

文章编号:1000-582X(2003)10-0060-03

钢筋轧后控制冷却的数学模型*

吕立华¹, 陈国金¹, 黄孟奎², 王学柱²

(1. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044; 2. 新兴铸管有限责任公司轧钢分厂, 河北邯郸 056300)

摘要:通过对热轧棒材进行在线热处理既可以提高强度, 又可以降低成本, 是近年来发展较快的一项新工艺, 通常被称为热芯回火工艺, 也称为穿水冷却工艺。介绍了穿水冷却控制过程, 并对这一控制过程的核心问题冷却数学模型进行了探讨。根据螺纹钢轧后冷却过程中的热交换特点, 从理论上进行分析与推导, 并利用数学方法进行简化, 得到结构简单实用的两个数学模型: 始冷温度预报模型和冷却水量模型。该模型对现场环境变化适应性强, 有自学习能力实用于现场控制。

关键词:数学模型; 钢筋; 控制冷却

中图分类号: TG156.3

文献标识码: A

利用钢筋轧后余热对钢筋进行热处理的工艺又称为热芯回火工艺, 国内也称为穿水冷却工艺^[1]。该项技术是近年来发展较快的一项新技术, 它可以在降低炼钢成本(少添加合金元素)的情况下, 通过对热轧棒材进行在线热处理从而提高棒材强度。这种工艺是根据钢种、规格、自回火目标温度、实测开始冷却温度和进水温度, 计算并规定所需的冷却水量, 对轧后钢筋进行冷却, 以达到规定的自回火温度范围, 提高钢筋的机械性能。在这一工艺中, 十分重要的环节是控制数学模型的建立。这决定了最终的控制目标的稳定与否^[2]。笔者根据工厂的实际冷却条件, 理论推导出了现场带肋钢筋在轧后冷却过程中的两个数学模型, 建立了描述各参数之间关系的理论公式并加以简化, 结合工厂的实测数据, 研制成了实用控制数学模型。

1 穿水冷却工艺控制过程

半成品钢筋进入精轧机组后, 通过设置在精轧机组进口的高温计连续测量轧件的温度并同时反馈到主控 PLC 中, 通过相应的数学模型计算, 预测轧件的终轧温度, 并由此调整压力水泵站的水量和水压, PLC 向压力水泵站发出指令, 调节压力水电动阀门的开或关。通过设置在终轧机后, 冷却区前的高温计连续测量钢筋温度, 同时反馈到主控 PLC 中, 经过钢筋终轧温度实测值和预测值对比, 对钢筋冷却温度数学模型进行自适应调整, 实时调节压力水泵站的水量和水压, 同时也可以通过 OP27 操作面板人工干预, 实时调节水量

和水压。

钢筋从终轧机出来后, 进入穿水冷却区进行高效、强制冷却, 钢筋表面温度急剧降至 400 °C 以下, 钢筋表面层产生马氏体转变, 形成淬火马氏体, 而心部仍然是奥氏体组织, 钢筋经倍尺飞剪分段剪切后上冷床进行空冷。由于钢筋截面上温度梯度大, 心部热量向表面传导, 使表面层淬火马氏体发生回火转变, 形成回火马氏体, 心部奥氏体组织形成细珠光体和细铁素体, 进入自回火阶段, 最后使心部和表面温度趋于一致。

钢筋在冷床上移送过程中, 通过设置冷床高温计 3 测量的温度反馈到主控 PLC 中, 主控 PLC 据得到的钢筋温度进行计算, 预测钢筋的机械性能, 根据钢筋不同强度级别的要求, 粗略的调节压力水泵站的水量, 水压, 以得到同一强度级别的高强度钢筋。其控制流程图见图 1。

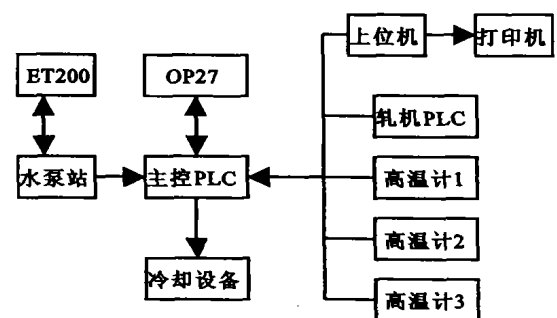


图 1 穿水冷却工艺控制流程图

* 收稿日期: 2003-06-11

作者简介: 吕立华(1946-), 女, 陕西华县人, 重庆大学副教授, 从事轧制基础理论和控轧控冷的教学和研究。

2 数学模型的设计思想

建立数学模型的目的是找出各个工艺参数与自回火温度的关系,按照自回火温度的要求,通过数学模型来设定各工艺参数。

轧后控制冷却的数学模型有两种,一种是理论数学模型,另一种是实用数学模型。理论数学模型一般包括3个模型:始冷温度预报模型,预报钢筋进入冷却管前的温度;水量设定模型,设定水量,对钢筋进行合理冷却;自回火温度模型,确定钢筋经过水冷后得到的自回火温度。

3 始冷温度预报模型

在建立模型时,需要选择预报点对钢温进行检测,应将此点选在精轧组之前。因此,钢筋在冷却前要在精轧组机内轧制,从预报点到穿水冷却装置,钢筋的热交换包括:

- 1) 钢筋在空气中的辐射和对流。
- 2) 运行和轧制时与辊道和轧辊的冷却水接触而产生的对流热交换。
- 3) 轧制过程中产生的变形热。

如果把上述因素都考虑在内,势必引起过程复杂化。由于钢在终轧前,轧件的温度高达1000℃左右。所以钢的散热以辐射为主。在此阶段,轧件与空气的对流换热与冷却水的接触而产生的对流换热则很少。且钢在轧制时产生的变形热是增热过程,这样,可以认为后三项相互抵消而忽略不计,而以该过程以辐射换热计算为主进行推导。

辐射换热遵循 Stenfan - Boltzman^[3] 定律,所以以辐射所造成的热量损失 dQ 为:

$$dQ = \varepsilon\sigma \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{100} \right)^4 \right] Fdt \quad (1)$$

式中: F 为钢筋的辐射面积, m^2 ; ε 为钢筋的辐射系数; σ 为 Stenfan - Boltzman 常数; T 为钢筋的绝对温度, K ; t 为辐射时间, h 。

由此热量损失造成的钢筋温度下降 dT 与 dQ 的关系为:

$$dQ = -Gc_p dT \quad (2)$$

式中: G 为钢的重量, kg ; c_p 为钢的比热, $kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ 。

所以热平衡方程应为:

$$-Gc_p dT = \varepsilon\sigma \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{100} \right)^4 \right] Fdt \quad (3)$$

对上式进行整理并积分后可得:

$$T_2 = \left(\frac{6\varepsilon\sigma t_1}{100^4 c_p \rho R} + (T_1 + 273)^{-3} \right)^{-\frac{1}{3}} - 273 \quad (K) \quad (4)$$

式中: T_1 为精轧机入口处钢筋的温度; T_2 为穿水冷却装置入口处钢筋的温度; t_1 为钢筋从精轧机入口到穿水冷却装置入口处的时间。

在该过程当中,钢筋的半径 R 由精轧第一道次到最后一道次是逐道次变化的,但每一道次的 R 可看成是一定值,为简化模型,可将式(4)中的 R 用当量计算,即

$$R = (R_1 + R_2 + \dots + R_n) / n \quad (5)$$

式中: n 为轧制道次。

因此,对特定规格的钢筋, $\sigma, \varepsilon, c_p, R, \rho$ 均为常量。预报点和冷却器间距固定,轧速恒定或有微小变化,也可做常数。因此, t_1 可当作常数,故温度预报模型可简化成下式:

$$T_2 = (A + (T_1 + 273)^{-3})^{-\frac{1}{3}} - 273 \quad (K) \quad (6)$$

这里 A 为常数, $A = 6 \times 10^{-8} t_1 \varepsilon \sigma / c_p \rho R$ 。

4 冷却水量模型

在此过程中,钢筋通过穿水冷却装置进行冷却,钢筋的传热方式为:强制对流传热;钢筋表面形成的蒸汽膜所进行的辐射传热。

4.1 基本假设

1) 开始冷却时钢筋横截面上温度分布均匀。2) 沿着钢筋长度方向的热传导同整体热流量相比很小,可以忽略不计。3) 循环冷却水的温度基本保持不变。4) 钢筋长度远大于直径,使用无限长圆柱体不稳定传热公式计算。

4.2 数学描述

4.2.1 导热偏微分方程

由于钢筋不含内热源,周围温度均匀,只考虑径向热传导。由无限长圆柱体不稳定传热公式有^[3]:

$$\frac{\partial T}{\partial t_2} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (7)$$

$$0 \leq r < R, 0 < t_2 \leq t_3$$

式中: R 为钢筋半径; r 为半径 0 到 R 的变量; t_2 为传热时间; t_3 为钢筋穿过冷却管所需的时间(该时间取决于钢筋在冷却管内的运行速度。冷却管的长度固定); α 为温系数, m^2/s ; $\alpha = k/\rho c_p$ (k 为导热系数, $W/m \cdot s \cdot K$; c_p 为钢筋的比热, $W/kg \cdot K$; ρ 为钢筋的密度, kg/m^3)。

4.2.2 初始条件和边界条件

初始条件:

$$T = T_2, 0 \leq r \leq R, t_2 = 0 \quad (8)$$

式中: T_2 为钢筋进入冷却管时的温度,此时沿钢筋径向温度均匀,不存在温度梯度;

边界条件:钢筋表面的传热情况属于第三类边界条件。

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = h(T - T_A), r = R, 0 < t_2 \leq t_1 \quad (9)$$

式中: T_A 为外部冷却水的温度; h 为综合传热系数。

4.3 理论数学模型的建立

以数学分析为基础求解定解问题, 得到用函数形式表示偏微分方程(7), (8), (9) 的理论解如下^[4]:

$$\frac{T - T_A}{T_2 - T_A} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2J_1(\mu_n)J_0(\mu_n \frac{r}{R})}{\mu_n [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]} e^{-\mu_n^2 \frac{a_2 t_2}{R^2}} \quad (10)$$

在式(10)中: $J_1(\mu_n)$, $J_0(\mu_n \frac{r}{R})$ 分别是第一类的一阶和零阶贝塞尔函数;

μ_n 由下式确定:

$$\frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)} = \frac{\mu}{B_i} \quad (B_i = \frac{hR}{k}; \mu = \lambda R)$$

由于初始和边界条件的复杂性, 理论数学模型求解过程很复杂, 虽然得出的是温度场的精确解, 但精确解的表达式非常复杂, 包含有级数形式, 很难得到实际的数值。因此必须对该理论解做进一步的数学假设和简化。

令

$$D = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2J_1(\mu_n)J_0(\mu_n \frac{r}{R})}{\mu_n [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]} e^{-\mu_n^2 \frac{a_2 t_2}{R^2}} \quad (11)$$

故 $T = D(T_2 - T_A) + T_A$
钢筋穿过冷却管时的换热满足牛顿冷却定律:

$$Q = hF_1(T - T_w) \quad (12)$$

式中: T_w 为冷却水在冷却钢筋后的温度; F_1 为换热面积。

由式(11)和式(12)可得热平衡方程为:

$$Mc_{p1}(T_w - T_A) = hF_1[D(T_2 - T_A) - (T_w - T_A)]$$

所以

$$M = \frac{hF_1 D}{c_{p1}(T_w - T_A)}(T_2 - T_A) - \frac{hF_1}{c_{p1}} \quad (13)$$

式中: M 为冷却水总量, kg。

$$\text{令 } \frac{hF_1 D}{c_{p1}(T_w - T_A)} = m, \frac{-hF_1}{c_{p1}} = n$$

则有:

$$M = m(T_2 - T_A) + n \quad (14)$$

式(14)即为理论水量设定模型, 其中 m 为一个与冷却时间、换热系数、比热容、钢筋半径等有关的系数, 在实际工程中很难得到, n 为一常数。

4.4 实用水量设定模型的建立

工业生产中, 直接使用理论模型进行在线控制, 因许多参数很难准确测定, 影响控制精度。因此, 这种数学模型在实际生产中很不现实。但是, 通过理论数学模型, 笔者对轧后控冷的钢筋的温度场的变化更加了解, 从而为推导出实用数学模型奠定了基础。为使使用性

强, 计算量小, 笔者采用统计回归模型, 而用理论模型做指导, 使实用模型结构更为合理^[5]。

由式(11)可见, $T_2 > T_A$, 因此, 可看成冷却水量与 T_2 成线性关系。考虑到控制的目标量为钢筋的自回火温度, 所以, 在冷却水量设定时, 必须反映它的影响。因此, 水量设定模型的结构式为:

$$M = A_1 T_2 + A_2 T_H + h$$

式中: T_H 为自回火温度。

4.5 模型的自学习

对于不同规格的钢筋, 因钢筋直径和冷却时间不同, 应分别建立相应的控制模型。由于实际生产的复杂性, 模型中不可能包含所有影响因素。为了提高控制精度, 跟踪生产过程, 需要随时对模型参数进行跟踪自学习。学习采用指数平滑法^[6], 即:

$$\bar{X}_{N+1} = \bar{X}_N + \beta(X_N^* - \bar{X}_N) = \beta \sum_{j=0}^N (1 - \beta) X_{N-j}^* + (1 - \beta)^{N+1} \bar{X}_0 \quad (15)$$

式中: 带 - 者为估计值; 带 * 者为实测值; $N, N+1$ 为第 N 和 $N+1$ 根钢筋的参数; X 为需要自适应校正的参数。 β 为加权系数, 在 0 和 1 之间。

5 结论

1) 推导了理论数学模型, 然后用数学方法加以简化, 得到螺纹钢轧后控冷的数学模型。

2) 模型中的参数采用工作现场实测数据进行回归得到, 并采用自学习方法对模型中的参数进行自适应修正, 从而保证了控制精度。

3) 对于水量设定模型, 轧后控冷效果取决于水量、水压、水温、冷却时间、钢筋直径和轧件温度等多种因素, 为保证性能质量, 便于控制, 要基本实现冷却水的恒温恒压, 而其他次要因素则包含在自学习项中。

4) 理论控制模型计算复杂, 各种参数很难精确测定, 不适合现场控制。但理论数学模型是推导和理解实用控制模型的基础。

参考文献:

- [1] 余伟, 陈银莉. 余热处理 20MnSi 带肋钢筋力学性能的模拟研究[J]. 特殊钢, 2002, (6): 13-15.
- [2] 王有铭. 钢材的控制轧制和控制冷却[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1985. 15-18.
- [3] 俞昌铭. 热传导及其数值分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1982. 348-357.
- [4] 俞昌铭. 热传导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990. 240-251.
- [5] 杜天苍. 螺纹钢轧后冷却工艺的微机控制[J]. 钢铁, 1997, (3): 29-34.
- [6] 杨节. 轧制过程数学模型[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992. 154-168.

(下转第 81 页)

对可靠性的大致估算,而后者是在电气控制系统设计后期的可靠性的计算,它较全面的考虑了电、热和机械环境应力等因素对元器件效率的影响,结果较为真实准确^[7]。

参考文献:

- [1] 王锡吉. 可靠性工程技术. 北京: 电子工业出版社, 1995.
 [2] 史定华. 可靠性数学. 北京: 人民邮电出版社, 1989.
 [3] 邱利群, 舒俊辉. 串联系统可靠性模糊优化[J]. 重庆大学学报, 2002, (7): 20 - 22.
 [4] 黄洪钟. 机械模糊可靠性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2001.
 [5] 谢开贵, 尹春元, 周家启. 中压配电系统可靠性评估[J]. 重庆大学学报, 2001, (1): 52 - 56.
 [6] 吴波, 黎明发. 机械零件与系统可靠性模型[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
 [7] 史进渊, 龚汉声. 基于可靠性理论的故障诊断法的研究[J]. 振动工程学报, 1995, (4):

Reliability of the Electric Control System for QBT80/45 Lifting/Distributing Double-duty Tower Cranes

YAO Jia-fei, WANG Xiao-jing, TUNG Ming-chuo, XUE Da-jin

(College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The electric control system for QBT80/45 lifting/distributing double-duty tower cranes is studied, and a mathematical model for its reliability is set up according to the study. Numeration and stress analysis of elements are applied to preestimating the reliability of this electric control system in the initial design stage and calculating in the late stage, respectively. The model comprehends the effects of electricity, heat, mechanical stress and other factors on the efficiency of elements in all aspects. Its calculated results are accurate compared with the real data, which demonstrates the electric control system for the double-duty tower crane is of a high reliability.

Key words: double-duty tower crane; electric control system; reliability preestimate; element numeration; element stress analysis

(编辑 陈移峰)

(上接第 62 页)

Mathematical Model of Control Cooling for Screw Rod After Rolling

LV Li-hua¹, CHEN Guo-jin¹, HUANG Meng-ku², WANG Xue-zhu²

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Rolling Plant of Xinxing Cast Gap Co. Ltd, Handan 056300, China)

Abstract: The on line hot treatment can not only boost the strength but also gain lower cost. It is usually called tempcore which was developed greatly these years. The process of tempcore is introduced and the core subject mathematical models is studied. According to the heating exchanging property of screw rod in cooling after rolling. Two mathematical models including beginning cooling model and cooling water amount model are obtained by analysing, deducing theoretically and simplifying mathematically. Its structure is simple and practiced. The parameter of model is obtained from measuring data of work site. It is able to suite the change of work site, so it can be used in practiced controlling.

Key words: mathematical model; screw rod; control cooling

(编辑 李胜春)