

全氢罩式退火炉退火热过程的研究(I)

——数学模型及其实测验证

林林¹⁾ 张欣欣¹⁾ 左焱¹⁾ 向顺华²⁾ 刘铁树²⁾ 钮龙英²⁾ 黄夏兰²⁾

1)北京科技大学机械工程学院,北京 100083 2)宝钢研究院设备研究所,上海 201900

摘要 分析了全氢罩式退火炉退火工艺过程的传热特点,建立了以板卷温度计算为核心的退火热过程数学模型,通过模拟计算得到了钢卷退火曲线,并与实测值进行了对比验证.结果表明,该数学模型合理、可靠.

关键词 全氢罩式退火炉;数学模型;传热

分类号 TG 155; TF 061.2; TF 061.2

全氢罩式退火炉(简称全氢炉)生产的产品具有深冲性良好、表面光洁、生产率高等优点^[1],中国钢铁企业已从奥地利 EBNER 和德国 LOI 公司分别引进了这种先进的全氢炉.从目前的使用情况看,由于还没有完全掌握全氢炉退火过程的核心技术,特别是模型软件技术,在高技术、高附加值产品的进一步开发过程中,因此无法自主地确定退火工艺过程,也无法对罩式炉车间进行优化调度.可见,深入研究全氢炉退火工艺的传热过程,建立退火过程传热的数学模型,对进一步消化和吸收国外先进技术,开发自主使用的全氢炉具有十分重要的意义.

1 退火热过程分析

1.1 全氢退火炉热工操作分解

根据全氢炉内的传热情况,整个退火过程可分为加热和冷却两大过程.其中,加热过程又可细分为加热和均热两个阶段.加热阶段从吊盖加热罩,燃烧器点火开始,到循环气体温度达到规定的退火工艺温度(如 710℃)结束.均热阶段从加热阶段结束开始,在规定的退火工艺温度下进行保温,直到同时满足以下两个条件时结束:①钢卷达到工艺所需的温度(如 710℃);②钢卷内

外部温差满足要求(一般要求小于 30℃,随不同钢种有小范围波动).

冷却过程可细分为带加热罩冷却、辐射冷却、带冷却罩冷却和快速冷却四个阶段.带加热罩冷却从均热阶段后的热态密封试验结束开始,这时停止燃气供应,由烧嘴中喷射常温空气直接冷却内罩,达到冷却钢卷的目的.当炉内控制热电偶温度达到 600℃时,结束带加热罩冷却,移走加热罩.从移走加热罩到吊盖冷却罩一般约有 12 min 的等待时间.在这一时间段内,内罩的散热方式为对环境的辐射和自然对流,称为辐射冷却阶段.扣上冷却罩后,开始带冷却罩冷却.此阶段中,由大流量、高流速的冷风对内罩进行冷却.当炉内控制热电偶的温度达到一定值(根据不同的快冷方式,此温度为 300~450℃不等)时,启动快速冷却装置,进行快速冷却.在快速冷却阶段中,除冷却罩内进行的循环空气冷却外,还采用快冷方式加速钢卷的冷却.通常有两种快速冷却方式,即氢气旁路冷却(将内罩内的循环氢气按比例抽取通过气/水换热器冷却后,再输入炉内,以快速降低循环氢气的温度)和水喷淋冷却(从冷却罩顶部直接向内罩喷水进行冷却).当钢卷达到规定的出炉温度时,结束此过程,也即结束整个退火过程.

1.2 退火各阶段传热分析

在整个退火过程中,内罩内的传热(见图 1

收稿日期 2002-06-19 林林 男,35岁,讲师,博士研究生

* 国家自然科学基金资助项目(No.50136020)

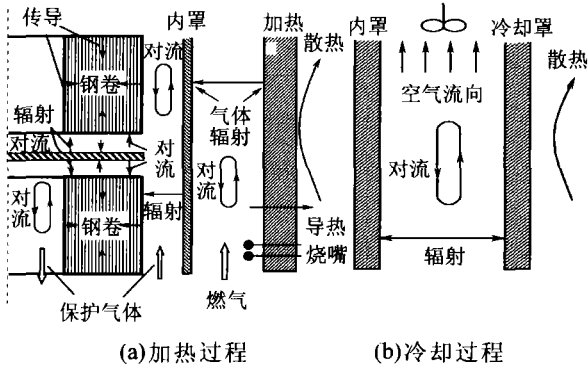


图1 退火过程传热分析

Fig.1 Schematic diagram of heat transfer mechanisms during the annealing process

(a)主要包括:内罩与钢卷的辐射换热,氢气与钢卷及内罩的对流换热,钢卷内部传热.加热过程中,加热罩内的传热(见图1(a))包括:高温烟气与内外罩的对流与辐射换热,内外罩表面的辐射换热,加热罩外表面散热,加热罩壁的导热.冷却过程中,冷却罩内的传热(见图1(b))包括:空气与内外罩的对流换热,内外罩表面间的辐射换热,冷却罩外表面散热.另外,根据不同快冷方式,快冷阶段还要附加部分氢气或内罩与冷却水的换热.

需要说明的是,通过估算可知内罩和冷却罩的毕欧准数均小于0.1^[1],所以可将内罩和冷却罩作为薄材处理.

2 传热数学模型

2.1 钢卷内部导热数学模型

全氢炉内第*i*卷钢轴对称坐标系统如图2所示.板卷内部导热方程为:

$$(\rho_s C_{p,s}) \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_r \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_s \frac{\partial T_i}{\partial z} \right) \quad (1)$$

初始条件($t=0$):

$$T_i(r, z) = T^0, \quad (R_i^0 \leq r \leq R_i^e; 0 \leq z \leq W_i) \quad (2)$$

边界条件($t > 0$):

$$\begin{cases} -\lambda_s \frac{\partial T_i}{\partial r} \Big|_{r=R_i^e} = h [T_{H_2} - T_i(R_i^e, z)] + q_r^e & (r=R_i^e, 0 \leq z \leq W_i) \\ +\lambda_s \frac{\partial T_i}{\partial r} \Big|_{r=R_i^0} = h [T_{H_2} - T_i(R_i^0, z)] + q_r^0 & (r=R_i^0, 0 \leq z \leq W_i) \\ -\lambda_s \frac{\partial T_i}{\partial z} \Big|_{z=0} = h [T_{H_2} - T_i(r, 0)] + q_k^0 & (z=0, R_i^0 \leq r \leq R_i^e) \\ -\lambda_s \frac{\partial T_i}{\partial z} \Big|_{z=W_i} = h [T_{H_2} - T_i(r, W_i)] + q_k^e & (z=W_i, R_i^0 \leq r \leq R_i^e) \end{cases} \quad (3)$$

式中, ρ_s 为钢的密度, kg/m^3 ; $C_{p,s}$ 为钢的质量热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; λ_s 为钢卷轴向导热系数,即钢的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; λ_r 为钢卷径向等效导热系数,

$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; T_i 为第*i*卷钢的温度, $^\circ\text{C}$; h 为氢气与钢卷表面的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; q_r 为内罩与钢卷表面的辐射热流密度, W/m^2 ; 上角标0代表初始值;下角标 H_2 代表氢气;角标*i*, *o*, *b*, *t*分别代表钢卷内、外、下、上四个表面.

2.2 钢卷外部传热数学模型

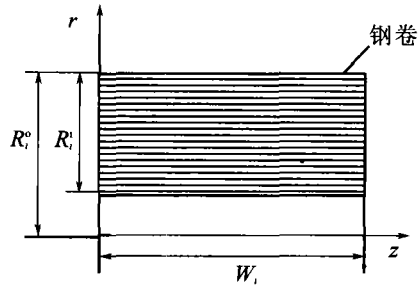


图2 第*i*卷钢卷导热坐标系统

Fig.2 Coordinate system for the equation (1)

钢卷温度场的计算与氢气、内罩、炉气、废气及加热罩的温度变化密切相关,特别是氢气温度和内罩温度,直接为钢卷导热微分方程提供边界条件.

(1)内罩温度的计算.

由于内罩可视为无限薄材,应用集总参数法计算内罩温度:

$$(\rho C_p V)_{ic} \frac{dT_{ic}}{dt} = Q_{ic}^n - Q_{ic}^m \quad (4)$$

且

$$T_{ic} = T_{ic}^0 \quad (t=0) \quad (5)$$

式中, Q_{ic}^n 和 Q_{ic}^m 分别为内罩得到和损失的热量, W ;下角标IC代表内罩.

(2)氢气温度的计算.

氢气温度的集总参数法控制方程为:

$$(\rho C_p V)_{H_2} \frac{dT_{H_2}}{dt} = Q_{H_2}^n - Q_{H_2}^m \quad (6)$$

且

$$T_{H_2} = T_{H_2}^0 \quad (7)$$

式中, $Q_{H_2}^n$ 和 $Q_{H_2}^m$ 分别为氢气得到和失去的热量, W .

(3)辐射热流密度.

由于氢气不参加辐射换热,因此式(3)中辐射热流密度 q_k^k 的计算相对比较简单,这里角标*k*分别代表钢卷内、外、下、上四个表面,有:

$$q_k^k = \epsilon_{ic-M} \sigma (T_{ic}^n - T_{M,k}^n) \quad (8)$$

式中, σ 为玻尔兹曼常数, 5.67×10^{-8} ;对钢卷外表面, $T_{M,k}$ 为钢卷外表面平均温度, K ;对钢卷内表面和上、下表面, $q_k^k=0$;对顶部钢卷上表面, $T_{M,k}$ 为钢

卷上表面平均温度。

2.3 内罩外的传热描述

内罩外的传热涉及高温炉气(或冷却空气)、环境与内罩、加热罩(或冷却罩)之间的传热,与钢卷退火工艺的传热过程的模拟密切相关。

(1) 炉膛热平衡与炉气温度的计算。

加热过程中,使用“充分搅拌”零维模型计算炉气温度,即假设在炉膛内不存在温度梯度和浓度梯度,炉膛内为温度均匀的燃烧产物气体区,因此可根据炉膛热平衡计算炉气的温度。

单位时间内的炉膛热平衡表达式为:

$$Q_r + Q_f + Q_a = Q_{s-ic} + Q_{s-hh} + Q_w + Q_o \quad (9)$$

式中各项依次为燃料燃烧的化学热、燃料带入的物理热、空气带入的物理热、炉气通过辐射与对流传给内罩的热量、炉气通过辐射与对流传给加热罩的热量、排烟带走的物理热、其他热损失, W; 其中 Q_o 占总热量的比例为常量。

(2) 加热罩温度的计算。

加热罩内部导热方程为:

$$(\rho C_p)_{HH} \frac{\partial T_{HH}}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_{HH} \frac{\partial T_{HH}}{\partial r} \right) \quad (10)$$

初始条件 ($t = 0$):

$$T_{HH}(r, 0) = T_{HH}^0, \quad (R_{HH}^i < r < R_{HH}^o) \quad (11)$$

边界条件 ($t > 0$):

$$\begin{cases} -\lambda_{HH} \frac{\partial T_{HH}}{\partial r} = q_{s-HH}^{CV} + q_{s-HH}^R - q_{HH-ic}^R & (r = R_{HH}^i) \\ -\lambda_{HH} \frac{\partial T_{HH}}{\partial r} = q_{HH-\infty}^{CV} + q_{HH-\infty}^R & (r = R_{HH}^o) \end{cases} \quad (12)$$

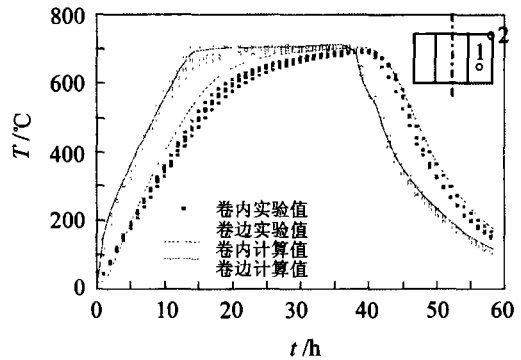
式中,下角标 HH 表示加热罩; q 为表面热流密度,上角标 CV 和 R 分别表示对流和辐射。

3 钢卷加热制度及数学模型验证

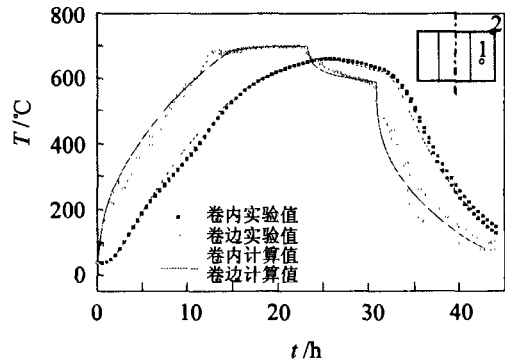
钢卷退火曲线的模拟计算是全氢炉退火热过程数学模型开发的根本目标与核心任务。通过模拟计算可以建立不同钢种、不同规格、不同炉况条件下冷轧钢卷的退火制度,指导退火工序生产,并为实现炉群退火的在线控制和调度优化提供基础。

为了验证所开发的数学模型的合理性和计算程序的正确性,分别对三种不同钢种、不同装炉量的冷轧板卷的退火过程进行了测试。如图 3 所示,分别测试了不同位置板卷的内部温度和表面温度随退火时间的变化,并与模拟计算结果进行了对比。验证结果表明,在不同钢种、不同装炉量的条件下,模拟计算结果与实测数据都有较好

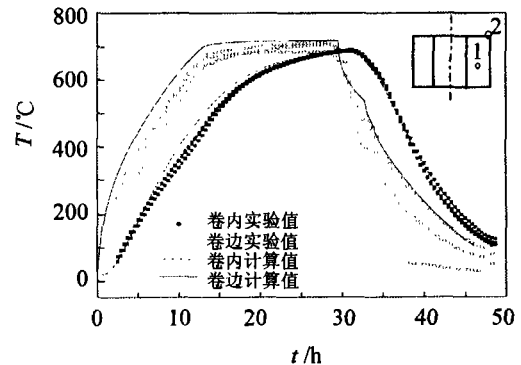
吻合,说明本文的数学模型及其模拟计算软件可靠。



(a) 装炉量为 122, 120 kg 的对比验证



(b) 装炉量为 52, 640 kg 的对比验证



(c) 装炉量为 74, 160 kg 的对比验证

图 3 不同装炉量下计算值与实测值的对比验证
Fig.3 Comparison of the calculated values with experimental data for different coils charges

4 结论

建立了以板卷温度计算为核心的全氢罩式退火炉退火热过程的数学模型,得到了不同规格、不同钢种、不同装炉量的钢卷退火曲线。通过与钢卷温度实测值的对比验证,说明模型计算结果合理、可靠。本文提出的数学模型及其计算软件可以用于分析全氢罩式退火炉的工作状况,建立不同钢种的退火工艺曲线,为进一步实现罩式

炉群在线控制和调度优化提供理论基础。

参 考 文 献

- 1 左隸. 全氢罩式退火炉退火热过程数学模型和数值模拟的研究[D]. 北京:北京科技大学, 2001
- 2 LOI. HPH Bell-Type Annealing Plants for Recrystallizing and Bright Annealing Steel Coils in a Hydrogen Atmosphere[M]. LOI ESSEN Industrieofenanlagen, 1996
- 3 Wirtnik K P. High-performance hydrogen annealing [J]. Heat Treatment of Metals, 1990(1): 1
- 4 Enghofer R A, Mueller T E, Kuzdal J L, et al. Experience with 100% hydrogen annealing at LTV's Indiana Harbor No.3 sheet mill [J]. Iron and Steel Engineer, 1990, 67(3): 25
- 5 左隸, 武文斐, 张欣欣, 等. 全氢罩式退火炉退火热过程传热的研究[J]. 工业加热, 2000(6): 9
- 6 Zuo Yi, Wu Wenfei, Zhang Xinxin. A study of heat transfer in high-performance hydrogen bell-type annealing furnaces [J]. Heat Transfer-Asian Research, 2001, 30(8): 615
- 7 周筠清. 传热学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992

Investigation on Annealing Thermal Process of HPH Furnace (I): Mathematical Model

LIN Lin¹⁾, ZHANG Xinxin¹⁾, ZUO Yi¹⁾, XIANG Shunhua²⁾, LIU Tieshu²⁾, NIU Longying²⁾, HUANG Xialan²⁾

1) Mechanical Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Equipment Research Dept, Shanghai Baosteel Research Institute, Shanghai 201900, China

ABSTRACT The characteristics of heat transfer were discussed for annealing thermal processes in HPH furnace. A mathematical model was proposed to calculate the annealing curves of rolled coils. The calculated results were compared with experimental data. It is shown that the mathematical model is reasonable and reliable to the heat transfer for annealing thermal processes HPH furnace.

KEY WORDS HPH furnace; mathematical model; heat transfer