

图 3 为熔体流经喷口流速云图, 可见喷口流速随喷口直径及壁面滑移系数变化而变化; 进一步, 将喷口流速按喷口半径不同进行分类整理, 绘制不同壁面滑移系数情况下熔体沿喷口半径流速分布曲线分别如图 4 所示。

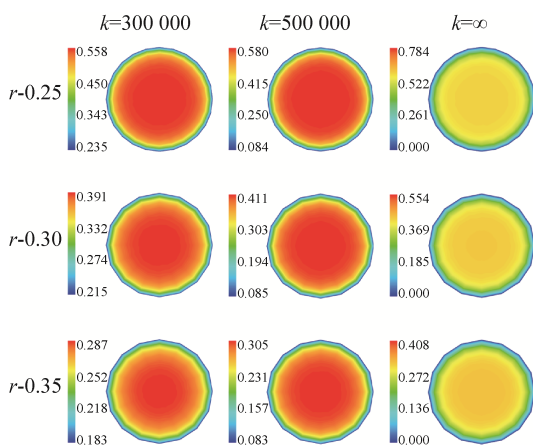


图 3 不同管径及滑移系数下喷管出口速度云图

Fig. 3 Velocity Contours of Nozzle Outlet under Various Pipe Diameters and Slip Coefficients

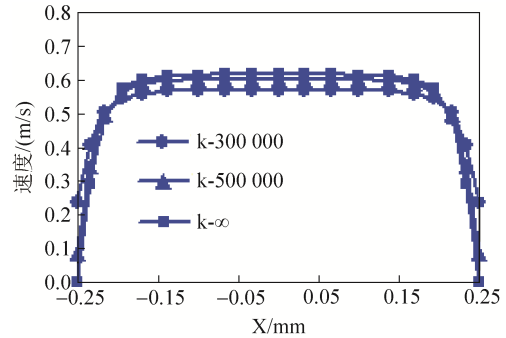
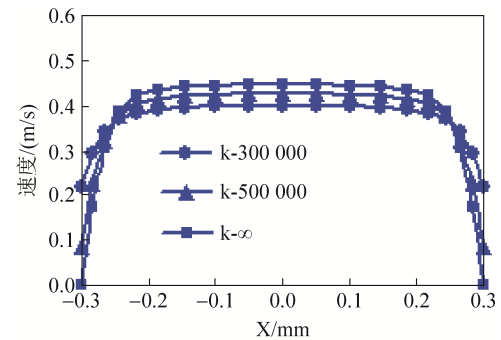
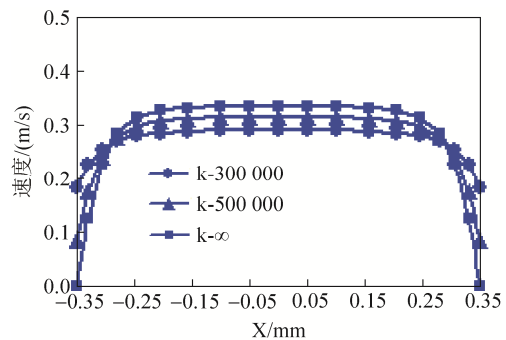
(a) $r=0.25$ mm(b) $r=0.3$ mm(c) $r=0.35$ mm

图 4 不同管径下喷管出口径向速度分布

Fig. 4 Radial Velocity Distribution of Nozzle Outlet under Various Pipe Diameters

由图 3~4 可以看出: (1) 当喷管直径一定时, 在不同滑移系数下, 靠近喷口截面中心的区域内熔体流速基本保持不变, 此后沿径向急剧下降; (2) 随着滑移系数的增大, 喷口中心流速增大, 但壁面滑移流速减小, 中心流速与壁面流速间的差值增大, 如当 $r=0.3$ mm、 $k=300$ 000 时, 熔体流速从喷口中心的 0.571 m/s 减小到壁面的 0.235 m/s, 减小了 58.8%, 此时滑移现象较明显; 当 $k=500$ 000 时, 中心流速升高到 0.601 m/s, 但在壁面处熔体受到较大剪切应力, 速度减小至 0.084 m/s, 减小 86.0%;

当 $k=\infty$ 时, 壁面处流速为零, 不存在滑移现象; (3) 对比图 4(a)、(b)、(c) 可以发现, 当滑移系数一定时 ($k=300\ 000$), 流速随喷嘴直径增大而明显减小, 中心流速从 $0.571\ \text{m/s}$ 减小到 $0.398\ \text{m/s}$ 再到 $0.291\ \text{m/s}$, 壁面处流速也不断减小, 从 $0.235\ \text{m/s}$ 到 $0.216\ \text{m/s}$ 再到 $0.184\ \text{m/s}$ 。

2.2 粘性耗散结果及讨论

粘性耗散是熔体在流动过程中由粘性摩擦力引起机械能转化为热能的现象, 表现为流体的温度升高, 进而导致粘度以及热量传递行为等发生变化, 影响流体的流动特性。以下探讨微尺度下考虑壁面滑移时, 粘性耗散对打印熔体温度的影响。设定滑移系数 $k=500\ 000$, 将各喷嘴入口温度分别设为 $433.15\ \text{K}$ 、 $443.15\ \text{K}$ 、 $453.15\ \text{K}$ 进行数值仿真。

图 5 为不同管径、不同入口温度下喷嘴的出口截面温度分布云图, 图 6 为出口截面温度分布曲线。

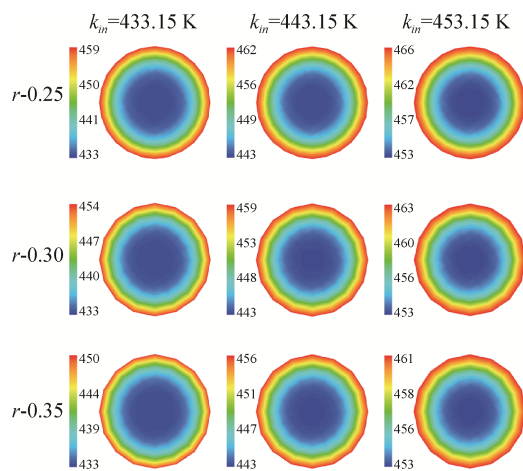
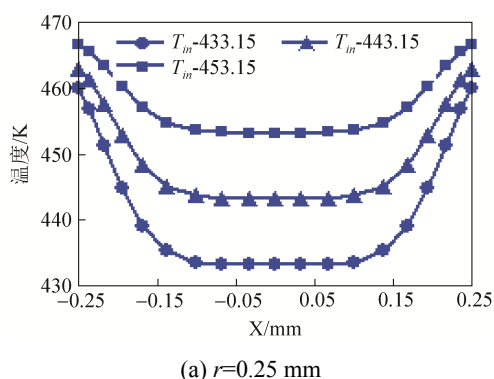
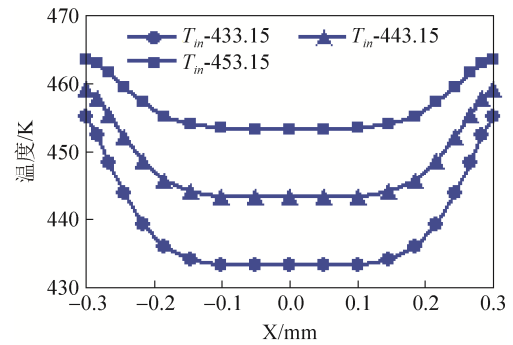


图 5 不同管径及入口温度下的喷嘴温度云图

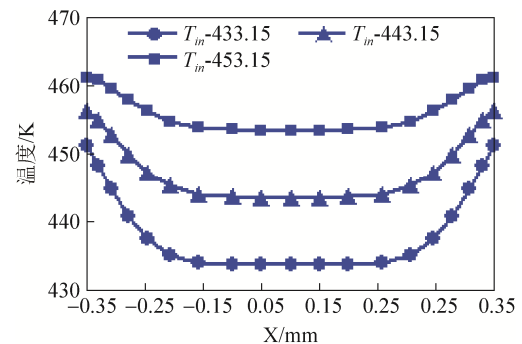
Fig. 5 Temperature Contours of Nozzle under Various Pipe Diameters and Inlet Temperature



(a) $r=0.25\ \text{mm}$



(b) $r=0.3\ \text{mm}$



(c) $r=0.35\ \text{mm}$

图 6 不同管径下喷嘴出口径向温度分布

Fig. 6 Radial Temperature Distribution of Nozzle Outlet under Various Pipe Diameters

从图 5~6 可以看出: (1) 熔体温度在靠近喷嘴中心的区域内基本保持不变, 超出该区域后沿径向逐渐升高, 到壁面处达最高, 表明粘性耗散改变了熔体在管道中的温度分布; (2) 以 $r=0.3\ \text{mm}$ 为例, 当入口温度 $T_{in}=433.15\ \text{K}$ 时, 出口壁面处熔体温度为 $459.91\ \text{K}$, 增长了 6.05% ; 当 $T_{in}=443.15\ \text{K}$ 时, 壁面处温度为 $462.97\ \text{K}$, 增长了 4.47% ; 当 $T_{in}=453.15\ \text{K}$ 时, 壁面处温度为 $466.53\ \text{K}$, 增长 2.87% ; (3) 随着入口温度的升高, 壁面相对中心的温升程度不断减小, 即粘性耗散效应呈现衰减趋势, 这是由于入口温度升高导致熔体分子间距增大, 分子间摩擦阻力减小, 转化的热能减少, 表现为温升降低的现象。为研究管径对温升的影响, 以 $T_{in}=443.15\ \text{K}$ 时的情况为例考查不同半径喷嘴出口的温度分布, 结果如图 7 所示, 可以发现, 随着管径的增加, 熔体从喷嘴中心到壁面的温升 ΔT 不断减小, 但粘性耗散区域相对增大, $r=0.25\ \text{mm}$ 时, $\Delta T=19.82\ \text{K}$; $r=0.3\ \text{mm}$ 时, $\Delta T=15.94\ \text{K}$; $r=0.35\ \text{mm}$ 时,

$\Delta T=12.84$ K, 亦即在喷管入口温度一定时, 喷管半径越小, 壁面处的粘性摩擦阻力越大, 进一步表明微喷管熔体流动过程中的粘性耗散效应不能忽略。

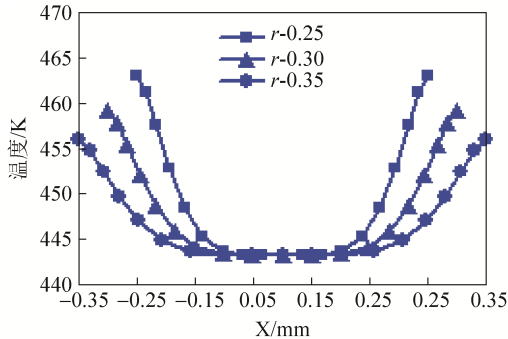


图 7 $T_{in}=443.15$ K, $k=500\ 000$ 时温度随半径分布
Fig. 7 Temperature Varies with Radius under $T_{in}=443.15$ K, $k=500\ 000$

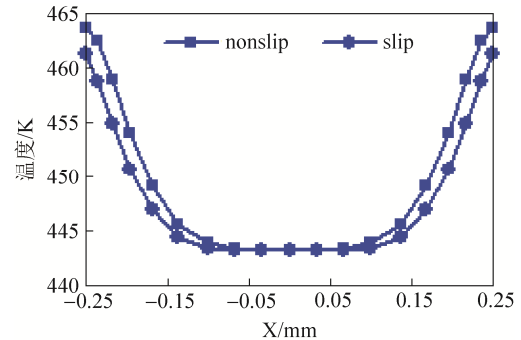
2.3 壁面滑移对粘性耗散的影响

如前所述, 当喷管壁面处熔体相对管中心熔体温升不同时, 表明粘性耗散程度不同, 据此以入口温度 $T_{in}=443.15$ K 为例, 研究无壁面滑移及有壁面滑移($k=300\ 000$)时粘性耗散情况。图 8 为不同管径下有/无壁面滑移时熔体在喷管出口温度分布比较结果。

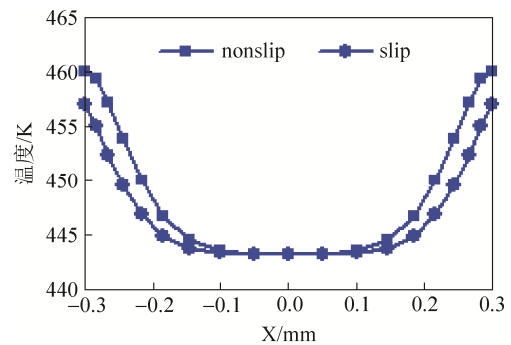
由图 8 可以发现: (1) $r=0.25$ mm 时, 无滑移条件下壁面处温度 $T_{w0}=463.63$ K, 有壁面滑移时温度 $T_{w1}=461.25$ K, 相对减少了 2.38 K; $r=0.3$ mm 时, $T_{w0}=460.07$ K, $T_{w1}=456.97$ K, 相对减少了 3.1 K; $r=0.35$ mm 时, $T_{w0}=457.21$ K, $T_{w1}=453.74$ K, 相对减少了 3.47 K; (2) 沿半径由壁面指向管道中心方向, 有/无壁面滑移时的温差逐渐减小并趋于零; (3) 总体而言, 考虑壁面滑移时, 喷管出口熔体温度会相对降低, 且温降随着管径增大而增大, 这是因为壁面滑移作用部分抵消了近壁面处熔体与壁面间的粘性摩擦力, 使得粘性耗散降低, 表现为考虑滑移情况下近壁面处熔体温度相对于未考虑滑移时低。

另一方面, 熔体温度变化即粘性耗散亦会影响其流变特性, 典型的如流速分布。取不同直径喷管流动的滑移系数均为 $k=500\ 000$ 、入口温度分别为 $T_{in}=433.15$ K, 443.15 K, 453.15 K 时的出口速度,

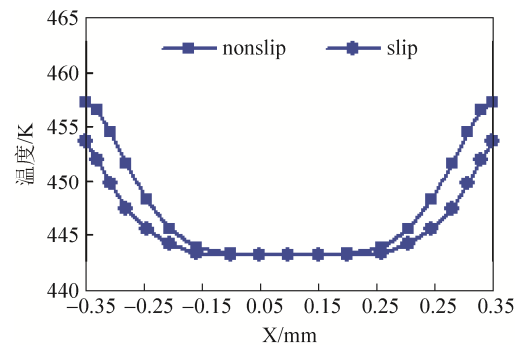
以考查粘性耗散对流速的影响, 结果如图 9 所示, 可见在同一管径下, 随着喷管入口温度的升高(入口流量一定), 管道中心熔体速度增大, 但壁面处速度减小, 滑移程度不断减小, 即滑移程度随入口温度的升高而降低, 这是因为温度升高使中心部分的熔体分子运动速度加快, 但靠近壁面处分子所受粘性摩擦力作用大于温度的影响, 故流速较小。



(a) $r=0.25$ mm



(b) $r=0.3$ mm



(c) $r=0.35$ mm

图 8 不同管径、有/无滑移情况下喷口温度分布
Fig. 8 Temperature Distribution of Nozzle under Various Pipe Diameters with Slip or Nonslip

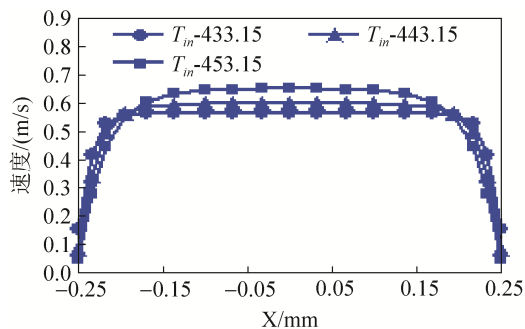
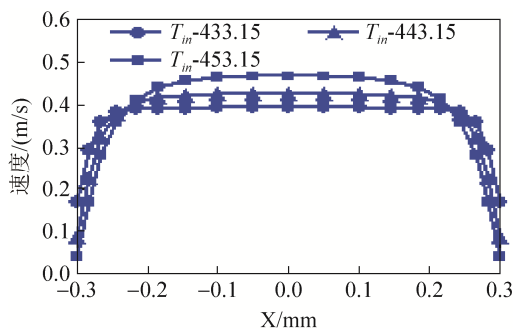
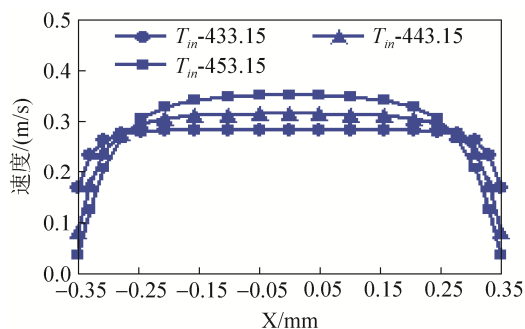
(a) $r=0.25$ mm(b) $r=0.3$ mm(c) $r=0.35$ mm

图 9 不同管径下出口径向速度分布

Fig. 9 Radial Velocity Distribution of Outlet under Various Pipe Diameters

3 结论

(1) 壁面滑移使熔体沿流道径向速度分布趋于均匀, 即径向速度梯度降低, 且滑移程度随着滑移系数的减小而增大。在入口流量、滑移系数和喷管长度相同的条件下, 熔体流速随管径增大而整体减小。

(2) 粘性耗散效应使壁面处熔体温度高于中心温度, 且耗散程度随着喷管入口温度升高而减小。在相同条件下, 喷管近壁面熔体相对管中心处熔体的温升随所选用的喷管半径增大而减小, 即喷

管直径增大, 则耗散程度减小。

(3) 壁面滑移影响粘性耗散效应, 考虑壁面滑移时熔体在壁面处的温度比不考虑壁面滑移时的低, 壁面到中心温度分布相对平缓, 耗散程度降低。

(4) 粘性耗散导致的温升影响熔体沿流道径向的速度分布, 且随着喷管流道入口温度的升高, 熔体在喷管中的粘性耗散程度和滑移程度同时减小。

参考文献:

- [1] 卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D打印)技术发展 [J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(4): 1-4. (Lu B H, Li D C. Development of the additive manufacturing (3D printing) technology [J]. Machine Building and Automation, 2013, 42(4): 1-4.)
- [2] 阳倦成, 张红娜, 李小斌, 等. 黏弹性流体纯弹性不稳定现象研究综述 [J]. 力学进展, 2010, 40(5): 495-516. (Yang J C, Zhang H N, Li X B, et al. Review of purely elastic instabilities in viscoelastic fluids [J]. Advances in Mechanics, 2010, 40(5): 495-516.)
- [3] 于同敏, 庄俭, 王斌, 等. 微注塑成型流动中熔体壁面滑移的研究 [J]. 高分子材料科学与工程, 2007, 23(6): 20-23. (Yu T M, Zhaung J, Wang B, et al. Study on wall slip in micro injection molding flow [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2007, 23(6): 20-23.)
- [4] 傅志红, 罗新桃. 微尺度效应和壁面滑移对微挤出成型的影响分析 [J]. 中国塑料, 2012, 26(6): 112-116. (Fu Z H, Luo X T. Effect of wall slipping and micro-scale effect on micro-extrusion [J]. China Plastics, 2012, 26(6): 112-116.)
- [5] Azese M N. In an attempt to generalize wall slip in fluid flows using a series expansion of the wall shear stress: Case of non-Newtonian [Phan-Thien-Tanner fluid] [J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids (S0997-7546), 2015, 52(7): 109-119.
- [6] 布文峰, 刘志刚, 赵耀华. 微管内部流动粘性耗散的实验研究与数值模拟 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(1): 160-163. (Bu W F, Liu Z G, Zhao Y H. Experimental study and numerical simulation of viscous dissipation effect for flow in microtube [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(1): 160-163.)
- [7] Alves L S B, Barletta A, Hirata S, et al. Effects of viscous dissipation on the convective instability of viscoelastic mixed convection flows in porous media [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer (S0017-9310), 2014, 70: 586-598.

(下转第 1373 页)