

20 429-432

钢(荒)管再加热炉计算机控制数学模型及其应用*

姜泽毅 汪霞 张欣欣

(北京科技大学热能工程系, 北京 100083)

陈晓丹 张海燕

(上海宝山钢铁集团公司钢管公司, 上海 201900)

TG307

TP273

摘 要 以炉内传热机理为基础, 建立了炉内传热简化数学模型. 实验证明, 该模型简化合理, 计算结果可靠. 为满足现场优化控制的要求, 经分析确认钢(荒)管壁厚、钢种、入炉温度和再加热炉的产量为优化控制必须考虑的参数.

关键词 数学模型, 计算机控制, 再加热炉, 钢管

中图分类号 TF062

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2000)04-0429-04

MATHEMATICAL MODEL OF COMPUTER CONTROL IN TUBE REHEAT FURNACE AND ITS APPLICATION

JIANG Zeyi, WANG Xia, ZHANG Xinxin

Department of Energy Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083

CHEN Xiaodan, ZHANG Haiyan

Steel Tube Branch, Baoshan Iron and Steel Group, Shanghai 201900

Correspondent: JIANG Zeyi, lecturer, Tel: (010)62332741

Manuscript received 1999-12-08, in revised form 2000-01-03

ABSTRACT A simplified mathematical model of heat transfer in tube reheat furnace is developed in this paper, which has been proved to meet the requirement of on-line control by comparison with experimental data. Through the analysis for on-line optimum control results, it was shown that the considerable parameters are tube thickness, material, charging temperature and the furnace productivity.

KEY WORDS mathematical model, computer control, reheat furnace, steel tube

位于连轧机后、张力减径机前的钢(荒)管再加热炉, 是无缝钢管生产线上重要的热工设备, 其主要作用是对连轧后的荒管进行再加热, 以保证荒管达到张减工序所需的温度水平. 荒管再加热炉的热工操作和自动控制水平直接影响钢管的产量、最终质量和产品成本. 因此, 荒管再加热炉实现计算机数学模型控制显得尤为重要.

本文对荒管再加热炉主要进行了以下研究: 以炉内传热机理性模型为基础的高线分析和以炉内传热简化模型为基础、以优化控制为目标的在线分析. 为满足现场控制要求, 采用总括热吸收率法简化炉内的传热, 建立了物料跟踪、温度跟踪、温度反馈、优化设定、待轧设定等模块, 对炉子实施在线优化实时控制.

1 荒管再加热炉概况

本文所研究的荒管再加热炉结构参见图1. 其主要热工操作参数如下: 炉子设计产量为160 t/h; 被加热荒管直径为119—163 mm, 长度为10800—33000 mm, 单根最大重量为1160.1 kg; 炉子长为13.32 m, 宽为35 m, 当全炉满料时, 可放荒管46根; 采用的燃料为混合煤气, 其标准热值为9196 kJ/m³, 设计燃料需要量为13028 m³/h; 最高炉膛温度为1020 ℃; 荒管入炉温度为550—800 ℃, 出炉温度为980 ℃, 出炉断面温差±10 ℃; 最快生产节奏为每小时270根, 相当于每根间隔13.3 s; 出料侧端墙上配置34只燃烧器, 分为6个控制段, 按加热长、中、短管不同情况分别进行控制.

2 炉内传热数学模型

2.1 模型的简化条件

根据荒管再加热炉的具体情况和在线控制的要求, 模型建立中采用如下简化条件:

* 收到初稿日期: 1999-12-08, 收到修改稿日期: 2000-01-03

作者简介: 姜泽毅, 男, 1973年生, 讲师, 博士生

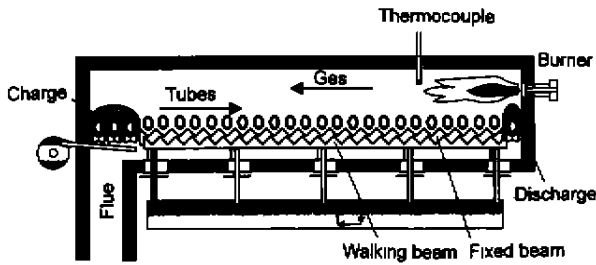


图1 荒管再加热炉结构示意图
Fig.1 The sketch of the tube reheat furnace

(1) 以炉子燃烧控制段为基础，将炉子沿宽度方向分成6个计算区段。所分区段内的炉温分布根据炉内热电偶的采样值和出炉烟气温度的采样值确定；

(2) 为提高计算速度，在控制模型中，忽略各区间间辐射换热的影响，并根据离线分析结果，修正各段内荒管表面热流值，以补偿端部效应；

(3) 考虑到荒管在步进的同时实现自动滚翻，故可忽略荒管沿周向温度分布的不均匀性，将荒管的内部传热视为沿半径 r 方向的一维不稳态导热；

(4) 在控制模型中，炉内换热采用总括热吸收率法进行计算，并综合考虑炉衬、炉气以及步进梁和固定梁对传热的影响；

- (5) 忽略荒管表面氧化对传热的影响；
- (6) 忽略荒管内表面的热流，按绝热表面处理；
- (7) 炉衬、梁及荒管表面的黑度视为常数。

2.2 荒管内部导热数学模型

荒管加热过程的内部导热计算采用一维柱面坐标形式的 Fourier 导热微分方程描述为

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (R_1 < r < R_2, \tau > 0) \quad (1)$$

$$T(r) = T_0 \quad (R_1 \leq r \leq R_2, \tau = 0) \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (r = R_1, \tau > 0) \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = q \quad (r = R_2, \tau > 0) \quad (4)$$

式中， r 为径向坐标变量， m ； τ 为时间变量， s ； T 为荒管的温度， K ； λ 为荒管的导热系数， $W/(m \cdot K)$ ； ρ 为荒管的密度， kg/m^3 ； c_p 为荒管的比热容， $J/(kg \cdot K)$ ； q 为热流密度， W/m^2 ； T_0 为初始温度， K ； R_1 和 R_2 分别为荒管的内、外径， m 。

2.3 炉膛传热数学模型

为适应在线控制的要求，炉膛传热计算以热电偶温度为基准，采用总括热吸收率法^[1]计算荒管表面的热流密度 q ，其表达式为

$$q = K \epsilon_b \epsilon_f \sigma (T_b^4 - T_f^4) + \alpha (T_b - T_f) \quad (5)$$

式中， T_b 为荒管表面温度， K ； T_f 为炉温， K ； K 为调试系数； α 为对流传热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ； ϵ_b 为荒管表面黑度； ϵ_f 为炉衬表面黑度； σ 为 Stefan-Boltzmann 常数， $W/(m^2 \cdot K^4)$ 。

3 模型计算结果的分析及讨论

3.1 数学模型的验证

以荒管出炉温度的实测数据验证在线控制数学模型的预报结果，如图2所示。图中实线代表模型计算的荒管出炉温度，离散点代表测得的实际出炉温度。从图可以看出，数学模型的计算结果与实测结果基本相同，能够满

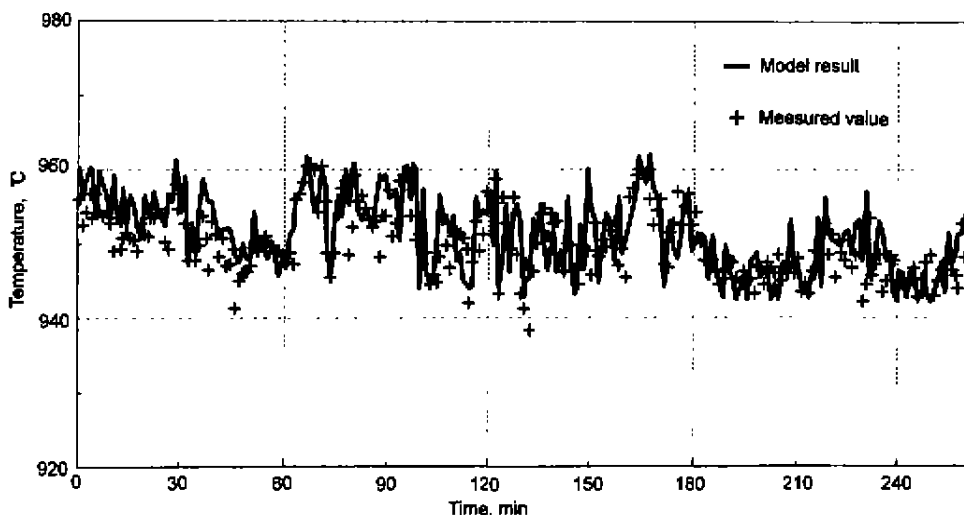


图2 数学模型的验证
Fig.2 Validation of mathematical model

足在线控制的精度要求。

该数学模型是荒管再加热炉计算机优化控制系统的重要组成部分, 结合荒管物料跟踪模型、炉温优化设定模型、出炉温度反馈控制模型等共同完成荒管再加热炉的数模优化控制, 已在在线控制应用中取得明显的经济效益。

3.2 计算结果分析

结合现场的实际生产情况, 分析荒管尺寸、钢种、入炉温度和生节奏等因素对荒管加热质量的影响。选定的基准计算条件如下: 荒管的直径为 152 mm, 壁厚为 9.75 mm, 入炉温度为 700 °C, 钢种为低碳钢, 进节奏为每根 20 s。

图 3 为荒管壁厚的变化对荒管升温过程和径向温差的影响(横轴代表在炉位置)。由图可见, 管壁越厚, 升温速度越慢, 所需加热时间越长, 径向温差也越大, 且影响较为明显。

图 4a 为荒管直径 d 的变化对升温过程的影响。由图可见, 荒管直径对其升温过程的影响不大。综合图 3, 4a 可知, 从荒管尺寸规格角度考虑, 壁厚是影响荒管加热质量的主要因素, 而直径对加热质量影响较小, 因而优化控制的重点应放在不同壁厚荒管的加热质量上。

图 4b 为不同钢种的加热情况。从图可见, 低、中、

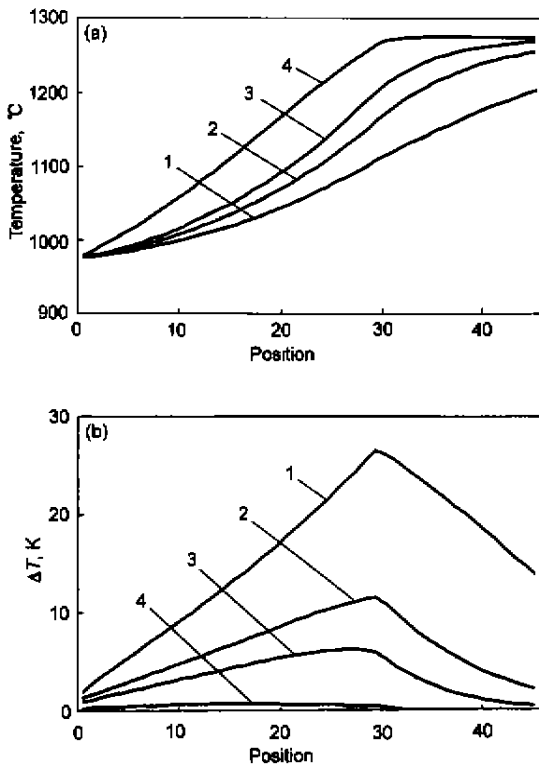


图 3 壁厚对荒管升温及径向温差的影响

Fig.3 Effects of tube thickness on temperature rise (a) and temperature difference along radial direction (b)
1—25 mm 2—13.75 mm 3—9.75 mm 4—3.25 mm

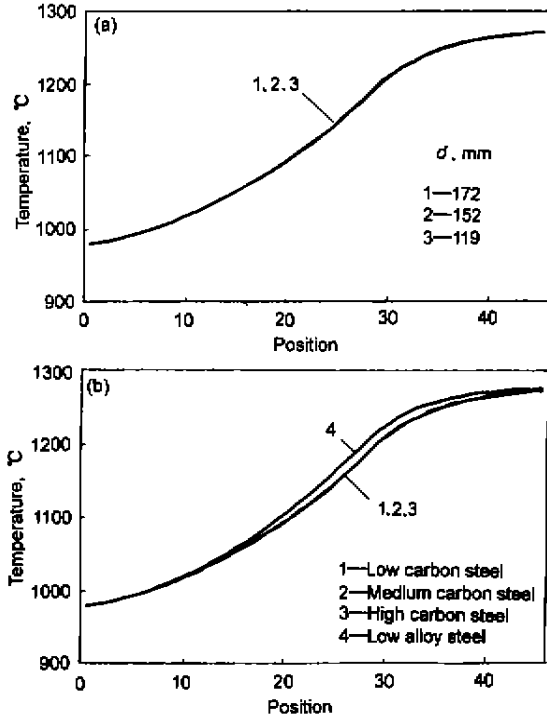


图 4 荒管直径以及钢种对升温过程的影响

Fig.4 Effects of tube diameter, d , (a) and material sort (b)

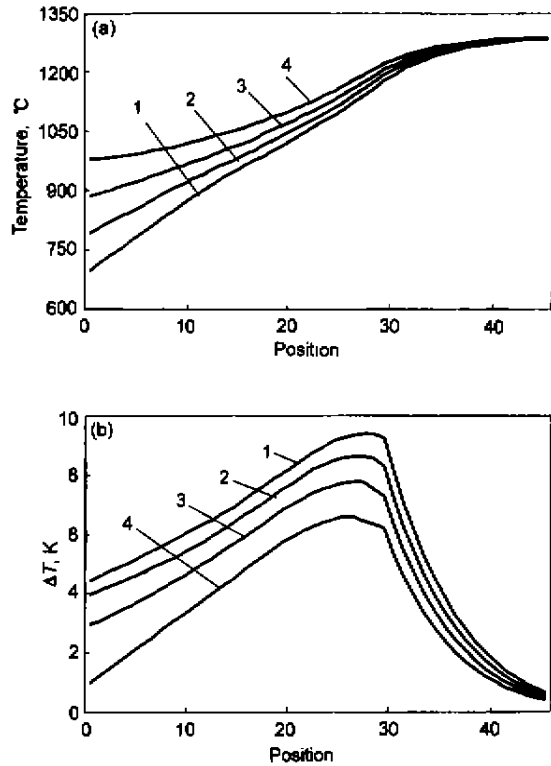


图 5 入炉温度对荒管升温过程及径向温差的影响

Fig.5 Effects of charging temperature on temperature rise (a) and temperature difference along radial direction (b)
1—673 K 2—773 K 3—873 K 4—973 K

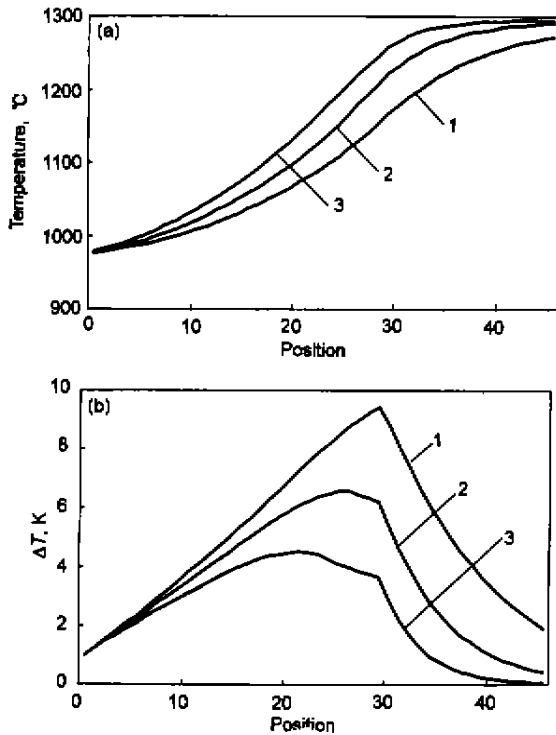


图6 生产节奏对升温过程及径向温差的影响

Fig.6 Effects of productivity on temperature rise (a) and temperature difference along radial direction (b)

1—13 s 2—20 s 3—30 s

高碳钢和低合金钢的热物理性质有一定的差别, 故加热曲线略有不同, 但总的来看, 钢种的变化对加热质量影响不大, 但实际生产中, 不同钢种工艺要求的出炉温度不同, 因此钢种也是影响优化控制的参数。

图5为荒管入炉温度变化对荒管升温过程和径向温差的影响。由图可见, 荒管入炉温度越高, 荒管加热速度越快, 径向温差越小, 即加热质量越好; 相反, 荒管入炉温度越低, 加热质量越差。这在生产节奏较快时更为明显。

图6为生产节奏对荒管加热质量的影响。步进节奏分别取每根13, 20和30 s。由图可见, 步进节奏越慢, 荒管出炉温度越高, 径向温差越小, 即加热质量越好; 步进节奏越快, 加热质量越差。在实际生产中, 应考虑生产节奏的变化对荒管加热质量的影响。

4 结论

建立了荒管再加热炉在线优化控制荒管温度跟踪的数学模型, 经验证数学模型准确可靠。利用该模型对荒管的加热过程进行了分析, 结果表明: 荒管壁厚、钢种、入炉温度和再加热炉步进节奏是影响荒管热状态的主要参数, 在优化控制中必须给予考虑。

参考文献

- [1] Yang Z K, Kang G R. *Iron Steel*, 1990; 25(12): 59
 (杨泽宽, 康国仁. 钢铁, 1990; 25(12): 59)