

DOI: 10.3969/j. issn. 1002-1639.2017.01.006

## 基于蒙特卡洛法的连续热处理立式炉加热段带温计算模型

丁翠娇<sup>1</sup>, 豆瑞锋<sup>2</sup>, 杨超<sup>1</sup>, 陈超<sup>1</sup>, 郭强<sup>2</sup>, 温治<sup>2</sup>

(1.武汉钢铁(集团)公司研究院 武汉 430080; 2.北京科技大学 能源与环境工程学院 北京 100083)

**摘要:** 带钢温度的准确预测对带钢连续热处理炉的设计、离线分析、在线控制具有重要意义。基于蒙特卡洛方法,建立了带钢连续热处理立式炉热过程分析模型,该模型将W型辐射管简化为I型辐射管,考虑了辐射管温度分布对带钢温度分布的影响,能够模拟不同带钢规格、钢种、带速、炉温制度、辐射管温度分布等工况下的带钢温度。为带钢连续热处理立式炉热过程分析奠定了基础。

**关键词:** 立式炉;连续热处理;数学模型;辐射换热

中图分类号: TG161

文献标志码: A

文章编号: 1002-1639(2017)01-0015-04

### Mathematical Model for Prediction of Strip Temperature in Continuous Heat Treatment Vertical Furnace Based on Monte Carlo Method

DING Cuijiao<sup>1</sup>, DOU Ruifeng<sup>2</sup>, YANG Chao<sup>1</sup>, CHEN Chao<sup>1</sup>, GUO Qiang<sup>2</sup>, WEN Zhi<sup>2</sup>

(1. Research and Development Center of WISCO, Wuhan 430080, China;

2. School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** An accurate mathematical model for prediction of strip temperature distribution in vertical furnace is very important, especially for vertical furnace design, off-line analysis and on-line control. In present paper, based on Monte Carlo method, a mathematical model for the analysis of heat transfer inside continuous heat treatment vertical furnace has been built. In this mathematical model, the W type radiant tubes are simplified to I type radiant tubes. And the impacts of temperature distribution of radiant tubes on strip temperature distribution are considered. The mathematical model also can simulate the effects of parameters such as strip size, strip type, strip velocity, furnace temperature and radiant tube temperature et al. on strip temperature. This mathematical model provides a foundation for heat transfer analysis of continuous heat treatment vertical furnace.

**Key words:** vertical furnace; continuous heat treatment process; mathematical model; radiation heat transfer

连续热处理过程是冷轧和热轧带钢生产的重要工序,该过程是在带钢成分确定的情况下,依靠控制热量传递过程来控制带钢内部微观结构的演化,最终完成晶相组织的转变。因此,带钢温度控制是带钢热处理过程控制的核心,也是热处理质量的根本保证。在连续热处理炉内,带钢的温度不易连续精确测量,而带钢横断面温度分布更是不便于在线连续监测,这样就必须借助于数学模型来计算炉内带钢沿长度和宽度方向的温度分布。多年来,国内外学者针对带钢连续热处理过程数学模型和优化控制策略开展了大量的研究。

本文基于蒙特卡洛方法,建立了带钢连续热处理立式炉辐射管加热段的数值仿真模型,该模型考虑了辐射管温度分布对带钢温度分布的影响,能够获得不

同供热情况(辐射管温度分布),不同带速、钢种、规格等条件下带钢温度分布(沿宽度方向和长度方向),为带钢连续热处理炉的热过程分析奠定了基础。

### 1 炉内带钢传热模型

如图1所示为带钢在炉内运行示意图,由于带钢往复运行,因此相邻行程带钢之间必然存在换热,且相互影响。在建立带钢热过程数学模型时,忽略带钢长度方向的传热影响,以图1中虚线所示的带钢横截面为研究对象,综合考虑带钢与炉内辐射管以及相邻行程带3钢之间的换热。

由于在立式炉中带钢厚度通常小于3 mm,宽度通常大于800 mm,相关的二维导热模型计算表明,带钢厚度方向温差不超过1 K,而现场实验表明,带钢宽度方向存在较大温差(>10 K)<sup>[1]</sup>。因此,在建立带钢热过程数学模型将考虑这一特性,忽略带钢厚度方向的温度差别,建立带钢宽度方向一维热过程模型,模型网格划分如图2所示,其中 $H_s$ 为带钢厚度, $B_s$ 为带钢宽度, $q_1$ 和 $q_2$

收稿日期: 2016-07-29

作者简介: 丁翠娇(1972—),女,硕士,教授级高级工程师,主要从事加热炉节能和燃烧器研发工作。

分别为带钢左右两侧热流密度。

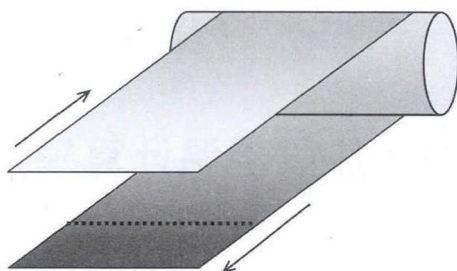


图1 炉内带钢运行示意图

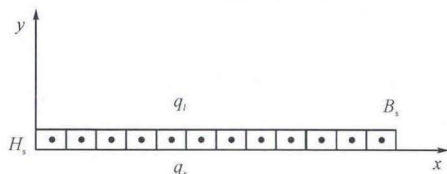


图2 计算区域网格划分示意图

在带钢连续热处理炉内,影响带钢与炉内设备换热的因素很多,为了便于模型建立,根据辐射管加热炉的热工特性,作如下假设:

- (1) 忽略带钢厚度、长度方向的导热,由于带钢很薄,忽略带钢侧边的热流;
- (2) 忽略炉辊与带钢之间的接触换热;
- (3) 在计算相邻行程带钢之间的换热时,以各自的平均温度为准;
- (4) 带钢表面非强制对流换热系数仅仅是炉内保护气热物性与带速的函数,保护气定性温度取为炉温,特征尺度由炉内几何尺寸确定;
- (5) 炉内设备表面、带钢、炉衬均为灰体,且黑度为定值;

(6) 炉衬为定热流密度的表面,其热流密度根据炉外壁面温度,按自然对流和辐射换热确定;

(7) 忽略带钢在炉辊室内的换热。

根据上述假设条件,描述炉内带钢传热的控制方程可写为式(1)的形式,其计算区域网格划分如图2所示。

$$\rho_s \cdot c_{ps} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_s \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right] + q_v \quad (1)$$

式中: $x$ 为带钢宽度方向坐标,m; $\tau$ 为时间坐标,s; $\rho_s$ 为带钢密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $c_{ps}$ 为带钢比热容, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $\lambda_s$ 为带钢热导率, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $q_v$ 为内热源, $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

如图2所示,带钢上下两侧热流密度 $q_u(x)$ 、 $q_l(x)$ 为带钢宽度、炉温等参数的函数,均可进一步细分为辐射、对流两个组成部分,如式(2)、式(3)所示。

$$q_u(x) = q_{rad}(x) + q_{ca}(x) \quad (2)$$

$$q_l(x) = q_{rad}(x) + q_{ca}(x) \quad (3)$$

因此,分别获得辐射热流密度和对流换热热流密度即可得到总的热流密度,进而根据式(1)求解带钢温

度分布。带钢初始温度为带钢入炉温度。

## 2 炉内辐射换热求解

求解辐射换热的方法基本上可以分为两大类,一类是在给定的边界条件下解算基本的辐射传输方程,另一类是求解封闭空间内的辐射换热积分方程<sup>[2]</sup>。在以辐射换热为主的工业热设备中,如带钢连续热处理立式炉中的辐射管加热段,其热量传输主要是辐射换热,由于炉内结构非常复杂,如图3所示为立式连续退火炉的内部几何结构示意图,由于各个表面之间存在遮蔽效应,因此其换热过程的计算就非常复杂。

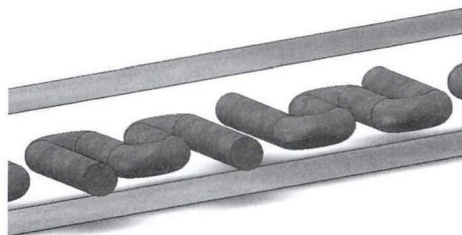


图3 立式炉辐射管加热段的几何结构示意图

由于工程实际中热工设备内部几何结构的多变性和复杂性,这就要求辐射换热模型的建立和求解就必须能够适应这种复杂的变化,就需要辐射换热模型具有较高精度的前提下具有良好的通用性。本文应用通用蒙特卡洛方法,建立三维空间辐射透明介质中任意灰面间辐射换热数学模型,该模型能够适应系统复杂的几何结构变化,能够对其进行统一求解,并实现蒙特卡洛方法的并行运算,提高程序运行速度。

计算表面辐射换热或辐射传递系数的蒙特卡洛法基本思想是:首先,将一个表面发射的辐射能看做是由许多能束所组成,每个能束具有一定的能量;表面所发射的能量与由此表面发出的能束数量有关。然后,跟踪每一个能束的可能途径直到此能束最后被某一表面吸收为止,从一个表面发射的能束其发射位置和发射方向是随机的。假若能束被某表面吸收,则整个行程终结,跟踪此能束的过程到此为止。若能束被反射,则需要继续跟踪直到此能束被某一表面吸收为止。逐个跟踪每个能束的行程,当能束数量足够多时,就可以得到具有统计意义的结果。根据每个表面吸收能束的能量,可确定该表面可接受的辐射能量,从而确定表面间辐射能量的传递系数或角系数<sup>[3]</sup>。然后通过求解热辐射网络图获得带钢表面的热流密度。

辐射换热模型的建立需要首先确定计算区域,本文以带钢平面为边界,将各列辐射管划分成独立的计算区域,如图4所示,计算区域由相邻行程的带钢、炉衬、辐射管、假想面等构成封闭的空间,如图5所示。在辐射换热模型建立时,需要对辐射管进行简化,对于W

型辐射管,依据辐射管外表面积不变的原则,将辐射管简化为4根I型辐射管,在带钢温度预测模拟软件中,这4根I型辐射管仍然按照一个W型辐射管进行管理,例如辐射管的温度、功率、开启或关闭等参数设置。

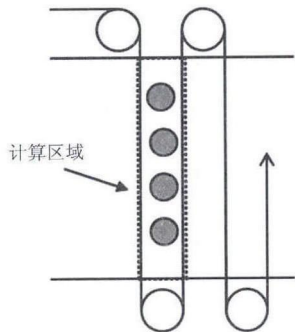


图4 辐射换热计算区域示意图

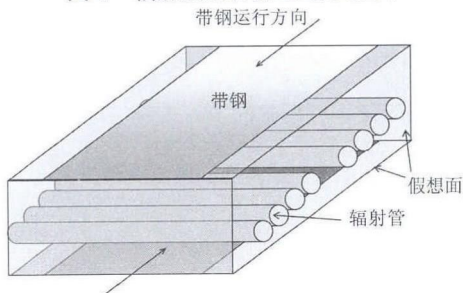


图5 封闭的三维辐射换热空间

如图5所示,将辐射管沿长度方向划分为10个单元,将带钢沿宽度方向划分为10个单元,其中每一个单元作为一个热辐射面(具有均匀的温度分布),通过蒙特卡洛方法,获得各个热辐射面之间的角系数 $f_{ij}$ (表面 $i$ 对 $j$ 的角系数)如图6所示(带钢宽度为1 m的工况)。

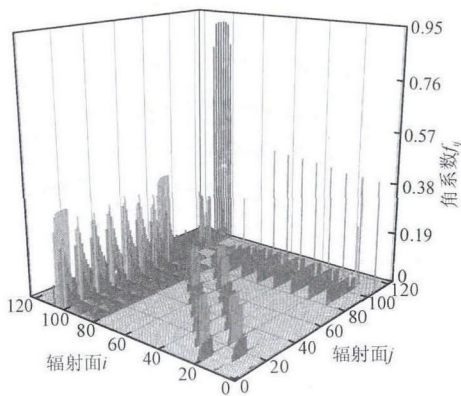


图6 角系数 $f_{ij}$ 计算结果

### 3 炉内非强制对流换热

非强制对流换热是指由于炉内带钢的运动,导致带钢与炉气之间的对流换热。采用圆管内紊流充分发展区的对流换热公式计算炉内带钢的非强制对流换热系数,Sleicher和Rouse<sup>[4]</sup>推荐使用式(4)所示的经验公式。特征尺寸 $L_f$ 取为炉宽 $B_f$ 、带钢行程间距 $H_f$ 的函数,如式(7)所示。

$$Nu=5+0.015Re^aPr^b \quad (4)$$

$$Nu=\alpha \cdot L_f/\lambda_g \quad (5)$$

$$Re=V_s \cdot L_f/\nu_g \quad (6)$$

$$L_f=\frac{4B_fH_f}{2(B_f+H_f)} \quad (7)$$

式中: $a=0.88-0.24/(4+Pr)$ ;  $b=0.333+0.5\exp(-0.6 Pr)$ ;  $\alpha$ 为对流换热系数,  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ;  $\lambda_g$ 为炉气热导率,  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $V_s$ 为带钢速度,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $\nu_g$ 为炉气动力黏度,  $m^2 \cdot s^{-1}$ 。

带钢表面因非强制对流产生的热流密度 $q_{cv}$ 可表示为

$$q_{cv}=\alpha \cdot (T_f-T_s) \quad (8)$$

式中: $T_f$ 为炉温, K。

### 4 炉衬定热流边界条件的计算

炉内衬为定热流边界条件。考虑到退火炉炉体温度分布的具有长期稳定的特点,假定炉外衬散热热流密度与炉内衬热流密度相同,即可以按照自然对流和大空间辐射换热的方式估计炉外衬热流密度,然后作为炉内衬的热流边界。

其中自然对流换热,按照均匀壁温边界条件的大空间自然对流来进行计算,即:认为炉外壁温度均匀,为 $T_w$ 。环境温度为 $T_\infty$ ,那么炉子外壁面(竖壁面)的平均自然对流换热 $Nu$ 数为

$$Nu=C \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (9)$$

式中:流体的定性温度取为边界层的算术平均温度 $T_m=(T_w+T_\infty)/2$ 。对于不同的流动状态,式中的 $C$ 和 $n$ 取值有所不同。当流动为层流时( $1.43 \times 10^4 < Gr < 3 \times 10^9$ ):  $C=0.59$ ,  $n=0.25$ ; 当流动为过渡流时( $3 \times 10^9 < Gr < 2 \times 10^{10}$ ):  $C=0.029 2$ ,  $n=0.39$ ; 当流动为湍流时( $Gr > 2 \times 10^{10}$ ):  $C=0.11$ ,  $n=1/3$ 。

炉外衬的辐射换热,考虑到退火炉通常设置在厂房中,而且,厂房尺寸相对较大,因此,炉外衬的辐射换热按照大空间内的小物体的辐射散热来计算,此时,炉外衬的辐射热流密度为

$$q_w=\varepsilon_w \sigma_0 [(T_w)^4-(T_\infty)^4] \quad (10)$$

式中: $\varepsilon_w$ 为炉外衬的发射率; $\sigma_0$ 为斯特芬波尔兹曼常数,  $5.67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ ;  $T_\infty$ 为厂房温度,可近似取成环境温度。

### 5 数学模型求解

以某一炉段为例对带温计算方法进行讨论。在该炉段中的带钢上选取 $n$ 个等间距的带温节点,第1、 $n$ 点选取在进出口处,其他各点均匀分布在炉内带钢上,如图7所示。

模型计算的基本思路是:在一个时间步长内,对相邻带温节点间的带钢分别按照带钢单元温度跟踪模型

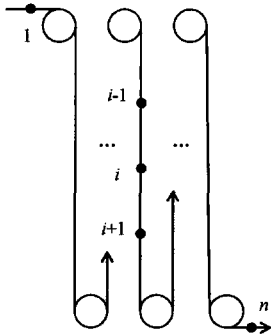


图7 带钢温度节点划分示意图

计算其温度,每一段带钢的初始温度为上一段带钢的上一时刻温度,这样经过 $(n-1)$ 次循环就可以获得在一个时间步长内的整个炉区带温整体分布。

如图7所示,以带温节点 $i-1$ 、 $i$ 、 $i+1$ 为例作一简化推导,即忽略带钢宽度方向的温度差别,而在实际计算时考虑了带钢宽度方向的温度分布。下游节点 $i$ 处的带钢温度 $T_i$ 受到两个因素的影响: $i-1$ 节点处上一时刻带钢温度 $T_{i-1}$ ,带钢从 $i-1$ 节点运动到节点过程中的平均热流密度为 $q_{i-1,i}$ 。假设 $i-1$ 、 $i$ 节点之间的距离为 $\Delta S_{i-1,i}$ ,带钢在 $i-1$ 、 $i$ 节点处厚度分别为 $H_{s,i-1}$ 、 $H_{s,i}$ ,那么经过时间步长 $\Delta \tau = \Delta S_{i-1,i} / V_s$ 后, $i$ 、 $i+1$ 节点的温度可表示为

$$T'_i = T_{i-1} + \frac{q_{i-1,i}}{\rho_s C_{ps} H_{s,i-1}} \cdot \frac{\Delta S_{i-1,i}}{V_s} \quad (11)$$

$$T'_{i+1} = T_i + \frac{q_{i,i+1}}{\rho_s C_{ps} H_{s,i}} \cdot \frac{\Delta S_{i,i+1}}{V_s} \quad (12)$$

式中: $V_s$ 为带钢速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $T'_i$ 、 $T'_{i+1}$ 分别表示 $i$ 、 $i+1$ 节点本时刻的温度,K。

按照上述计算方法,经过 $(n-1)$ 次计算即可获得所有 $T'_i$ 的值,这就是本时刻全炉带钢温度分布,再以该 $T'_i$ 为基础,按照同样的方法计算下一时刻全炉带钢温度。如此往复循环即可获得任意时刻全炉带钢温度分布。

## 6 模型仿真结果分析

如图5所示,设定辐射管温度沿长度方向从左至右温度分布为 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $720\text{ }^{\circ}\text{C}$ 线性分布,设定带钢宽度为 $1.0\text{ m}$ ,带钢厚度为 $0.704\text{ mm}$ ,带钢发射率为 $0.19$ ,带钢入炉温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,带钢运行速度 $120\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在连续热处理炉辐射管加热段,带钢表面热流密度分布如图8所示。由图可见,由于辐射管温度分布不均匀,导致带钢沿宽度方向受热不均匀。带钢在炉内的温度分布如图9所示,加热段出口处带钢宽度方向温度分布如图10所示,带钢宽度方向最大温差约为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

## 7 结 论

建立了带钢连续热处理立式炉辐射管加热段炉内

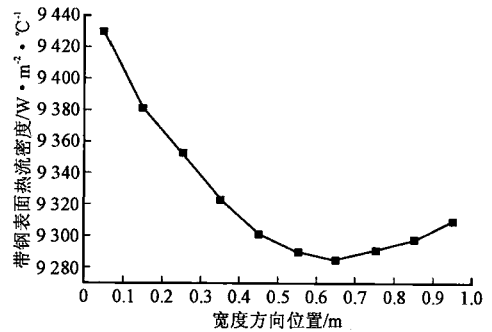


图8 带钢表面热流密度分布

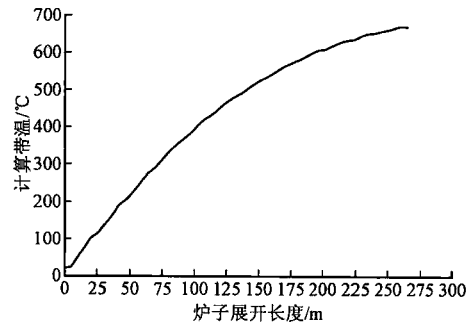


图9 炉内带钢温度分布

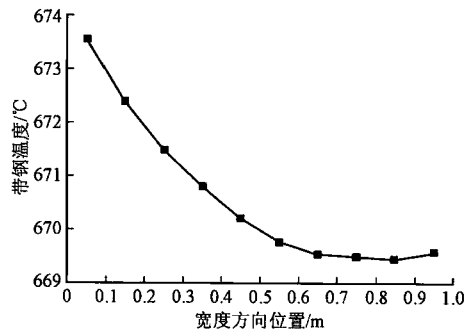


图10 出口处带钢宽度方向温度分布

换热模型,该模型基于蒙特卡洛方法计算辐射换热面之间的角系数,模型将W型辐射管简化为4根I型辐射管,模型考虑了每根辐射管温度分布对带钢宽度方向温度分布的影响,能够定量考察辐射管温度分布对带钢温度均匀性的影响规律,为带钢连续热处理立式炉炉内传热分析奠定了基础。

## 参考文献:

- [1] 李文科,许永贵,赵永生. CAPL均热室供热制度对炉温及带钢热飘曲的影响[J]. 钢铁,1996,31(10):46-54.
- [2] 孙鸿宾,殷小静,杨 晶. 辐射换热[M]. 北京:冶金工业出版社,1996.
- [3] 卞伯绘. 辐射换热的分析与计算[M]. 北京:清华大学出版社,1988.
- [4] SLEICHER C A, ROUSE M W. A Convenient Correlation for Heat Transfer to Constant and Variable Property Fluids in Turbulent Pipe Flow [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1975, 18: 677-683.