

# 辐射通道一维稳态温度场数值模拟

韩家德<sup>1</sup>, 路义萍<sup>1</sup>, 张培亭<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨理工大学 机械动力工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 黑龙江省特种设备检验研究所, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘 要:**为得到辐射对流通道中的温度分布, 依据能量守恒原理, 建立了辐射、对流非线性边界条件下圆形管壁与管内空气的传热数学模型, 提出了管壁温度、管内冷却空气温度一维稳态换热有限差分求解方法, 其中辐射换热计算采用基于辐射传递系数的蒙特卡罗法。分析了相关参数对辐射通道温度分布的影响, 所研究的参数包括辐射器表面温度、管道长度与半径比、管内冷却空气流速等。计算结果表明: 辐射器表面温度是影响辐射通道最高温度的主要因素。此方法可为辐射通道精细的热工特性计算提供温度场数据。

**关 键 词:** 辐射传热; 有限差分法; 数值模拟; 温度场

中图分类号: TK124 文献标识码: A

## 1 引 言

在传统的工业设备中, 有很多相同的传热问题, 通道的能量传递就是其中之一。最简单的如炉门的热损失, 复杂一些的如辐射管的热传递、各种航天发动机尾部喷管内的辐射对流等热交换。工程设计或运行时, 都要计算通道的总传递能量、壁面温度等参数, 现在已有成熟的计算方法<sup>[1]</sup>。近年来出现不少新产品, 在设计中要求计算出更精细的数据, 于是发展了一些新的数值计算方法<sup>[2~3]</sup>, 它们都结合产品的特点和工程技术的要求, 作了一些特定的简化。本文针对燃气加热设备辐射定向管能量传递计算时, 需要提供管口辐射能量分布的要求<sup>[4]</sup>, 提出了一种更精细的计算通道温度分布的方法。此方法可进一步减少过去的假设条件, 更逼近真实情况, 添加新参数, 可模拟计算出更精细的产品的热工特性。

## 2 物理模型

通道为圆管, 如图 1 所示。燃气辐射器位于右端面附近, 本模型将其转化为位于右端面处的等温黑体辐射源假想面, 其温度为  $T_{bm}$ , 部分能量直接逸出管出口, 部分能量通过辐射方式将热量传递给管

内壁。管外壁绝热, 管壁内沿轴向以导热方式将热量由右端面传向左端面, 空气以平均流速  $u$  由左端面流入, 右端面流出, 以对流换热方式冷却管壁, 带走部分热量。控制其流量与入口温度, 便可控制管壁的温度分布。控制管壁温, 一方面可控制管壁的寿命, 另一方面也可控制管出口的辐射能量的方向分布。已知管内半径  $R$ , 管长  $L$ , 管壁内表面发射率  $\epsilon$ , 空气平均流速  $u$ , 空气入口温度  $T_{i, in}$ , 黑体辐射源假想面温度  $T_{bm}$ 。求证管壁及管内空气的温度分布。假设管内壁为灰体, 左端面处射入管内的投入辐射忽略不计。本文中圆管采用金属管, 由于管壁较薄, 导热系数  $\lambda$  比较大, 可假设管壁径向温度相同, 即管壁温度为轴向一维分布。于是该类问题可简化为在辐射与对流复合换热条件下, 稳态管内空气截面平均温度与管壁温的计算。

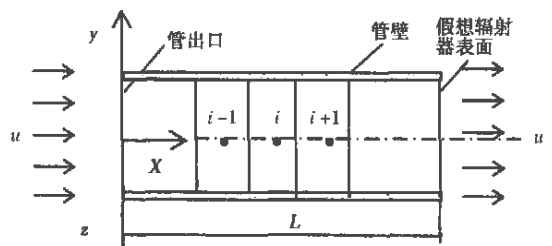


图 1 辐射器与圆管系统温度场示意图

## 3 数学模型

### 3.1 管壁能量平衡微分方程

沿管长方向把管与空气划分为  $N$  等份, 如图 1 所示。对管壁单元  $i$ , 可列出一维稳态能量平衡方程为<sup>[5~8]</sup>:

收稿日期: 2005-02-05; 修订日期: 2005-04-11

基金项目: 黑龙江省教育厅科学研究基金资助项目(10541048); 黑龙江省自然科学基金资助项目(E2004-21)

作者简介: 韩家德(1965-)男, 辽宁瓦房店人, 哈尔滨理工大学副教授。

$$\sum Q_{i,r,in}^w - Q_{i,r,out}^w + Q_{i,cd,in}^w - Q_{i,cd,out}^w - S_{i,w-f} = 0 \quad (1)$$

式中:  $\sum Q_{i,r,in}^w$ —所有单元  $i$  投射到管壁单元并被吸收的辐射能;  $Q_{i,r,out}^w$ —单元  $i$  壁面发射出去的辐射能;  $Q_{i,cd,in}^w$ 、 $Q_{i,cd,out}^w$ —导入、导出能量;  $S_{i,w-f}$ —冷空气对流带走的能量。各表达式如下:

$$\sum Q_{i,r,in}^w = \sum_{k=1}^{i-2} \varepsilon \sigma^{\circ} A_s (T_{w,k}^{(n+1)})^4 RD_{k,i} + \sum_{k=i+2}^N \varepsilon \sigma^{\circ} A_s (T_{w,k}^{(n)})^4 \circ RD_{k,i} + \varepsilon \sigma^{\circ} A_s (T_{w,i-1}^{(n+1)})^4 \circ RD_{i-1,i} + \varepsilon \sigma^{\circ} A_s (T_{w,i+1}^{(n)})^4 RD_{i+1,i} + \varepsilon \sigma^{\circ} A_s (T_{w,i}^{(n)})^4 \circ RD_{i,i} + \varepsilon_{bn} \sigma^{\circ} A_{bn} T_{bn}^4 RD_{N+1,i} \quad (2)$$

$$Q_{i,r,out}^w = (1 - RD_{i,i}) \varepsilon A_s \sigma (T_{w,i}^{(n)})^4 \quad (3)$$

$$Q_{i,cd,in}^w - Q_{i,cd,out}^w = \lambda_w A^{\circ} \left( \frac{T_{w,i+1}^{(n)} - T_{w,i}^{(n)}}{\Delta x} \right) - \lambda_w A \left( \frac{T_{w,i}^{(n)} - T_{w,i-1}^{(n+1)}}{\Delta x} \right) \quad (4)$$

$$S_{i,w-f} = h_{i,s} A_s (T_{w,i}^{(n)} - T_{f,i}) \quad (5)$$

式中:  $w$ —管壁;  $i$ —管壁单元标号;  $f$ —流体; 黑体辐射源的发射面积  $A_{bn} = \pi R^2$ 。算例中, 导热系数随温度线性变化;  $A$ 、 $A_s$ —管壁  $i$  单元环形面积、内侧表面积,  $A = \pi(R_0^2 - R^2)$ ,  $A_s = 2\pi R \Delta x$ , 见图 1;  $h_{i,s}$ —管壁  $i$  单元内表面的局部对流换热表面传热系数;  $T_{w,i}^{(n)}$ —管壁  $i$  单元的第  $n$  次迭代值;  $T_{f,i}$ —与管壁  $i$  单元对应的空气单元温度;  $\Delta x$ —单元体长度,  $\Delta x = 0.002 \text{ m}$ 。辐射分布系数  $RD_{i,j}$  表示  $i$  单元发射辐射能被  $j$  单元吸收的百分率。管壁内的一维传热方程可表示为:

$$\frac{d}{dx} (\lambda_w \frac{dT_w}{dx}) + \frac{(S_r + S_c)}{\pi(R_0^2 - R^2)} = 0 \quad (6)$$

其中中心差分格式的差分方程形式为:

$$\lambda_w A \left( \frac{T_{w,i+1} - T_{w,i}}{\Delta x} \right) - \lambda_w A \left( \frac{T_{w,i} - T_{w,i-1}}{\Delta x} \right) + S_{r,i} + S_{c,i} = 0 \quad (7)$$

利用式(2)~式(5)可得任意壁面单元  $i$  的辐射与对流源项  $S_{r,i}$ 、 $S_{c,i}$ 。

### 3.2 管内空气能量平衡微分方程

与管壁相对应, 空气分成  $N$  个单元, 任意单元沿管轴线方向的一维稳态能量平衡方程为:

$$Q_{i,et,in}^f - Q_{i,et,out}^f + Q_{i,cd,in}^f - Q_{i,cd,out}^f + S_{i,w-f} = 0 \quad (8)$$

式中:  $Q_{i,et,in}^f$ 、 $Q_{i,et,out}^f$ 、 $Q_{i,cd,in}^f$  和  $Q_{i,cd,out}^f$ —随空气流进、流出单元体的流体焓, 以导热方式导入、导出单

元体的热量;  $S_{i,w-f}$ —空气单元与相对应的管壁单元之间的对流换热热量。由于空气为透热体, 不考虑空气辐射。

管壁内空气单元的一维对流扩散方程可表示为:

$$\frac{d}{dx} (\rho_f u c_f T_f) = \frac{d}{dx} (\lambda_f \frac{dT_f}{dx}) + \frac{S_c}{\pi R^2} \quad (9)$$

### 3.3 对流换热表面传热系数计算

由于空气温度变化较小, 空气的物性参数在计算过程中当常数处理, 定向反射管的管径为常数, 内径  $R = 0.005 \text{ m}$ , 经计算, 当管内空气流速  $u$  大于  $4 \text{ m/s}$ , 圆管内的流动属于紊流。由于管子较短 ( $L/R \leq 20$ ), 对流换热表面传热系数  $h_{i,s}$  采用局部换热系数公式计算, 见文献[9]。

管内为强制对流, 管端左、右侧面元处空间大, 流速较低, 空气对流换热表面传热系数  $h$  设为常数, 取空气强制对流换热系数的下限  $20 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ 。

### 3.4 数值求解

通过上述方程可看出: 在计算壁温时, 其边界是辐射与对流换热, 所以是非线性的边界条件; 计算气体温度时, 边界是壁面, 而壁面温度是非线性的, 所以也是非线性边界条件。前一个计算中需要知道后一个计算中的空气平均温度, 而后一个计算中又必须要知道前一个计算中给出的壁面温度, 所以这两个计算是耦合的, 增加了计算的复杂性。

式(2)和式(3)辐射换热计算中, 辐射传递系数  $RD_{i,j}$  采用蒙特卡罗法模拟, 计算公式为:

$$RD_{ij} = N_j / N_i \quad (10)$$

式中:  $N_i = 1 \times 10^7$ —管壁  $i$  单元发射的能束总数;  $N_{ij}$ — $i$  单元发射被  $j$  单元吸收的能束数目<sup>[9]</sup>。

管壁单元采用中心差分格式离散化, 空气单元采用逆风差分格式离散化, 离散化后的方程式(1)和式(8)按下式形式整理:

$$bT_{i-1} + dT_i + aT_{i+1} = c \quad (11)$$

采用 TDMA 算法<sup>[10]</sup>, 首先消元, 然后回代求解, 相对偏差取 0.001, 直到收敛为止。式中:  $b$ 、 $d$ 、 $a$ 、 $c$  为系数。

## 4 算例及其分析

管材选不锈钢(AISI304), 300 K 时, 导热系数  $\lambda = 14.9 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ , 管内壁  $\varepsilon$  取 0.2, 管内半径  $R = 0.005 \text{ m}$ , 壁厚  $\delta = 0.002 \text{ m}$ ,  $L/R = 4, 10, 20$ 。根据辐射器表面温度范围, 管右侧假想辐射面温度  $T_{in}$  分

别取 1 073 K、1 123 K、1 173 K。管内空气平均流速  $u$  取 0.5 m/s。

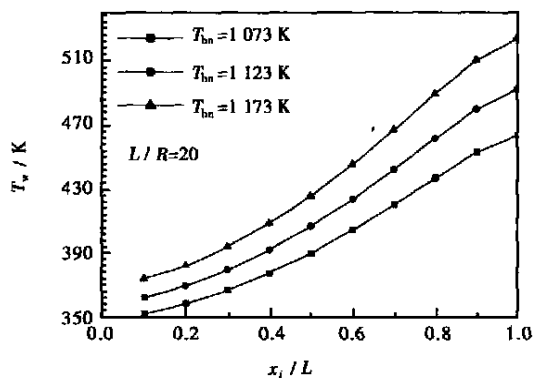


图 2 辐射器表面温度及管长与半径比变化对管内壁温度分布影响

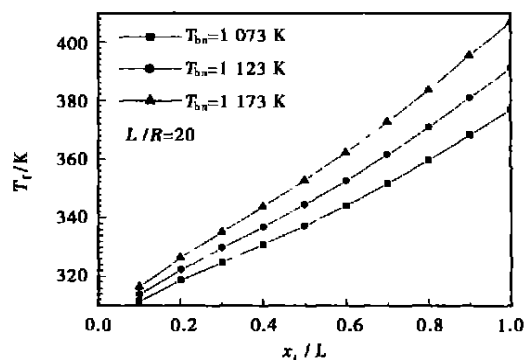


图 3 辐射器表面温度及管长与半径比变化对管内空气温度分布影响

图 2 表示管内空气速度为 0.5 m/s、 $L/R=20$ ，辐射器表面温度及管长与半径比变化时的管内壁温度分布。由图可知：考虑辐射源项后，沿管长方向管壁温度与管内空气平均温度变化是非线性的。计算结果表明： $T_{bn}$  为 1 173 K、 $L/R=4、10、20$  时，沿全管长的管壁温差  $\Delta T$  分别为 17 K、71 K、151 K，靠辐射器部分最近的管端最高温度分别为 503 K、512 K、524 K；辐射器表面温度为 1 073 K， $\Delta T$  分别为 14 K、53 K、112 K，靠辐射器部分最近的管端最高温度分别为 449 K、455 K、464 K。说明当空气流速一定时，靠辐射器部分最近的管端最高温度大小主要由辐射器表面温度决定。

图 3 表示管内空气速度为 0.5 m/s、 $L/R=20$  时，辐射器表面温度及管长与半径比增加时的管内

空气温度分布。由图 3 可知：当管内流速为 0.5 m/s、 $L/R \leq 20$  时，由于管内换热属于强制对流的层流入口段，换热较强烈。空气入口单元的空气温度随辐射器表面温度的变化较小；随辐射器表面温度的提高，管壁各单元得到的投射辐射能量增加，管壁温提高，换热量增加，导致相同位置处的空气温度升高，并且随着空气向前流动，越靠近辐射器表面，管壁单元得到的投射辐射热量越多，管壁单元温升较大，导致相应空气温度单元的温度提高；随着管长增加，管长增加部分的对流换热表面传热系数减小，因此，随  $L/R$  增大，空气出口处的温度升高，但并不显著。

### 5 结 论

(1) 建立了辐射、对流通道的管壁与管内空气的能量平衡微分方程及其边界方程；利用蒙特卡罗法计算辐射传递系数，提供了辐射、对流非线性边界条件下管壁及其内部气体温度场一维稳态数值计算方法。

(2) 已知通道管壁温度分布后，可进一步计算其出口不同天顶角处热辐射的方向性与均匀性。

(3) 在此基础上，可计算更复杂的情形，如改变能量平衡式(1)，添加管外侧同时存在辐射、对流边界条件，或第二、第三边界条件；在热平衡式(7)基础上，利用蒙特卡罗法，可考虑辐射边界条件，还可改变通道的几何形状，如方形、三角形等。

### 参考文献:

- [1] 余其铮. 辐射换热原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000.
- [2] 李艳红, 徐吉浣, 张鹤声. 多孔陶瓷板中城市煤气预混燃烧的实验研究与数值模拟[J]. 工程热物理学报, 1997, 18(3): 385-388.
- [3] 王承伟. 径向浓淡旋流燃烧器扩锥温度场数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1999.
- [4] 路义萍, 李炳熙, 阮立明, 等. 圆管状内壁面管口辐射传递的方向分布特性[J]. 热能动力工程, 2004, 18(1): 51-54.
- [5] YANG W J, TANIGUCHI H, KUDO K. Radiative heat transfer by the monte carlo method[M]. California: Academic Press Inc. 1995.
- [6] RUAN L M, TAN H P, YAN Y Y. A monte-carlo (M-C) method applied to the medium with non-gray absorbing-emitting-anisotropic scattering particles and gray approximation[J]. Numerical Heat Transfer Part A: Application. 2002 43(3): 253-268.
- [7] SIEGEL R, HOWELL J R. Thermal radiation heat transfer[M]. (4th Edition). New York: Taylor & Francis Inc. 2002.
- [8] TAN H P, LIU J F, XIA X L. Transient coupled radiation and conduction in a three-layer composite with semitransparent specular interfaces and surfaces[J]. ASME J of Heat Transfer, 2002, 124(3): 470-481.
- [9] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第三版. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [10] PATANKAR S V. Numerical heat transfer and fluid flow[M]. New York: McGraw-Hill book Inc. 1980.

ciency of the regenerated desulfurizing agent is stable. Compared with a fresh desulfurizing agent the desulfurization efficiency is slightly lower. **Key words:** flue gas desulfurization, sodium sulfite, cycle

基于ROLS算法的RBF神经网络燃料电池电特性建模= **Electric-characteristic Modeling of a Fuel Cell Based on ROLS Algorithm and RBF (Radial Based Function) Neural Network Identification Technique**[刊, 汉] / MIAO Qing, CAO Guang-yi, ZHU Xin-jian (Fuel Cell Research Institute under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 387 ~ 389

An innovative method is presented for the electric-characteristic modeling of a direct methanol fuel cell (DMFC) through the use of ROLS algorithm-based RBF (radial based function) neural network identification technique. With the operating temperature of the cell serving as an input and the voltage/electric current density of the cell serving as an output 1200 groups of experimental data were utilized as training and test samples to set up under various operating temperatures a dynamic response model of the cell voltage/electric current density. Simulation results indicate that the modeling method by using the RBF neural network identification technique is effective with the established model featuring a relative high precision. **Key words:** direct methanol fuel cell, radial based function, neural network identification, ROLS algorithm

基于神经网络的电除尘器效率在线确定方法= **A Method for the On-line Determination of the Efficiency of a Neural Network-based Electrostatic Precipitator**[刊, 汉] / LI Da-zhong, TIAN li (North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003), ZHANG Zheng-wei, et al (Datang Xu Chang Longgang Power Generation Co. Ltd., Yuzhou, Henan Province, China, Post Code: 452500) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 390 ~ 393

There exist numerous factors, which can affect the efficiency of an electrostatic precipitator. This also makes it difficult to conduct an on-line determination of the precipitator efficiency. In view of the above the authors have proposed a new method for setting up a model of electrostatic precipitator efficiency with the help of a neural network. In this kind of neural network model it is only necessary to input such operating parameters as boiler steam output, flue gas flow to be processed, ash, dust particle diameter and dust specific resistance, etc and one can readily realize the on-line determination of the electrostatic precipitator efficiency. The results of a simulation indicate that this neural network-based model has a fair effectiveness approximating to an actual system, thus providing a useful reference for the further modeling and optimized control of an electrostatic precipitator system. **Key words:** neural network, electrostatic precipitator, dust collection efficiency

辐射通道一维稳态温度场数值模拟= **Numerical Simulation of the One-dimensional Steady-state Temperature Field of a Radiation Channel**[刊, 汉] / HAN Jia-de, LU Yi-ping (Institute of Mechanical & Power Engineering under the Harbin University of Science & Technology, Harbin, China, Post Code: 150080), ZHANG Pei-ting (Heilongjiang Research Institute of Special Equipment Inspection, Harbin, China, Post Code: 150040) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 394 ~ 396

To determine the temperature distribution in a radiation-convection channel, a mathematical model was set up on the basis of energy conservation theory to reflect the heat transfer of air in a tube to a circular tube wall under radiation and convection nonlinear boundary conditions. A finite difference method is presented for solving the one-dimensional steady-state heat exchange of tube wall temperature and in-tube cooling air temperature. For the radiation heat exchange calculation adopted was a radiation heat transfer factor-based Monte Carlo method. The impact of relevant parameters on the temperature distribution in the radiation channel is analyzed. The parameters being studied include radiator surface temperature, the ratio of piping length to radius, the flow speed of cooling air in the tube, etc. The results of the calculation indicate that the surface temperature of the radiator represents a major factor influencing the maximum temperature in the radiation channel. The method under discussion can provide temperature field data for the detailed thermodynamic characteristics calculation of a radiation channel. **Key words:** radiation heat transfer, finite difference method, numerical simulation, temperature field