

# 微圆管进口区气体流动与换热特性研究

唐桂华 陶文铨 赵长颖

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室; 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要** 对微圆管进口区运用一阶速度滑移和温度跳跃边界, 考察了  $Kn$ 、动量调和及热调和系数对流动与换热特性的影响机理和规律。模拟结果表明: 流动进口段长度随  $Kn$  增加而增加, 但随动量调和系数减小而减小; 热进口段长度随  $Kn$  增加而增加, 但随动量调和系数及热调和系数减小而减小;  $Nu$  数随  $Kn$  增加及热调和系数减小而减小, 但随动量调和系数减小而增加。

**关键词** 微圆管; 速度滑移; 温度跳跃; 进口段

**中图分类号:** TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2008)01-0130-03

## GAS FLOW AND HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS IN THE ENTRANCE REGION OF MICROTUBES

TANG Gui-Hua TAO Wen-Quan ZHAO Chang-Ying

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering; School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract** First order slip velocity and jump temperature boundary conditions are employed to determine the developing flow and heat transfer in the entrance region of a microtube. The influences of the Knudsen number, the momentum accommodation coefficient and the thermal accommodation coefficient are investigated numerically. The results show that the flow developing length increases with the Knudsen number while decreases with the momentum accommodation coefficient; the thermal developing length increases with the Knudsen number while decreases with the momentum accommodation coefficient and the thermal accommodation coefficient; the Nusselt number decreases with the increase in Knudsen number and the thermal accommodation coefficient while increases with the decrease in the momentum accommodation coefficient.

**Key words** microtube; slip velocity; jump temperature; entrance region

## 1 引言

对于微通道速度滑移与温度跳跃区的充分发展段的流动与传热, 简化理论分析逐渐成熟, 但对微通道进口区流动与温度同时处于发展段的理论分析存在难度, 所以, 本文采用数值模拟方法对这一流动区域进行研究分析, 以查明影响微尺度流动与换热的深层机理。

努森数 ( $Kn$ ), 表征气体稀薄程度, 定义为气体分子的平均自由程  $\lambda$  与通道的特征尺度  $L$  之比, 通常分成四个区域, 对于滑移区 ( $0.001 < Kn < 0.1$ ), 一阶速度滑移 / 温度跳跃边界的 N-S 方程依然适用。即, 固体壁面的速度和温度边界具有以下形式<sup>[1]</sup>

$$u_s - u_w = -\frac{2 - \sigma_v}{\sigma_v} \frac{\partial u}{\partial n} \Big|_w \quad (1a)$$

$$T_j - T_w = -\frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T} \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \frac{\lambda}{Pr} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_w \quad (1b)$$

上式中,  $\sigma_v$ ,  $\sigma_T$  分别表示气体分子在壁面处的切向动量调和系数与热调和系数。  $\gamma$  为气体比热容。  $n$  为流体指向固体壁面的法线方向。所研究的微圆管进口来流具有均匀速度  $u_{in}$  与温度  $T_{in}$ , 壁面温度  $T_w$ 。通道长度与圆管直径之比为  $L/D = 5$ , 采用轴对称坐标系, 稳态不可压缩控制方程为<sup>[1]</sup>

$$div(\rho U \phi) = div(\Gamma_\phi grad \phi) + S_\phi \quad (2)$$

对于连续方程、动量方程以及能量方程各符号的含义以及边界条件的处理详见文献 [1]。

## 2 进口段流动场分析

从图 1 及图 2 看到, 进口区速度滑移现象十分严重, 随着流动进入充分发展段, 流动方向滑移速度  $u_s$

收稿日期: 2007-12-06; 修订日期: 2007-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.50406020; No.50576069; No.2006CB601203)

作者简介: 唐桂华 (1974-), 男, 湖南衡阳人, 博士, 主要从事热设计与强化、微尺度流动与换热以及介观方法研究。

逐渐减小并最终维持不变。在充分发展段, 其滑移速度与通道平均速度的比值与分析解  $8Kn/(1+8Kn)$  相符合<sup>[2]</sup>, 滑移速度随  $Kn$  的增加及  $\sigma_v$  的减小而增大。由图 1 及图 2 还可以看到, 随  $Kn$  增大, 流动进口区长度增加。但是随  $\sigma_v$  减小, 虽然滑移速度增加, 但是流动进口区长度却减小, 这说明表征气体稀薄程度的  $Kn$  与表征流体与固体壁面作用的动量调和系数对进口区长度的影响规律是相反的。图 3 表明随  $Kn$  增加及  $\sigma_v$  减小, 流动阻力降低, 速度滑移效应降低了流动阻力从而增加通道流量。同样, 充分发展区的阻力系数与分析解相符合。

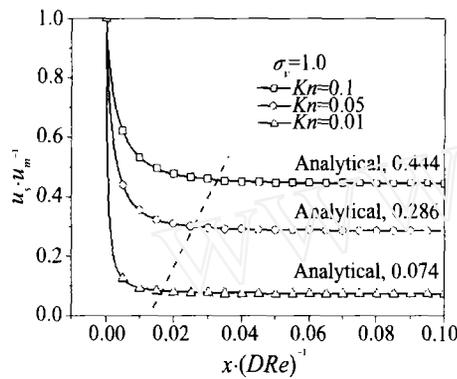


图 1  $Kn$  对滑移速度的影响

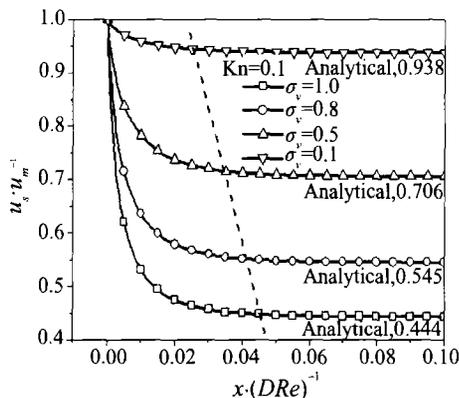


图 2  $\sigma_v$  对滑移速度的影响

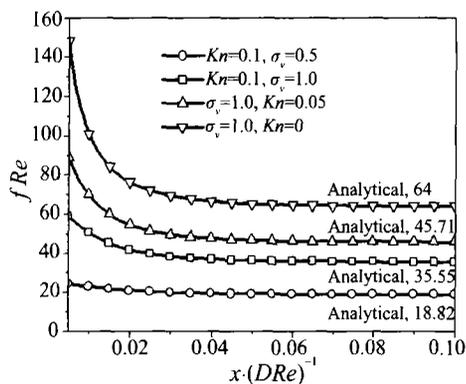


图 3  $Kn$  及  $\sigma_v$  对流动阻力的影响

### 3 进口段温度场及换热分析

从图 4 至图 6 所示的无量纲温度分布可以发

现(图上主流方向位置  $x/(DPe)$  中的 1~4 分别表示  $8.93 \times 10^{-4}$ ,  $1.37 \times 10^{-3}$ ,  $3.16 \times 10^{-2}$ ,  $0.14$ ,  $Pe$  为 Peclet 数), 与相应  $Kn=0$  的温度分布相比, 在稀薄性的影响下, 壁面有温度跳跃, 而靠近通道中心部分的温度降低, 温度分布抛物线曲线变得平坦。随热调和系数  $\sigma_T$  由 1.0 降低到 0.5, 壁面跳跃温度增大, 温度分布抛物线也变得平坦。但动量调和系数对温度分布影响较弱。由图 7 至图 9 可知, 随流动进入热充分发展段, 无量纲跳跃温度逐渐减小并最后维持不变。随  $Kn$  增大, 热进口段长度增加, 其温度跳跃幅度也增大; 随  $\sigma_T$  减小, 虽然温度跳跃增大, 但热进口段长度却减小。  $\sigma_v$  对热进口段长度的影响与对流动进口段长度的影响规律类似, 随  $\sigma_v$  减小, 虽然温度跳跃增大, 但进口段长度却减小。

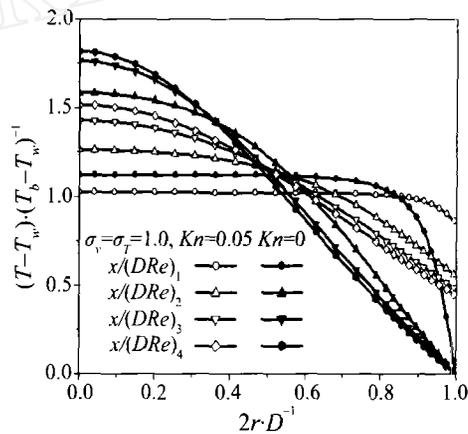


图 4  $Kn$  对温度分布的影响

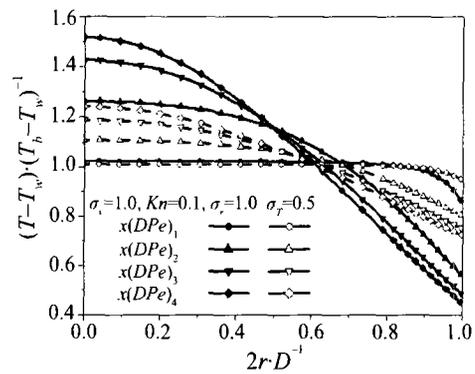


图 5 热调和系数对温度分布的影响

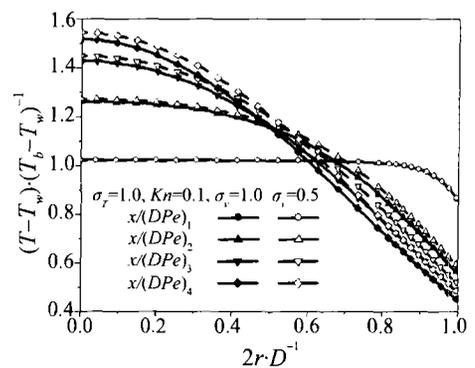


图 6 动量调和系数对温度分布的影响

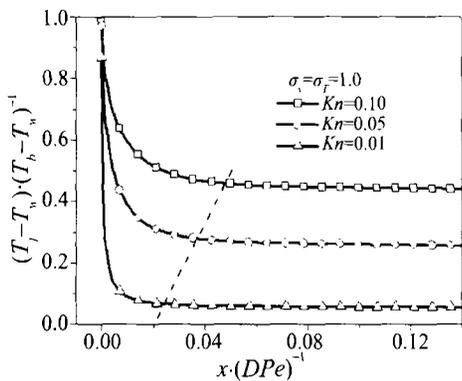


图 7  $Kn$  对跳跃温度的影响

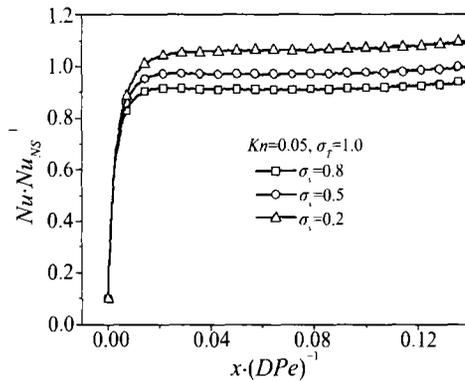


图 11 动量调和系数对  $Nu$  的影响

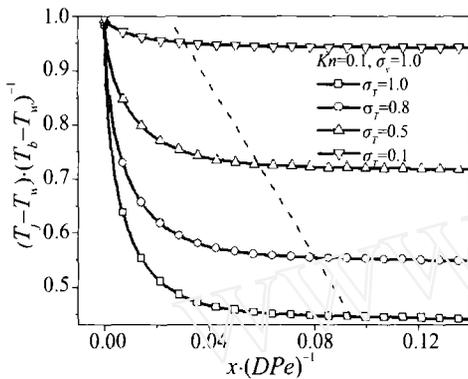


图 8 热调和系数对跳跃温度的影响

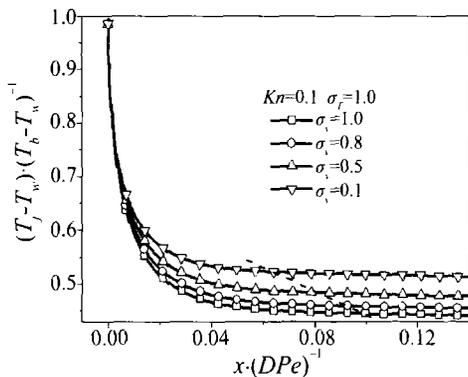


图 9 动量调和系数对跳跃温度的影响

图 10 及 11 表示了滑移工况与无滑移工况的 Nusselt 数比值 ( $Nu/Nu_{NS}$ )。随  $Kn$  增加,  $Nu$  降低, 说明气体稀薄性减弱了对流换热。同样, 随热调和系数  $\sigma_T$  减小,  $Nu$  降低。动量调和系数  $\sigma_v$  的影

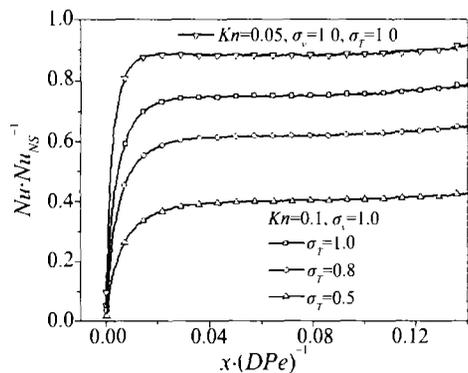


图 10  $Kn$  及热调和系数对  $Nu$  的影响

响与热调和系数相反, 随  $\sigma_v$  降低,  $Nu$  却升高, 但是动量调和系数对换热的影响比较微弱, 从图 11 中可以看到,  $\sigma_v$  由 1.0 降低到 0.5,  $Nu$  变化幅度不如图 10 中所示明显。

由图 5 可知, 减小  $\sigma_T$ , 壁面温度跳跃增大, 相当于在壁面处增加了一层附加热阻, 壁面温度梯度明显减小, 因此能削弱换热; 减小  $\sigma_v$ , 壁面滑移速度增大, 能增强壁面的对流效应, 因此能增强换热, 图 6 表明减小  $\sigma_v$  可使壁面上温度梯度有所增加; 增加  $Kn$ , 速度滑移与温度跳跃都增大, 而由图 6 可见, 速度滑移增加而引起的壁面温度梯度的增加则并不显著, 即由温度跳跃引起的壁面温度梯度减小占主导地位, 由图 4 可以发现, 壁面温度梯度明显减小, 所以  $Nu$  减小。这说明微通道中稀薄气体换热规律不仅与  $Kn$  相关, 而且与动量调和系数以及热调和系数相关。

### 4 结 论

对微圆管进口区流场与温度场进行数值模拟, 获得了如下的进口区气体流动与换热特性:

- (1) 随  $Kn$  增大, 流动进口段长度增加, 但是随  $\sigma_v$  减小, 流动进口段长度减小, 表征气体稀薄程度的  $Kn$  与表征流体与固体壁面相互作用的  $\sigma_v$  对进口区长度的影响规律相反。
- (2) 随  $Kn$  增大, 温度跳跃增加, 热进口段长度增加, 但随  $\sigma_T$  及  $\sigma_v$  减小, 虽然温度跳跃增大, 热进口段长度却减小。
- (3) 随  $Kn$  增加及  $\sigma_T$  减小, Nusselt 数降低, 说明气体稀薄性减弱了对流换热。  $\sigma_v$  对换热的影响与  $\sigma_T$  相反, 随  $\sigma_v$  的降低, Nusselt 数却升高。

### 参 考 文 献

[1] 唐桂华. 微尺度气体流动与换热特性研究及格子 - Boltzmann 方法分析. 西安: 西安交通大学图书馆, 2004  
 [2] Ebert W A, Sparrow E M. Slip Flow in Rectangular and Annular Ducts. Trans ASME, J. Basic. Eng., 1965, 87(4): 1018-1024