

文章编号: 1000-8055(2002) 01-115-07

管内高温介质流动入口段的辐射 与对流耦合换热数值模拟

夏新林^{1,2}, 刘顺隆¹, 马国嵩²

(1. 哈尔滨工程大学 动力与核能工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 将求解辐射传递方程的离散坐标法与求解对流换热的控制容积法相结合, 数值模拟了高温下圆管流动入口段参与性介质的辐射与对流耦合换热。考察了介质光学厚度及管壁温度对温度分布、壁面热流密度及局部努谢尔数分布的影响。结果表明, 高温下介质辐射使介质的温度分布和对流换热状况发生较大改变, 对管内流动入口段的换热起着重要作用。

关键词: 辐射与对流耦合换热; 流动入口段; 离散坐标法; 控制容积法

中图分类号: TK 124

文献标识码: A

Numerical Simulation of the Coupled Radiation and Convection Heat Transfer of a High Temperature Developing Tube Flow

XIA Xin-lin^{1,2}, LIU Shun-long¹, MA Guo-song²

(1. Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The coupled radiation and convection heat transfer of a high temperature participating medium in a tube is investigated by numerical simulation. The medium with constant properties is gray and flows in a developing laminar status. The conservation equations governing the convection heat transfer are discretized by the control volume method (CVM) and solved by the SIMPLEC algorithm. The radiation transfer in medium is solved by the discrete ordinate method (DOM) and its contribution to the coupled heat transfer is dealt with as the source term in the energy equation. With different optical thickness of the medium and different tube wall temperatures, the numerical results of the temperature distribution in medium, the local radiation and convection heat fluxes at wall as well as the corresponding local Nusselt numbers are presented and discussed. The reliability of the numerical results is validated by comparing with the previous investigation and by analyzing the influence of discrete grid number. The results and analysis show that the thermal radiation of high temperature medium plays an important role in the coupled heat transfer of a developing laminar flow in the tube. It has a significant effect on the temperature distribution and influences the convection heat transfer. In addition, the tube wall temperature also influences the actions of radiation and convection in the coupled heat transfer.

收稿日期: 2001- 07- 22; 修订日期: 2001- 09- 27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50076010)

作者简介: 夏新林(1966-), 男, 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院副教授, 博士后。

Key words: coupled radiation and convection; developing flow; the discrete ordinate method; the control volume method

1 引言

管内参与性介质的辐射与对流耦合换热在许多工程技术领域有重要的应用背景和广阔的发展前景。譬如, 高温余热回收、火焰筒燃烧与火箭高焓喷管、高温气冷及其强化, 以及光学波导材料的加工技术等^[1~4]。近年来, 除直接满足工程需要的模拟计算外, 对管内辐射与对流耦合换热过程中的传热机制研究引起了一些学者的兴趣。为集中讨论由于辐射和对流两种热传递方式的耦合而引起的温度场变化及介质与壁面的换热强度变化规律^[1], 这类研究多以层流为对象、并不考虑传热对流动的作用。例如, Chawla 与 Chan (1980)^[5], Baek 与 Yu 等(1999)^[6]、黄勇等(2000)^[7]分别对圆管内充分发展泊肃叶流的辐射与对流耦合换热进行了数值模拟研究; Seo 与 Kaminski 等(1994)^[8]对圆管内非灰混合气体的流动与换热均充分发展时的辐射与对流耦合换热进行了研究; Kamiuto(1995)^[9], Claudio 与 Bakhitier(1996)^[2]则分别研究了非灰气体通道流的辐射与对流耦合换热; Martin 与 Saltie 等(1998)^[10]分析了利用高空隙率半透明纤维材料的辐射作用来强化管内换热的效果。最近, Viskanta (1998)^[11], Rouse (2000) 等^[11, 12]对研究辐射与对流耦合换热问题所采用的各种辐射传递模型和求解方法作了分析介绍。除区域法和蒙特卡洛法外, 考虑到与对流换热求解的耦合, 离散坐标法是目前应用较普遍的辐射传递求解方法。

本文将求解辐射传递方程的离散坐标法与求解对流换热的控制容积法相结合, 通过数值模拟, 研究高温下圆管流动入口段常物性参与性介质的辐射与对流耦合换热。当介质的物性保持恒定时, 辐射与对流两种传热方式的耦合是通过温度场的变化而实现的。本文考察了不同的介质光学厚度和管壁温度下, 辐射作用对介质内的温度分布及换热状况的影响。

2 物理模型与控制方程

如图 1 所示, 常物性、不可压缩牛顿流体以均匀流速 u_m 、均匀温度 T_m 进入壁温均匀恒定为 T_w 的直圆管。该流体为吸收、发射性参与介质, 因此流体内部及流体与管壁换热为辐射与对流的耦合

换热。假设管内流动为轴对称层流, 不考虑体积

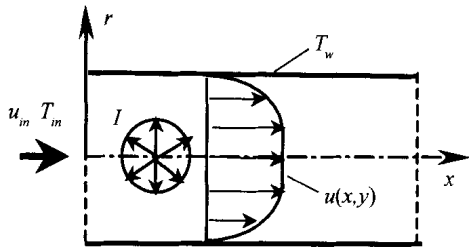


图 1 物理模型与坐标系

Fig. 1 Physical model and coordinate system
力作用。在圆柱坐标系下, 参与性流体介质内的辐射与对流稳态耦合换热控制方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial (rv)}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

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

$$\rho \left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial r} \right] = - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \frac{v}{r^2} \right] \quad (3)$$

$$\rho c_p \left[u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial r} \right] = \lambda \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + Q_v' \quad (4)$$

其中: u, v 分别为轴向和径向速度分量; p, T 分别是压力和绝对温度; ρ, c_p, μ 和 λ 分别为介质的密度、比热、动力粘度和导热系数; Q_v' 是辐射换热源项。

$$Q_v' = k_a \left[\int_{4\pi} I d\Omega - 4\sigma T^4 \right] \quad (5)$$

式中: I 是介质内沿 Ω 方向的辐射强度, σ 和 k_a 分别为黑体辐射常数和介质的吸收系数。介质辐射强度 I 通过求解下面的辐射传递方程确定。

$$\frac{\chi}{r} \frac{\partial (rI)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial (\eta I)}{\partial \varphi} + \xi \frac{\partial I}{\partial \chi} = -\beta I + k_s \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{k_s}{4\pi} \int_{\Omega'} P(\Omega' \rightarrow \Omega) I d\Omega' \quad (6)$$

式中: β 和 k_s 分别为介质的衰减系数和散射系数, $\beta = k_a + k_s$; (χ, η, ξ) 是确定辐射传递方向的局部坐标系, 如图 2 所示。在该坐标系中, 辐射传递方

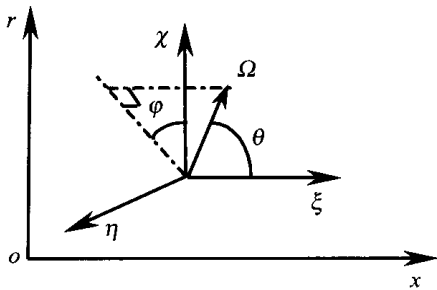


图 2 系统坐标和局部坐标的组合方式

Fig.2 Systemic coordinate and local coordinate

向 Ω 的极角和方位角分别为 θ 和 φ , $\chi = \sin\theta\cos\varphi$, $\eta = \sin\theta\sin\varphi$, $\xi = \cos\theta$ 。

3 数值求解

3.1 辐射传递方程的求解

采用离散坐标法的 S-4 模型求解辐射传递方程。整个 4π 空间总共可以离散为 $4 \times (4 + 2)$ 个方向, 考虑到圆周方向无变化, 即 η 方向的对称性, 可离散为 12 个方向。(6) 式中的积分项可以表示为:

$$\int_{\Omega'} P(\Omega' \rightarrow \Omega) I d\Omega' = \sum_{j=1}^{12} P(j \rightarrow i) W_j I_j \quad (7)$$

对辐射角分布项进行处理后^[13], 由(6) 式得到如下形式的离散坐标方程:

$$\frac{\chi}{r} \frac{\partial (r I_i)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\alpha_{+1/2} I_{i+1/2} - \alpha_{-1/2} I_{i-1/2}}{W_i} + \xi_i \frac{\partial I_i}{\partial x} = -\beta I_i + \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{k_s}{4\pi} \cdot \sum_{j=1}^{12} P(j \rightarrow i) W_j I_j \quad (8)$$

式中, χ , ξ_i 和 W_i 的取值如表 1 所示。 $I_{i-1/2}$ 和 $I_{i+1/2}$ 分别为上一个离散方向和下一个离散方向与本离散方向界面间的辐射强度值, 系数 $\alpha_{+1/2}$ 有如下递推关系:

$$\alpha_{+1/2} - \alpha_{-1/2} = W_i \mu_i \quad (i = 1, \cdots, 12) \quad (9)$$

对控制容积进行积分, 并且利用关系式:

$$\begin{aligned} I_i &= f I_i^e + (1 - f_r) I_i^s = \\ &= f_x I_i^{xe} + (1 - f_x) I_i^{xs} = \\ &= f_\mu I_{i+1/2} + (1 - f_\mu) I_{i-1/2} \end{aligned} \quad (10)$$

将控制方程中下游界面的辐射强度值消去, 进行迭代计算。上标 e 表示控制容积下游界面的值, 上标 s 表示控制容积上游界面的值。 f_r , f_x 和 f_μ 为系数, 取值为 $[0.5, 1]$ 。计算过程中, 由(10)

式计算下游的辐射强度可能得到负值, 这时取下游值辐射强度为零, 重新计算节点的辐射强度。

表 1 S-4 模型的离散方向

Table 1 Ordinate directions for the S-4 model

<i>i</i>	ξ_i	χ_i	W_i
1	- 0.9082	- 0.2959	$\pi/3$
2	- 0.9082	0.2959	$\pi/3$
3	- 0.2959	- 0.9082	$\pi/3$
4	- 0.2959	- 0.2959	$\pi/3$
5	- 0.2959	0.2959	$\pi/3$
6	- 0.2959	0.9082	$\pi/3$
7	0.2959	- 0.9082	$\pi/3$
8	0.2959	- 0.2959	$\pi/3$
9	0.2959	- 0.2959	$\pi/3$
10	0.2959	0.9082	$\pi/3$
11	0.9082	- 0.2959	$\pi/3$
12	0.9082	0.2959	$\pi/3$

3.2 流场与温度场的求解

采用 SIMPLEC 算法求解连续方程、动量方程和能量方程。引入通用变量 Φ 及广义扩散系数 Γ 和广义源项 S 来代表各守恒方程中的变量及相应的系数, 将 (1) ~ (4) 式表示成下面的通用形式:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u \Phi \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho v \Phi \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + S \quad (11)$$

其中, 源项 $S = S^C + S^P \Phi$ 。

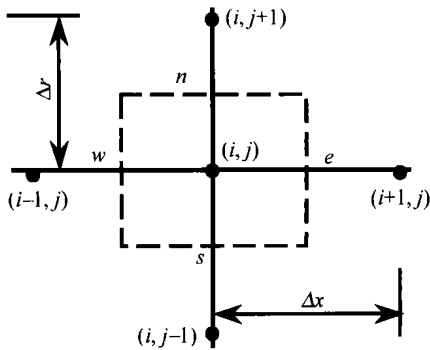


图 3 节点与控制容积

Fig.3 Nodes and the control volume

采用交错网格系统和控制容积法离散守恒方程。如图 3 所示, 符号 i, j 表示节点在 x, r 方向的序号, e, w, n 和 s 分别表示节点的控制容积与相

邻控制容积的 4 个界面。

采用上风方案处理对流输运项,通用方程式 (11) 离散为:

$$a_{i,j}^P \Phi_{i,j} = a_{i,j}^E \Phi_{i+1,j} + a_{i,j}^W \Phi_{i-1,j} + a_{i,j}^N \Phi_{i,j+1} + a_{i,j}^S \Phi_{i,j-1} + S_{i,j}^C \quad (12)$$

其中:系数 $a_{i,j}^P = a_{i,j}^E + a_{i,j}^W + a_{i,j}^N + a_{i,j}^S - S_{i,j}^P \Delta V$, 其它有关系数的表达式可见参考文献[14]。

3.3 迭代方法与边界处理

采用求解压力耦合方程的半隐式方法结合交错网格计算管内流动入口段的速度场。在获得速度场后,耦合求解能量方程和辐射传递方程,以获得温度场。求解速度场、温度场时的入口截面、管壁面及管中心轴线处的边界条件为:

$x = 0$
 $u = u_{in} , v = 0 ; T = T_{in} , \epsilon = 1$
 $0 < x < L$
 $r = \frac{D}{2} , u = 0 , v = 0 , T = T_w , \epsilon = 1$
 $r = 0 , \frac{\partial u}{\partial r} = 0 , v = 0 , \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (13)$

对出口截面($x = L$),取压力 $P = 0$ 、黑度 $\epsilon = 1$,并令离散方程中的系数 $a_{M,j}^E = 0$ (M 为出口截面节点的轴向序号)。代数方程的求解采用 ADI 逐行迭代与单块修正技术,各类变量的代数方程反复求解多次,以照顾到它们之间的耦合关系。

4 计算结果及分析

4.1 结果比较与离散网格数的影响

首先计算管内充分发展流的耦合换热,与参

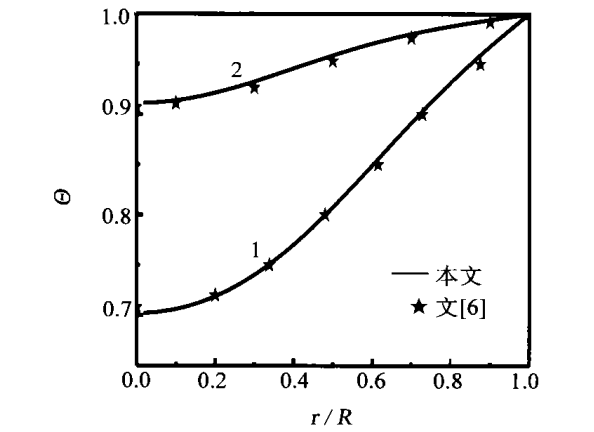


图 4 $x/D = 5$ 处管截面的无量纲温度分布
曲线 1— $N = 0.1$, 2— $N = 0.02$

Fig.4 Dimensionless temperature profile
for $x/D = 5$ section

考文献[6] 结果比较,然后分析离散网格数对管内流动入口段耦合换热计算结果的影响。定义径向无量纲温度 $\Theta = T(x, r) / T_w$ 和管截面平均无量

$$\text{纲温度 } \bar{\Theta} = \frac{\int \rho c u \Theta dr}{\int \rho c u dr}$$

图 4 和图 5 分别给出了 Θ 和 $\bar{\Theta}$ 的结果比较。计算参数为 $D = 0.1 \text{ m}$, $\beta = 5 \text{ m}^{-1}$, $\rho = 2.0 \text{ kg/m}^3$, $T_{in} = 600 \text{ K}$, $T_w = 1000 \text{ K}$, $P_e = Re \cdot Pr = 200$ 。由图 4 和图 5 可以看出,本文结果与参考文献[6] 吻合很好。另外,导热辐射参数 N 对温度场有很大影响。随着 N 的减小,介质的辐射作用增强,截面内温度分布变得平坦(图 4 中曲线 2 与曲线 1 相比),而平均温度迅速接近管壁温度(图 5 中曲线 2 与曲线 1 相比)。

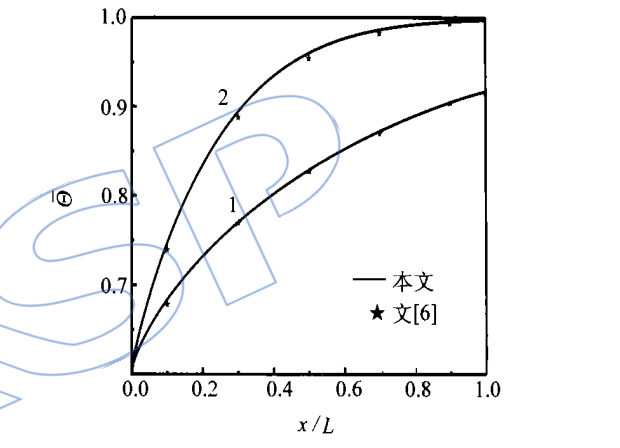


图 5 截面平均无量纲温度的轴向分布
曲线 1— $N = 0.1$, 2— $N = 0.02$

Fig.5 Axial distribution of dimensionless
section-averaged temperature

表 2 给出了离散网格数对管内流动入口段耦合换热中的对流换热努谢尔数 Nu_c 和辐射换热努谢尔数 Nu_r 计算结果的影响。

表 2 离散网格数对 Nu_c 和 Nu_r 计算结果的影响
Table 2 Effect of grid number on the results
of Nu_c and Nu_r

网格数 ($x \times r$)	$x/D = 5$		$x/D = 10$		$x/D = 15$	
	Nu_c	Nu_r	Nu_c	Nu_r	Nu_c	Nu_r
120×30	5.62	2.33	4.26	1.695	3.68	1.439
60×20	5.71	2.35	4.34	1.692	3.75	1.438

Nu_c 和 Nu_r 定义为:

$$Nu_c = \frac{q_{wc} D}{\lambda(T_w - T_m)} , \quad Nu_r = \frac{q_{wr} D}{\lambda(T_w - T_m)}$$

式中: T_m 为截面平均温度, $q_{wc} = -\lambda(\partial T/\partial r)|_{r=R}$ 和 $q_{wr} = \sum \mu_i W_i I_i$ 分别为壁面的对流换热和辐射换热热流密度。由数据比较可知, 采用 120×30 和 60×20 两种离散网格数时, 两者 Nu_c 的相对误差小于 2%, Nu_r 的相对误差小于 1%。下面的计算中, 采用 120×30 的网格。

4.2 介质光学厚度对流动入口段耦合换热的影响

由于参与性介质辐射换热的容积性, 其光学厚度反映了一定温度下介质的辐射换热能力。图 6 是介质光学厚度不同时, 管截面的平均温度轴向分布; 图 7 给出了光学厚度对壁面处对流换热和辐射换热热流密度的影响。计算中, 参数 $D = 0.1 \text{ m}$, $L = 3.0 \text{ m}$, $T_{in} = 2000 \text{ K}$, $T_w = 1000 \text{ K}$, $\rho = 0.5 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 0.4 \times 10^{-4} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$, $c_p = 1200 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$, $\lambda = 0.12 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, $u_{in} = 2.0 \text{ m/s}$ 保持不变。

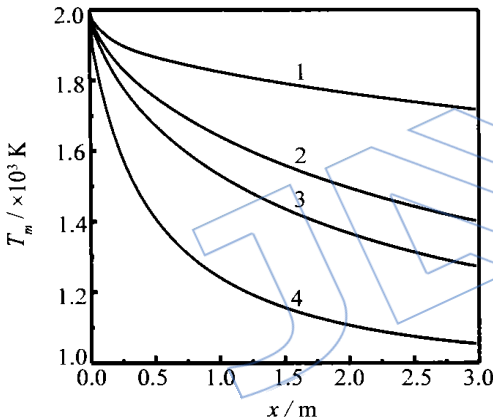


图 6 介质光学厚度对截面平均温度的影响
Fig. 6 Effect of medium optical thickness on section-averaged temperature 1—no radiation 2— $\tau_D = 0.05$ 3— $\tau_D = 0.1$ 4— $\tau_D = 0.5$

随着介质光学厚度的增大, 辐射换热增强, 由于其作用的全场性, 入口处高温介质通过辐射方式迅速向管壁和下游介质释放热量, 使介质温度沿流程迅速降低。当光学厚度 $\tau_D = 0.5$ 时, 出口截面 (30 倍管径) 的平均温度已接近壁温 (图 6 中曲线 4), 而在其它条件相同情况下, 单纯的对流换热使出口截面的平均温度下降幅度要小得多 (图 6 中曲线 1)。介质的光学厚度不同时, 耦合换热中的对流和辐射两种传热方式所起的作用有很大区别。介质光学厚度较大时, 管截面的温度梯度减小, 会抑制径向的对流换热。如当介质光学厚度

$\tau_D = 0.05$ 时, 整个流动入口段的壁面对流换热热流密度都远大于壁面辐射换热热流密度 (图 7 中

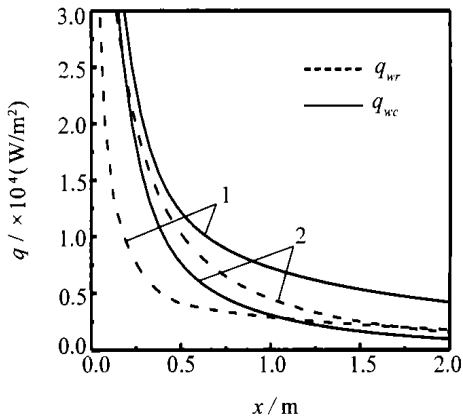


图 7 介质光学厚度对壁面对流与辐射换热热流密度的影响

Fig. 7 Effect of medium optical thickness on convective and radiative heat fluxes at wall

1— $\tau_D = 0.05$ 2— $\tau_D = 0.5$

曲线 1); 而当 $\tau_D = 0.5$ 时, 除入口处附近 (约 3 倍管径) 外, 壁面对流换热热流密度小于壁面的辐射换热热流密度 (图 7 中曲线 2)。

4.3 管壁温度对流动入口段耦合换热的影响

管壁温度对耦合换热中辐射与对流两种传热方式的影响不同, 图 8~图 10 分别给出了管壁温度不同时, 壁面的局部热流密度、局部努谢尔数分布以及对流努谢尔数与辐射努谢尔数的对比情况。计算参数为: $D = 0.1 \text{ m}$, $L = 2.0 \text{ m}$, $T_{in} = 2000 \text{ K}$, $\rho = 2.0 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 0.4 \times 10^{-4} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$, $\beta = 2.0 \text{ m}^{-1}$, $c_p = 1200 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$, $\lambda = 0.12 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, $u_{in} = 1.0 \text{ m/s}$ 。图 8 中, $q_{wt} = q_{wc} + q_{wr}$ 是壁面的耦合换热热流密度。由图 8 可以看出, 当管壁温度 $T_w = 900 \text{ K}$ 时, 耦合换热中的壁面对流换热热流密度 q_{wc} 大于辐射换热热流密度 q_{wr} ; 尽管流动状况、介质物性、光学厚度以及入口温度均保持不变, 但当管壁温度升高为 $T_w = 1300 \text{ K}$ 时, 入口段的 q_{wc} 著降低, 已明显小于 q_{wr} 。从局部努谢尔数的变化看, T_w 升高使 Nu_c 略微减小, 而使 Nu_r 显著升高 (图 9)。图 10 则显示出, 当 $T_w = 900 \text{ K}$ 时, 除入口附近的很小区域外 (约为 2.5 倍管径), 流动入口段的 Nu_c/Nu_r 由 1.3 缓慢下降为 1.25; 当 T_w 升高为 1300 K 时, Nu_c/Nu_r 由 0.8 下降至 0.5 以下。

管壁温度对耦合换热的这种影响, 是由于辐射换热主要取决于介质的平均温度, 而对流换热取决于壁面处的温度梯度。当管壁温度提高时, 管

内介质的整体温度相应提高,辐射换热作用增强

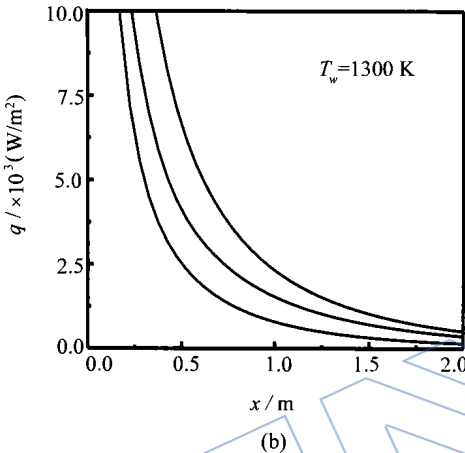
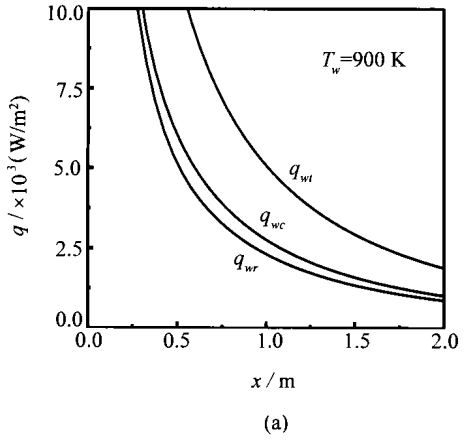


图 8 管壁温度对壁面对流和辐射换热热流密度的影响

Fig.8 Effect of tube wall temperature on convective and radiative heat fluxes at wall

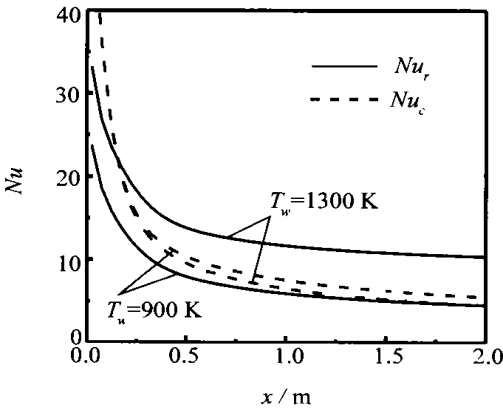


图 9 Nu_c 和 Nu_r 的轴向分布

Fig.9 Axial distributions of Nu_c and Nu_r

(Nu_r 升高), 使径向温度分布更加平坦, 导致对流换热作用减弱(Nu_c 减小)。从总的效果看, 管壁温

度提高使耦合换热的努谢尔数($Nu_c + Nu_r$) 升高,

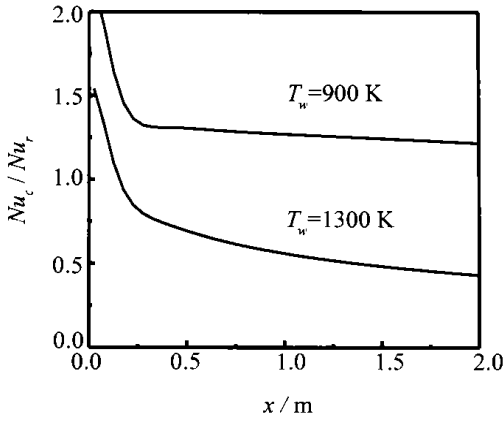


图 10 管壁温度对 Nu_c / Nu_r 的影响

Fig.10 Effect of wall temperature on Nu_c / Nu_r

但总的壁面热流密度($q_{wc} + q_w$) 减小。

5 结 论

将离散坐标法与控制容积法相结合来数值模拟高温下圆管流动入口段的辐射与对流耦合换热, 结果可靠、精度较高。通过分析具体的模拟结果, 得出以下几点结论:

- (1) 辐射换热加速了管内介质温度场的发展, 层流时, $\tau_{0.5} = 0.05$ 的介质光学厚度即可使温度场的发展发生很大的变化。
- (2) 随介质光学厚度的增大, 耦合换热中的对流作用被抑制而辐射作用增强。介质光学厚度为 0.05 时的对流换热作用比辐射换热作用大得多; 而光学厚度为 0.5 时的对流换热作用已明显小于辐射换热作用。
- (3) 管壁温度对耦合换热中两种传热方式的作用也有很大影响。层流时, 在 $\tau_{0.5} = 0.2$ 的条件下, 管壁温度为 900 K 时的 Nu_c 约为 Nu_r 的 1.3 倍, 而管壁温度为 1300 K 时的 Nu_c 约为 Nu_r 的 50%~80%。

参考文献:

[1] Viskanta R. Overview of Convection and Radiation in High Temperature Gas Flows[J]. Int. J. Engineering Science, 1998, 36: 1667- 1699.

[2] Claudio M. Bakhitier F. Convection - Non-gray Gas Radiation Interactions in a Channel Flow[J]. ASME HTD - 325(3): 103- 113, 1996.

[3] Anghaie S, Chen G. A Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer Model for Gaseous Core and Very High Temperature Gas-Cooled Reactors[J]. Nuclear Science and

Engineering, 1998, 130: 361– 373.

[4] Park S H, Kim S S. Thermophoretic Deposition of Absorbing, Emitting and Isotropically Scattering Particles in Laminar Tube Flow with High Particle Mass Loading [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1993, 36(14): 3477– 3485.

[5] Chawla T C, Chan S H. Combined Radiation and Convection in Thermally Developing Poiseuille Flow with Scattering [J]. ASME J. Heat Transfer, 1980, 102(2): 297– 302.

[6] Baek S W, Yu M J, Kim T Y. Thermally Developing Poiseuille Flow Affected by Radiation [J]. Numerical Heat Transfer, Part A, 1999, 35: 681– 694.

[7] 黄勇, 夏新林, 谈和平, 刘林华. 辐射对圆管内非散射性半透明流体的层流对流换热影响 [R]. 济南: 中国工程热物理学会传热传质学术会议, No. 20003091, 2000.

[8] Seo T, Kaminski D A, Tensen M K. Combined Convection and Radiation in Simultaneously Developing Flow and Heat Transfer with Nongray Gas Mixtures [J]. Numerical Heat Transfer, 1994, Part A, 26: 49– 66.

[9] Kamiuto K. Combined Laminar Forced Convection and Nongray – Radiation Heat Transfer to Carbon Dioxide Flowing in a Nonblack, Plane-Parallel Duct [J]. Numerical Heat Transfer, 1995, Part A, 28: 575– 587.

[10] Martin A R, Saltiel C, Chai J, Shyy W. Convective and Radiative Internal Heat Transfer Augmentation with Fiber Arrays [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1998, 41: 3431– 3440.

[11] Rouse D R. Numerical Predictions of Two-Dimensional Conduction, Convection, and Radiation Heat Transfer. 1. Formulation [J]. Int. J. Therm. Sci., 2000, 39: 315– 331.

[12] Rouse D R, Gautier G, Sacadura J F. Numerical Predictions of Two-Dimensional Conduction, Convection, and Radiation Heat Transfer. 2. Validation [J]. Int. J. Therm. Sci., 2000, 39: 332– 353.

[13] Howell L H, Beckner V E. Discrete Ordinates Algorithm for Domains with Embedded Boundaries [J]. AIAA J. Thermophysics and Heat Transfer, 1997, 11(3): 549– 555.

[14] 帕坦卡 S V. 传热与流体流动的数值计算 [M]. 张政, 译. 北京: 科学出版社, 1992.

(责任编辑 吴一黄)