

底部局部辐射加热窑炉内温度场数值模拟*

童钧耕** 邵智才 范云良

(上海交通大学 · 200030)

摘 要 提出了底部局部辐射加热窑炉内温度场数值分析的控制方程组, 分别对平面加热面及半圆柱形加热面两种算例进行了数值计算, 得出影响烤花窑炉内温度场均匀性的主要因素有加热面发射率、加热面形状、加热面相对位置及窑炉墙体热阻和墙体与外界的换热热阻。

关键词 窑炉 辐射加热 温度场 数值模拟

1 前 言

当前, 由于能源价格上涨, 能源费用占陶瓷生产成本的比值逐年提高, 已成了影响陶瓷生产成本的关键因素之一。日用陶瓷生产主要热工设备有陶瓷产品的烧成窑、烤花窑、半成品用的室式烘房、链式烘干机等。虽然烤花窑消耗的能源约占陶瓷生产的总能耗的 5%^[1], 但烤花窑对炉氛及炉内温度场均匀性的要求较高, 成为瓷厂提高成品率、降低能耗关键之一, 烤花窑内温度场分析是瓷厂进一步节能需解决的重要问题。本文以底部局部辐射加热的窑炉为例提出了炉内温度场计算的支配方程组, 分析了影响炉内温度场均匀性的主要因素, 得出了一些有用的结果。

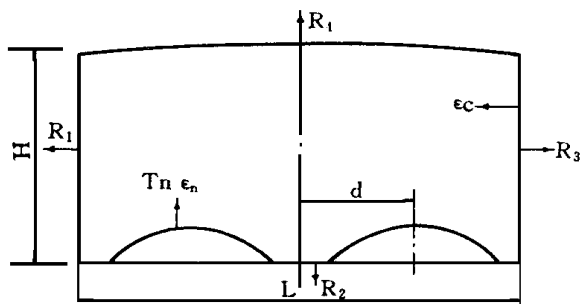


图 1 物理模型

Fig. 1 Physical model

烤花窑的横截面尺寸较之轴向长度尺寸小得多, 且沿长

度方向无很强的气流流动。故加热段部分的传热可简化为具有局部辐射加热面的封闭空腔内二维自然对流传热, 问题的物理模型如图 1。本文模型中窑炉底部布置二个曲率半径为 ϕ 表面发射率(即黑度)为 ϵ_n , 温度为 T_n 的恒温加热面。底面的其余部分、侧壁和烘顶为冷壁面, 其壁面热阻与向环境大气放热热阻之和为 R_l ($l=1, 2, 3, 4$, 分别表示底部、侧壁、烘顶, 如图 1), 忽略粘性耗散及压缩功的影响, 并考虑到窑炉腔内高度尺寸较小, 假定流动处于层流, 利用涡量流函数法, 问题的能量方程、涡量方程和流函数方程构成支配方程组:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u \omega)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \omega)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) - \rho g \beta \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} \right) = \rho \omega \quad (3)$$

方程组的边界条件是: 考虑到固体壁面无气体渗漏, 故 $\psi = 0$

运用二阶 Wood 公式,

$$\omega = 3 \frac{\psi}{(n)^2} - \frac{\omega}{2} \quad (4)$$

除恒温加热面保持 T_n 外, 其余壁面处

$$-\lambda \frac{\partial T(i)}{\partial n} + q_l(i) + \frac{T(i) + T_\infty}{R_l} = 0 \quad (5)$$

其中

$$q_l(i) = \frac{\epsilon(i)}{[1 - \epsilon(i)]} \left\{ 5.67 \left(\frac{T(i)}{100} \right)^4 - J(i) \right\} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

$$J(i) = 5.67 \epsilon(i) \left[\left(\frac{T(i)}{100} \right)^4 + \{1 - \epsilon(i)\} J(j) F_{ij} \right] \quad j = 1, 2, \dots, N; j \neq i \quad (7)$$

式中 $q_l(i)$ 是固体表面辐射换热热流密度, 以固体表面向外辐射为正。 F_{ij} 为角系数。

上述方程组是非线性的, 可采用数值方法求解。

* 收稿日期: 1996—09—08

** 男, 副教授

3 数值求解方法及算例

本文采用控制容积的有限差分法得到上述方程组的差分形式, 差分方程组的求解采用交替方向法, 详细的处理方法见文献[2, 3, 4, 5]。求解角系数时考虑到加热面可能不是平面, 故采用蒙特卡洛法, 取 $n = 15000$ 。

本文对平面和半圆柱形两种加热面进行了模拟计算, 两个算例中假定加热面温度恒定 $T_n = 890$, 冷壁面发射率相等 $\epsilon_c = 0.8$, 窑炉腔宽度 $L = 800$ 毫米。算例A的加热面是平面, 加热面宽度是 200 毫米, 加热面中线距窑炉中线 200 毫米, 窑炉高度 200 毫米, 其余参数见表 1。算例B的加热面为半圆柱形, 其直径为 113 毫米, 窑炉腔高度 400 毫米, 其余参数见表 2。

计算结果显示炉内空间温度场分布受加热面形状、间距、加热面的发射率及壁面跟周围环境换热热阻和墙体热阻的影响较大。

表 1 算例 A 系统参数

Table 1 Parameters used in example A

NO.	热面发射率 ϵ_n	R_1	R_2	R_3	R_4	温度场
1	0.055	1.8	1.275	1.8	1.335	图 2
2	0.055	5.4	3.825	5.4	4.005	图 3
3	0.2	5.4	3.825	5.4	4.005	图 4

表 2 算例 B 系统参数(热面发射率 $\epsilon_n = 0.2$)

Table 2 Parameters used in example B

NO.	加热面中心距窑中心距离	R_1	R_2	R_3	R_4	温度场
1	213	5.4	8.4	5.4	5.4	图 5
2	287	5.4	5.4	5.4	5.4	图 6
3	113	5.4	5.4	5.4	5.4	图 7

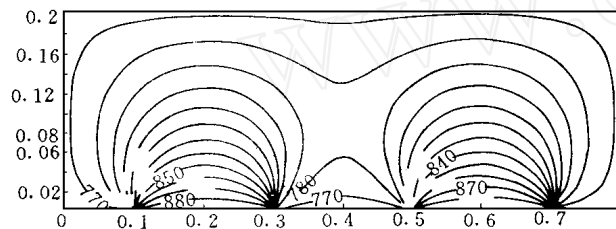


图 2 算例 A 工况 1 温度场

Fig 2 Example A NO. 1 temperature field

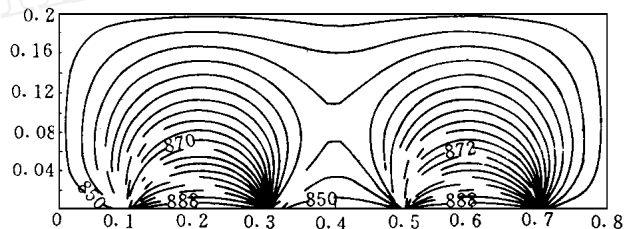


图 3 算例 A 工况 2 温度场

Fig 3 Example A NO. 2 temperature field

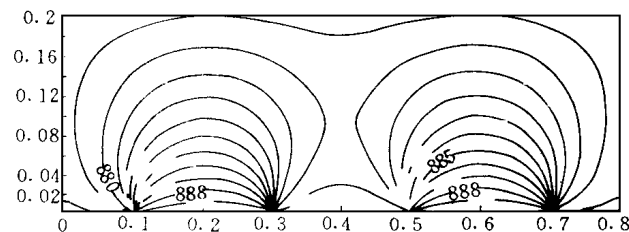


图 4 算例 A 工况 3 温度场

Fig 4 Example A NO. 3 temperature field

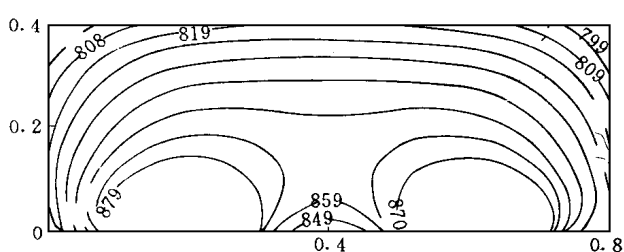


图 5 算例 B 工况 1 温度场

Fig 5 Example B NO. 1 temperature field

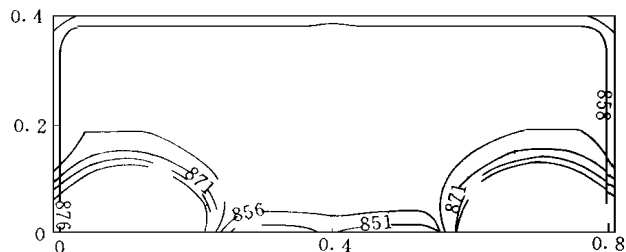


图 6 算例 B 工况 2 温度场

Fig 6 Example B NO. 2 temperature field

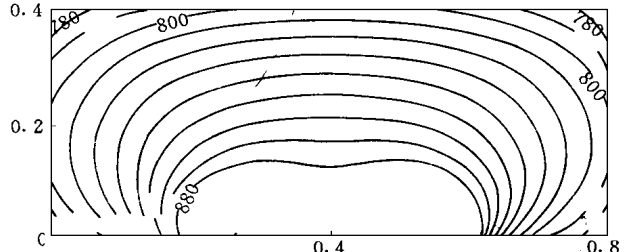


图 7 算例 B 工况 3 温度场

Fig 7 Example B NO. 3 temperature field

由图 3 和图 4 可知, 当壁面与周围环境换热热阻 R_i 一定时, 热面的发射率增加, 炉内各点最大温差减小。比较图 2 和图 3 则可得加热面发射率不变, 加大通过墙体向外散热的总热阻可减小炉内温差, 改善温度场均匀性。据图 5、6、7, 随加热面间距缩小, 炉内温度场分布均匀程度明显下降。这是因随加热面间距缩小, 两加热面间角系数加大。表明加热面的位置对提高炉内温度的均匀性起极重要作用。计算结果还显示加热面形状对温度场分布有较大影响, 图 6 显示炉内有效空间中温度分布几乎均匀一致在平面加热面中没有出现。

4 结 论

具有辐射加热面的窑炉内温度场的均匀性受加热面的发射率、加热面形状、加热面在炉内位置及通过墙体向环境散热的总热阻等各种因素影响。提高加热面发射率、增加墙体与环境换热总热阻(如加强隔热保温), 均可提高炉内温度分布的均匀性。加热面的形状及相对位置对炉内温度场均匀性有较大影响, 需认真对待。

符号表

ρ 密度;	q 热流密度;	u, v 速度;
ϵ 黑度即发射率;	T 温度;	R 热阻;
μ 动力粘度;	β 体积膨胀系数;	Pr 普朗特数;
T_∞ 环境介质温度	F_{ij} 角系数;	

参 考 文 献

- 1 赵德麟 陈立骏 日用陶瓷工业能耗分析 现代陶瓷技术 1993 1(总 55 期) 14—18
- 2 陶文铨 数值传热学 西安 西安交大出版社 1988
- 3 帕坦卡著 张政译 传热与流动的数值计算 北京 科学出版社 1989
- 4 M. Behnia J. A. Reizes and G. V. Davis, Combined Radiation and Natural Convection in a Rectangular Cavity with a Transparent wall and Containing a Nonparticipating Fluid, International Journal for Numerical Method in Fluid, 1990, 10, 305_ 325
- 5 D. M. K M R. V ISKANTA Effect of wall conduction and Radiation on Natural Convection in a Rectangular cavity Numerical Heat Transfer 1984 7(4) 449_ 470

NUMERICAL SIMULATION OF TEMPERATURE FIELD IN KILN WITH THERMAL RADIATION HEATING SURFACES AT BOTTOM

Tong Jungeng Shao Zhicai Fan Yunliang
(Shanghai Jiao Tong University · 200030)

ABSTRACT

Presents the control equations for predicting temperature field in kiln with radiation heating surfaces at bottom, calculates temperature fields with plane and semi-circular radiation surfaces, respectively, and finds emissivity of heating surfaces, shape and relative location between them play an important rule as well as wall total thermal resistance for temperature field in kiln.

Keywords Kiln Radiation heating Temperature field Numerical simulation

(上接第 5 页 · continued from page 5)

FINE SELECTING AND STANDARDIZATION OF KAOLIN CLAY USED TO CERAMIC

Wang Hongwei Zhang Shuiyun Yu Shaohua Zheng Xu Hu Jingyue
(Ceramic Institute of China National Council of Light Industry)

ABSTRACT

This paper briefed fine making technological process and equipments of Kaolin clay used to ceramic; to advanced selecting equipments and technology adopted the best combination; introduced ceramic material standardization and quality control methods

Keywords Kaolin clay Fine selecting Impurity removing Super fine Grinding