

(20) 107-111

# 平焰供热炉的传热特性研究

温良英 刘成全 徐楚韶

(重庆大学冶金及材料工程系, 重庆, 400044; 第一作者 32岁, 女, 讲师, 博士生)

TF061.22

**摘要** 针对炉顶平焰供热炉的传热特性, 采用区域法对炉膛内的传热进行了模拟计算。理论计算与实测值符合较好。

**关键词** 加热炉; 传热; 数值模拟

中国图书资料分类法分类号 TF061.22

## 0 引言

由于火焰炉内流体动力学, 传热和燃烧动力学复杂的相互作用, 构成其全数学模型是相当困难的。但是, 传热是炉内发生的最重要的一个传递过程, 对于燃烧器安装在炉顶的平焰燃烧供热的炉子, 炉内的热过程有其自身的特点。从炉内气流的动力特点看<sup>[1,2]</sup>, 由于气流的强烈旋转配以喇叭型扩口, 燃烧产生的高温气体呈圆盘型沿炉顶铺展开, 同时以强的对流和辐射的方式很快将热量传递给它贴附的炉顶, 而炉顶附近以外的炉膛内气流速度很小, 因此, 可以认为该类炉子的炉内传热主要是辐射传热和导热。在辐射传热的研究中, 区域法 (Zone-method) 以其机理严谨、精度高占有重要的地位。笔者采用区域法对炉顶平焰供热炉内传热进行模拟计算。

## 1 数学模型的建立

为简化炉内辐射换热过程的分析, 假设:

1) 整个炉内为非等温灰气体与非等温灰体表面之间的辐射换热;

2) 炉内对流因素等引起的传热与炉壁的散热相当, 达到稳态时炉壁不吸收和不出热;

3) 被加热金属铺满整个炉底。

如图 1 为试验炉的炉膛, 整个炉膛面积为  $A$ , 炉内全部烟气体积为  $V$ 。把炉膛分为  $N$  个等温和等辐射特性的表面区, 把炉气分成  $M$  个等温和等辐射特性的体积区。以有效辐

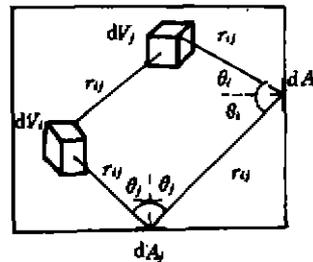


图 1 分区能量平衡分析

射  $B$  为变量,任一表面分区  $A$  的辐射能量方程为<sup>[1]</sup>:

$$\sum_{i=1}^N \left( \overline{s_i s_i} - \delta_{ij} \frac{A_i}{\rho_i} \right) B_j = \frac{A_i \epsilon_i E_b(T_i)}{\rho_i} - \sum_{j=1}^N \overline{g_j s_i} E_b(T_{g_j}) \quad i = 1, 2, \dots, N$$

其中

$$\overline{s_i s_i} = \int_{A_i} \int_{A_i} \frac{\cos \theta_j \cos \theta_i e^{-K r_{ij}}}{\pi r_{ij}^2} dA_i dA_i$$

$$\overline{g_j s_i} = \int_{V_j} \int_{A_i} \frac{4K \cos \theta_j e^{-K r_{ij}}}{\pi r_{ij}^2} dA_i dV_j$$

$\overline{s_i s_i}$  称为表面区间的直接交换面积,  $\overline{g_j s_i}$  称为气体区与表面区的直接交换面积, 类似地, 可求出气体区与气体区的直接交换面积  $\overline{g_j g_k}$ , 且在系统处于平衡时, 直接交换面积具有互换性:

$$\overline{s_i s_j} = \overline{s_j s_i}, \quad \overline{s_i g_k} = \overline{g_k s_i}, \quad \overline{g_j g_k} = \overline{g_k g_j}$$

同时有可加性:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^N \overline{s_i s_j} + \sum_{k=1}^M \overline{s_i g_k} = A_i \\ \sum_{j=1}^N \overline{g_j s_i} + \sum_{k=1}^M \overline{g_j g_k} = 4KV_j \end{cases}$$

$T$  为对应表面(体积)分区的温度;  $E_b$  为黑体辐射力;  $\epsilon$  为表面黑度系数;  $\rho$  为反射率;  $K$  为气体吸收系数;  $\delta_{ij}$  为 Kronecker 算符;  $r_{ij}$  和  $\theta$  分别为图 1 所示的位置向量及角度。

根据全交换面积的定义, 假设在封闭体系内只有  $\sigma T^3 = 1$  的孤立辐射源作用的条件下, 可以导出辐射全交换面积:

$$\begin{aligned} \overline{G_i S_i} &= \frac{A_i \epsilon_i}{\rho_i} \kappa_i B_i \\ \overline{S_i S_i} &= \frac{A_i \epsilon_i}{\rho_i} [\kappa_i B_i - \delta_{ii} \epsilon_i] \\ \overline{G_i G_i} &= \overline{g_i g_i} + \sum_{k=1}^M \overline{s_k g_k} B_k \end{aligned}$$

它们是封闭系统内所有表面分区和气体的辐射特性和几何参数的函数, 与温度无关。式中  $B_i$  为在孤立单位辐射力作用下, 任一表面分区  $A_i$  上产生的有效辐射。

所有  $N$  个表面分区和  $M$  个气体分区的平衡温度, 可由  $(M+N)$  个分区的能量方程组联立迭代求出:

$$\sum_{k=1}^M \overline{G_k S_j} E_b(T_{g_k}) + \sum_{i=1}^N \overline{s_i s_j} E_b(T_i) - A_j \epsilon_j E_b(T_j) + q_j A_j = 0 \quad j = 1, 2, \dots, N$$

$$\sum_{i=1}^M \overline{GG}_i E_b(T_{q_i}) + \sum_{i=1}^N \overline{SG}_i E_b(T_i) - 4KE_b(T_{q_k})V_k + q_{v_1}V_k + Q_k = 0 \quad k = 1, 2, \dots, M$$

式中,  $q_i, q_{v_k}$  分别为任一表面区和气体区的净辐射热流密度:

$$q_i = \frac{\epsilon_i}{\rho_i} [E_b(T_i) - B_i]$$

$$q_{v_k} = 4KV_k E_b(T_{q_k}) - \sum_{i=1}^N \overline{gg}_i E_b(T_i) - \sum_{i=1}^N \overline{sg}_i B_i$$

$Q_k$  为对应体积区  $V$  的燃料燃烧放出的热量, 若该区无燃烧则无此项存在。

在假设温度分布下, 求解  $N$  个  $q_i$  和  $M$  个  $q_{v_k}$ , 由上述能量方程解出的温度分布与原假设的分布不一致, 则以解出的温度分布再进行求解, 直至结果一致为止。图 2 为计算程序框图。

## 2 结果及讨论

用所建的数学模型对如图 3 所示的试验炉<sup>[2]</sup>的具体情况作了实际计算, 燃烧所用天然气低发热  $Q_b = 35.2 \text{ MJ/m}^3$ , 空气过剩数为 1.05。假定天然气出平焰燃烧器的喇叭口就迅速燃烧完全, 且燃烧产生的高温气体将热量很快传递给它贴附的炉顶, 炉顶温度呈圆盘形对称分布。认为平焰供热炉内的传热主要是辐射传热。为便于比较, 计算时设定炉内金属加热终了温度为  $800 \text{ C}$ 。

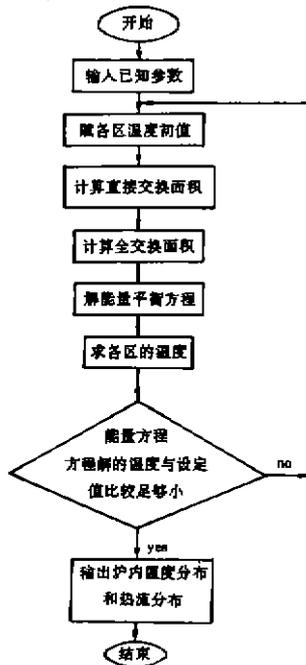


图 2 数学模型的求解过程

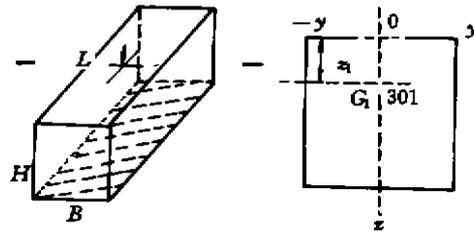


图 3 计算实体炉简图

图 4 是炉膛相对高度为  $H/D = 6$  ( $H$  为炉膛高度;  $D$  为燃烧器出口通道的直径) 时, 不同热负荷下, 炉膛横截面  $YOZ$  (燃烧器中心为坐标原点  $O$ ) 上炉内气体温度分布。

由图可见, 在此相对炉膛高度下, 炉内气体温度分布相似, 热负荷对其影响不大。与试验炉内代表点  $G_1$ <sup>[2]</sup> 对应的计算温度值与实测值比较列于表 1, 可见, 计算值与实测值吻合较好。

表 1 计算温度值与实测温度值比较

热负荷 kJ/m <sup>3</sup>	$Q_1 = 35Q_0, Q_2 = 30Q_0, Q_3 = 25Q_0$		
实测值, C	862	858	855
计算值, C	870.92	866.62	861.05

图 5 是各种不同炉膛相对高度和供热负荷时金属表面的辐射热流分布。由图可见,随着炉膛相当高度增加,各种确定的供热负荷下,金属表面的平均辐射热流降低,而相对炉膛高度  $H/D$  为 6.38 时对各种供热负荷下,其变化最不敏感,说明此相对炉膛高度是炉顶平焰供热炉的适宜匹配值,对实际生产状况有较高的适应性,对保证炉子生产率,金属的均匀加热是合理的。

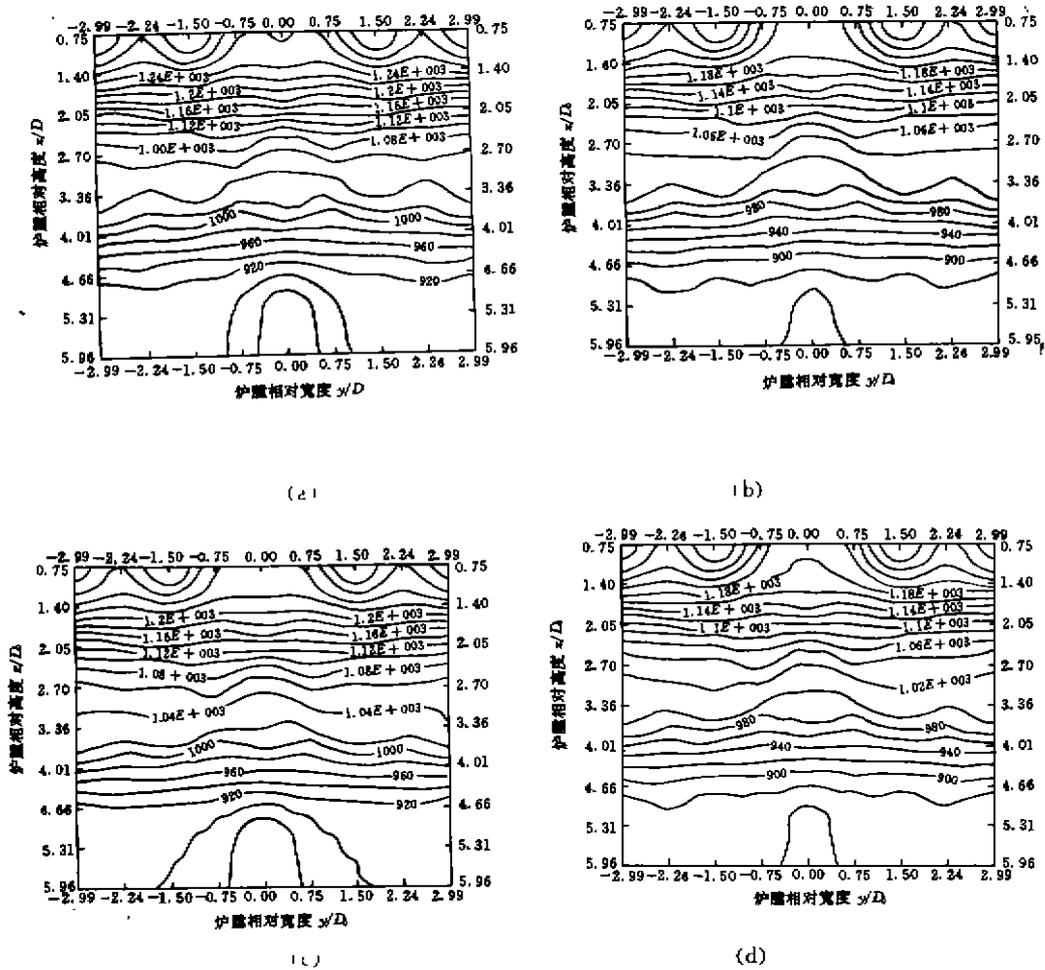


图 4 主截面  $YOZ$  的炉内气体温度的分布 ( $H/D = 6$ )

((a), (b), (c), (d) 分别为天然气供入量  $V = 35, 30, 25, 20 \text{ m}^3/\text{h}$ )

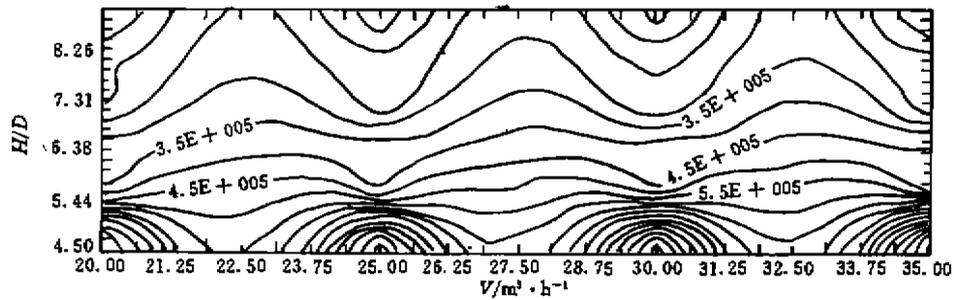


图5 不同相对炉膛高度下天然气供气量与金属表面平均热流的关系

### 3 结 语

该数学模型对研究高温炉膛内的辐射传热有较强的适应性,应用该数学模型研究实际生产过程,得出的结果经试验验证是可靠的,为全面研究炉内热过程提供了前提。

#### 参 考 文 献

- 1 温良英,刘成全. 炉顶平焰供热的炉子热工特性研究(I). 工业炉,1996,18(1):3~7
- 2 温良英,刘成全. 炉顶平焰供热的炉子热工特性研究(II). 工业炉,1996,18(2):7~12
- 3 钱壬章. 传热分析与计算. 北京:高等教育出版社,1987. 394~457

## A Study on Heat Transfer Characteristic in Furnace of Flat Flame Burner

Wen Liangying    Liu Chengquan    Xu Chushao

(Department of Metallurgical and material engineering, Chongqing University)

**ABSTRACT** In view of the heat transfer characteristic of furnace that flat flame burner was installed in its top, heat transfer was simulatively calculated by Zone-method. The calculated results are correspond to the measured.

**KEYWORDS** heating furnace; heat transfer; numerical simulation