

文章编号: 1004- 0609(2000) 02- 0278- 04

余热锅炉流场温度场数值计算^①

杨卫宏, 赖亚欣, 萧泽强

(中南工业大学 物热系, 长沙 410083)

摘 要: 用 $k-\varepsilon$ 方程模拟了余热锅炉内流场和温度场分布。几何拓扑结构用多块结构以减少计算机内存的浪费, 用贴体坐标系统来描述复杂的几何边界, 网格系统用交错网格。使用二阶中心差分法离散扩散项和源项, 对于控制方程的对流项的离散采用混合差分(HDS)格式。求解方程使用 SIMPLE 算法。给出了余热锅炉内流场和温度场的分布, 为研究余热锅炉炉内流动和传热、传质提供了理论依据, 对余热锅炉的设计、节能改造提供了详细的数据和有效手段。

关键词: 余热锅炉; 流场; 温度场; 数值计算

中图分类号: TK22

文献标识码: A

在冶金工艺过程中, 有着极其丰富的余热资源, 如铜、镍、锌闪速炉的排烟温度一般为 1200~1400℃, 炼铜、炼镍反射炉排烟温度为 1100~1370℃等等^[1]。我国冶金行业每年消耗原煤一亿多吨, 其中可利用的余热资源就相当于 3300×10^4 t 原煤^[1]。这些余热排放, 一方面造成能源浪费, 同时由于高温烟气中含尘量高、腐蚀性大、具有粘着性等也产生环境污染。目前, 国内外为回收烟气中的大量余热和降尘一般采用余热锅炉。如芬兰奥托坎普铜闪速炉的烟气就采用余热锅炉回收, 我国贵溪冶炼厂铜闪速炉的烟气也采用余热锅炉回收, 都收到了较好的效果。

余热锅炉是生产蒸汽的设备。但是由于余热资源条件的多样性与复杂性, 使余热锅炉比工业锅炉具有不同的特点。人们很早就研究余热锅炉, 一般主要考虑针对不同的余热资源设计余热锅炉, 从余热锅炉的积灰、腐蚀、磨损机理研究余热锅炉, 并取得了很好的效果^[2]。最近几年, 开始有学者进行余热锅炉内流动和传热、传质现象的研究, 包括余热锅炉内管壁上灰渣沉积对传热的影响等^[3, 4]; 芬兰奥托坎普铜业公司则建立了余热锅炉模型, 并进行了实验研究。国内这方面的研究, 特别是对采用火法提取有色金属的尾部烟气的余热锅炉的内流动传热研究尚甚少见。

本文作者采用计算机仿真模拟的方法, 用 $k-\varepsilon$ 方程模拟炉内气体流动, 并对某铜业公司的铜闪速炉烟气余热锅炉进行了工业规模的数值仿真计算,

以研究余热锅炉内气体流动与传热特性, 得出了余热锅炉内流场和温度场的分布。

1 基本方程和边界条件

1.1 基本方程

求解流场, 采用 $k-\varepsilon$ 模型^[5], 控制方程如下。

连续和动量方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) - \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{U}) \\ = - \nabla p + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} (\nabla \mathbf{U})^T) + \mathbf{B} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 ρ 为流体平均密度, $\mathbf{U} = (U, V, W)$ 为流体平均速度, p 为压力, t 为时间, $\mathbf{B}$ 为体积力, μ_{eff} 为有效粘度。

紊流动能 k 和紊流扩散率 ε 的传输方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} k) - \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) = \\ P + G - \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \varepsilon) - \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) = \\ C_1 \frac{\varepsilon}{k} (P + C_3 \max(G, 0)) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 P 为剪切应力产生项; G 为体积力产生项; C_1 , C_2 和 C_3 均为经验常数^[5]。

能量方程:

① 基金项目: 教育部博士点基金资助项目

收稿日期: 1999- 02- 10; 修订日期: 1999- 04- 02

作者简介: 杨卫宏(1968-), 男, 博士

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U H) - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (5)$$

式中 H 是总热焓, 由静态焓 h 的公式给出:

$$H = h + \frac{1}{2} U^2 \quad (6)$$

式中 ρ 是流体的平均密度, $U = (U, V, W)$ 是流体的速度, p 是压力, T 为温度, t 为时间, λ 是导热系数。

传递方程必须加上本构方程才能封闭, 也就是说, 要加上静态焓与温度和压力之间的关系, 即 $h = h(T, p)$ 。假设流体为温度特征值 (thermally perfect), 即静态焓只是温度的函数, 则本构方程可由比定压热容和基准温度 T_{ref} 给出。比定压热容是温度的函数:

$$c_p(T) = \left[\frac{\partial h}{\partial T} \right]_p \quad (7)$$

T_{ref} 是静态焓为 0 时的温度。那么静态焓可由上式积分得到:

$$h = \int_0^T c_p(T') dT' - \int_0^{T_{\text{ref}}} c_p(T') dT' \quad (8)$$

在程序内部, 本构方程被假设成具有下列解析形式:

$$h = \bar{c}_p(T) T - \bar{c}_p(T_{\text{ref}}) T_{\text{ref}} \quad (9)$$

式中 T_{ref} 取环境温度。

余热锅炉内混合气体的物性参数仅考虑与温度有关, 可写成温度的多项式:

$$\begin{aligned} \rho &= 0.005388 p / T \\ c_p(T) &= 793.13 + 0.208 T \\ \nu(T) &= 2.0 \times 10^{-6} + 3.0 \times 10^{-9} + \\ &\quad 6.0 \times 10^{-11} T^2 \\ \lambda(T) &= 2.27745 \times 10^{-3} + 5.1571 \times 10^{-5} T \end{aligned} \quad (10)$$

式中 ρ 为混合气体平均密度, c_p 为混合气体比定压热容, ν 为动力学粘度, λ 为导热系数。

传热计算的目的是获得计算区域内的温度场。为了耦合温度场内的辐射, 将辐射项处理为方程的源项。在控制体积 i, j, k 中的辐射散热为

$$C_{ijk} = 4 \sigma T_{ijk}^4 k_{ijk} V_{ijk} \quad (11)$$

式中 σ 是斯蒂芬常数, T 为温度, k_{ijk} 是吸收率, V_{ijk} 是单元体积。

在每个辐射区域辐射属性假设为常数, 因此对一个辐射区域, 我们有总散热为

$$C_Z = \sum_{ijk \in Z} 4 \sigma T_{ijk}^4 k_{ijk} V_{ijk} \quad (12)$$

因此

$$C_Z = 4 \sigma k_Z \sum_{ijk \in Z} T_{ijk}^4 V_{ijk} \quad (13)$$

式中的求和是针对每个属于辐射区域的体积 i, j, k 而进行的。

为使能量守恒区域 Z 的辐射温度由总辐射散热计算, 则

$$C_Z = 4 \sigma k_Z T_Z^4 V_Z \quad (14)$$

这样,

$$T_Z = \left[\sum_{ijk \in Z} \frac{T_{ijk}^4 V_{ijk}}{V_Z} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (15)$$

使用这个温度场, 计算辐射加热量 H_Z 。在辐射体积中净总辐射加热量—焓源项, 由下式给出:

$$H_{ijk}^r V_{ijk} = a_Z H_Z V_{ijk} - C_{ijk} \quad (16)$$

式中 a_Z 是保证能量守恒的体积标准化因子

$$a_Z = \frac{V_Z}{\sum_{ijk \in Z} V_{ijk}} \quad (17)$$

焓源项 H^r 由因子 u^r 欠松弛, 这样在对计算的第 n 次调入中, 有

$$H_{ijk}^{r(n)} = u_r \left[a_Z H_Z - \frac{C_{ijk}}{V_{ijk}} \right] + (1 - u_r) H_{ijk}^{r(n-1)} \quad (18)$$

1.2 边界条件

进口条件: 进口采用 Dirichlet 条件, 直接设定进口速度(或流量)。进口湍动能 k 和动能耗散系数 ε 的值对于进口均匀截面可以作如下假设^[4]:

$$\begin{aligned} k_{\text{int}} &= c_{p1} u_{\text{int}}^2 \\ \varepsilon_{\text{int}} &= \frac{k_{\text{int}}^{1.5}}{c_{p2} d_{\text{in}}} \end{aligned}$$

式中 u_{int} 为进口平均速度; c_{p1} 和 c_{p2} 为经验数据, 分别为 0.05 和 0.3^[4]; d_{in} 为水力直径, $d_{\text{in}} = 4A/L$, A 为进口截面面积, L 为进口截面周长。

出口条件: 出口采用压力边界。

壁面条件: 紊流传输方程只能在全紊流区适用, 对于近壁面, 我们选择对数律来处理底层区域。对于水冷壁, 管内介质为水, 采用定温条件, 根据不同情况, 取为 250~550 °C, 辐射屏温度也采用定温条件, 取为 700 °C^[8,9]。

2 数值模拟及分析

2.1 数值模拟

网格划分: 采用贴体坐标系统(BFC), 它不但能准确描述复杂的几何边界, 还可以利用很密的网格求解而不占用计算机过多的内存; 流道几何拓扑结构采用多块结构化, 以减少内存的使用, 网格数为 $10 \times 40 \times 40$, 见图 1。

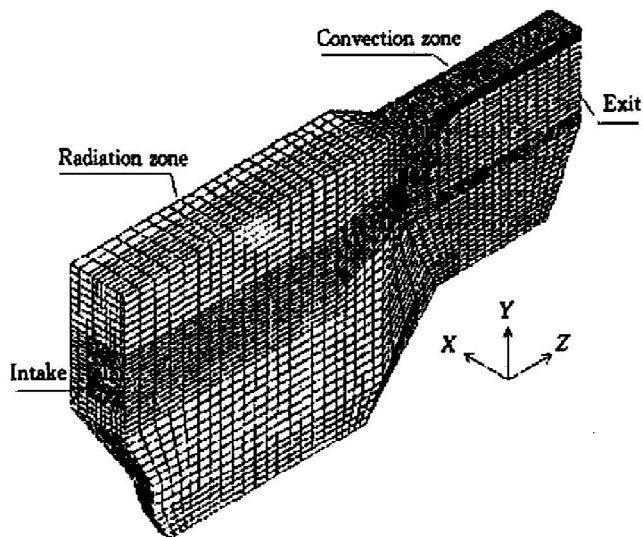


图 1 余热锅炉计算网格

Fig. 1 Computation grid for waste-heat boiler

数值求解: 当余热锅炉运行稳定后, 各参数基本不变, 故可以假设流动传热为稳态, 这样也可减少计算工作量。同时, 针对流动控制方程的特点, 使用二阶中心差分法离散扩散项和源项; 对于控制方程的对流项的离散, 为了克服中心差分当网格 Pe 数大于 2 后解的不稳定和迎风差分不考虑 Pe 影响的缺陷, 采用混合差分(HDS)格式, 即当网格 $|Pe| > 2$ 时采用迎风差分, 网格 $|Pe| < 2$ 时采用中心差分, 对时间采用二阶向后差分; 采用 SIMPLE 算法解离散方程, 考虑收敛, 对速度三个分量 U , V , W 和 k , ε 采用欠松弛因子方法处理和假时间步(False Time Step Relaxation)的方法, 取得了较好的收敛结果。

2.2 计算结果及分析

所模拟的余热锅炉具体结构如图 2 所示, 基本尺寸为 $23\text{ m} \times 5.4\text{ m} \times 11\text{ m}$, 辐射炉膛内有 8 块辐射屏, 尾部烟道内有 5 组对流管束。考虑计算机内

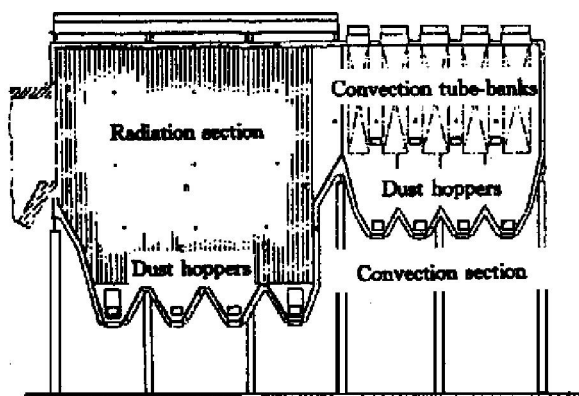


图 2 余热锅炉基本结构

Fig. 2 Schematic drawing of waste-heat boiler

存和速度的限制, 将辐射屏和对流管束简化为一组平盘。烟气体积流量为 $19\,000\text{ m}^3/\text{h}$, 温度为 $1\,300\sim 1\,350\text{ }^\circ\text{C}$; 烟气成分为 SO_2 30%, CO_2 含量 10%, H_2O 含量 3%, O_2 含量 2%, N_2 含量 55%。通过计算机模拟, 得出了炉内流场与温度场的分布图。

图 3 为余热锅炉中心纵截面速度分布。在辐射炉膛管束区域内, 流动速度较大且方向较水平, 速度比较均匀。这是因为辐射屏部分流通面积减少造成的。辐射屏区域对主流的影响不大, 但在辐射屏左下部, 能看到一个旋流, 而在下部和右下部也有一个回流。

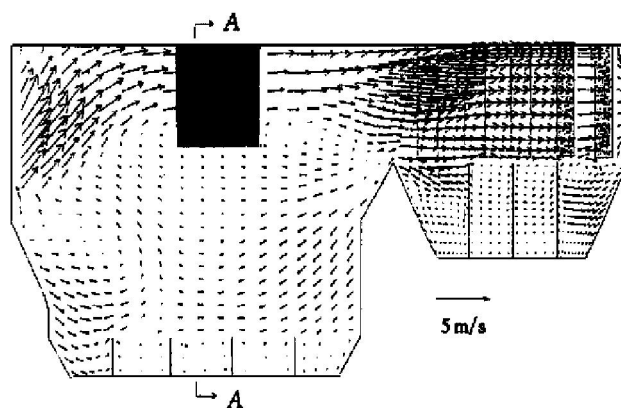


图 3 余热锅炉中心纵截面速度分布图

Fig. 3 Velocity distribution of waste-heat boiler near symmetric center line

图 4 为余热锅炉横截面速度分布, 在辐射屏下部出现了两个方向相反位置对称的旋涡(对涡), 对流管束区域内流动的影响和辐射屏类似。

图 5 为炉内温度分布。由于气流有强烈的向上流动(因为进口气流向上), 靠近辐射屏进口部位的顶墙的热流比较大, 这部分炉膛降温较快。辐射区

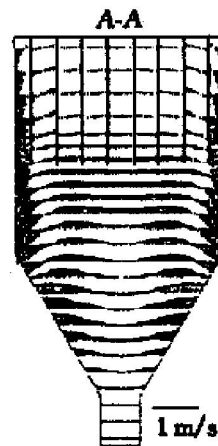


图 4 余热锅炉 A-A 截面速度分布

Fig. 4 Velocity distribution across radiation screens of waste-heat boiler

域下部的温度分布较均匀, 这是由于气体在此存在回流, 气体停留时间较长, 气体冷却比较充分造成的。

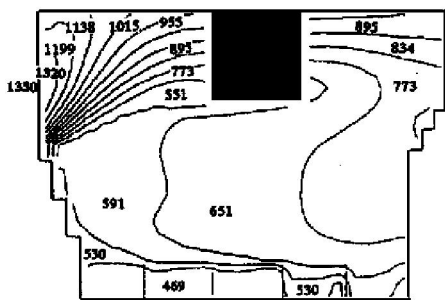


图 5 余热锅炉中心纵截面温度等值线图

Fig. 5 Temperature contours near symmetric center-line of boiler

3 结论

1) 炉内气流在进口顶部热流较大, 炉内下部存在旋涡, 使整个流场分布欠佳, 并影响了温度分布。可以考虑通过改变流场而使温度分布更合理(具体的改进措施见作者另一篇文章)。

2) 计算机模拟为余热锅炉的设计、节能改造提供了详细的数据和有效的手段。它能替代不少实验, 并获得许多实验难以提供的数据, 可降低实验费用, 缩短设计周期。

REFERENCES

[1] LIU Rong(刘 荣), LI Zhi-pu(李支普). Power Equip-

ment of Metallurgy(冶金动力设备)[M]. Shenyang: North East University Press, 1993.

[2] Backman R, Hupa H and Makinen J K. Formation and corrosion effects of sulphur trioxide in copper, smelting processes [R]. Metallurgical Society of AIME, TMS Technical Paper, Paper No. A56-86, 1986.

[3] Lilia and Rajainmaki. On the experimental and computational modeling at Outokumpu reasearch [A]. The 2nd colloquium on process simulation [C]. Jokilakso, 6-8 June 1995, Finland, 217~ 230.

[4] Klaus A H and Steve T C. Computational Fluid Dynamics for Engineers [M]. Volume I / II, A Publication of Engineering Education System, Kansas, USA, 1993.

[5] Patankar S V. Transl. ZHANG Zheng(张 政). Numerical Heat Transfer and Fluid Flow(传热与流体流动的数值计算)[M]. Beijing: Science Technology Press, 1984.

[6] MEI Chi(梅 炽) and WANG Qian-pu(王前普). 有色冶金炉窑的仿真与优化[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1996, 6(4): 19.

[7] Schwarz M P. Low simulation in mineral engineering [J], Minerals Engineering, 1991, 7(4): 717.

[8] YANG Wei-hong(杨卫宏) and XIAO Ze-qian(肖泽强). 双级旋风分离器的计算机预报[J]. Journal of Central South University of Technology(中南工业大学学报), 1999, 30(5): 493.

[9] YANG Wei-hong(杨卫宏) and XIAO Ze-qian(肖泽强). 余热锅炉辐射冷却室三维数值模拟[J]. Boiler Technology(锅炉技术), 1999, 30(11): 8.

Numerical simulation of flow and temperature fields in waste boiler

YANG Wei-hong, LAI Ya-xin, XIAO Ze-qiang

Central South University of Technology, Department of Applied Physics and Heating Engineering,
Changsha 410083, P. R. China

Abstract: The flow and temperature fields in the waste boiler have been simulated. The computing method is SIMPLE method. The multi-block grid methodology involving unstructured set of block was used, and the Body-Fitted grid was specified in the simulation. The method of discretization of diffusion terms and source terms in the control equations is central differencing (CDS), and the method of discretization of advection terms in the control equations is Hybrid Differencing(HDS). The computation results described by the distribution of the velocity and temperature are good in accordance with phenomena observed in prototypes. The simulation results can be used in design of waste boiler.

Key words: waste boiler; numerical calculation; flow field; temperature field

(编辑 吴家泉)