

高速线材 82B 控制冷却线的数学模型和应用

徐进桥 刘雅政 周淑梅

(北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要 采用商用有限元软件 Marc, 模拟研究了成分 (%) 为 0.80 ~ 0.82C, 0.6 ~ 0.9Mn, 0.016V 成品规格 $\Phi 12.5$ mm 高速线材 82B 的 62.7 m 控制冷却线水冷段和风冷段过程的钢材温度的数学模型。模拟计算的结果与现场实测值对比表明, 其误差 < 25 °C。

关键词 高碳钢 高速线材 控制冷却 数学模型

Mathematical Modeling and Application of Controlled Cooling Line of High-Speed Rolling Rod 82B

Xu Jinqiao, Liu Yazheng and Zhou Shumei

(School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract The mathematical modeling of finished $\Phi 12.5$ mm rod temperature at water cooling zone and blast cooling zone of 62.7 m controlled cooling line for rod 82B (0.80 ~ 0.82C, 0.6 ~ 0.9Mn, 0.016V) has been studied by using commercial FEM software Marc. The comparison between model calculated results and measured results at situ showed that the error was < 25 °C.

Material Index High Carbon Steel, High-Speed Rolling Rod, Controlled Cooling, Mathematical Modeling

1 高速线材 82B 轧后控冷过程的数学模型

高速线材 82B 精轧后通过水冷和风冷两条控制冷却线, 即斯太尔摩冷却线, 达到对其组织的

有效控制。现场生产的工艺流程如图 1 所示。

因为水冷段与风冷段的换热方式不同, 因而两者的控冷模型应分别建立。

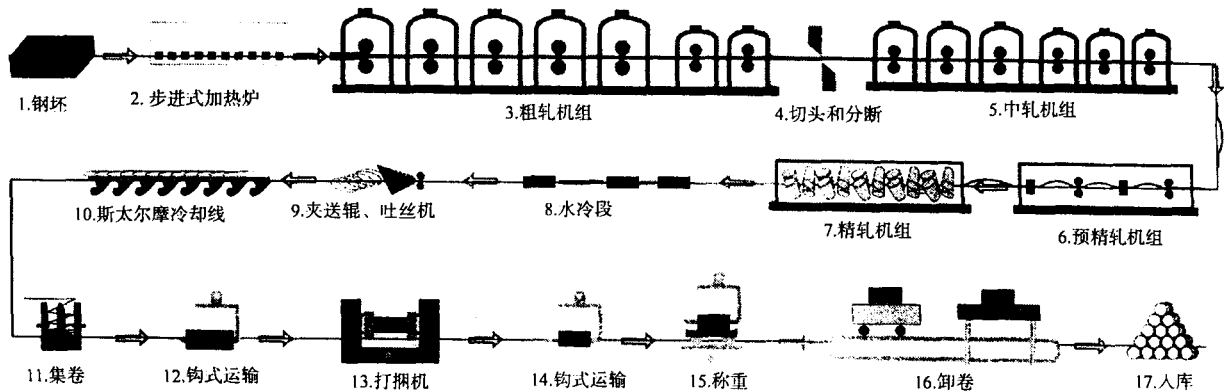


图 1 高速线材 82B 生产工艺流程示意图
Fig. 1 Schematic of production flow sheet for 82B rod

1.1 水冷段控冷过程

线材在运输机上的运输速度足够大, 轴向热流相对于整体热流可以忽略。同时, 为了简化运算, 考虑到线材基本上可以满足轴对称条件, 假定线材横断面只有径向换热而无周向换热, 根据傅

立叶导热定律和能量守恒定律可以推导出无内热源情况下的换热方程^[1]:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中: ρ - 材料密度; C_p - 材料定压比热容; k - 材料

的热导率。

(1) 进入水箱前。轧件没有进入水箱,只有轧件与外界空气的辐射换热。

$$\text{初始条件: } t=0, T=T_{\text{initial}} \quad (2)$$

边界条件:

$$\text{轧件心部 } \frac{\partial T}{\partial r}=0, r=0 \quad (3)$$

$$\text{轧件表面 } -k \frac{\partial T}{\partial r} = \sigma \varepsilon (T^4 - T_a^4), r=R \quad (4)$$

式中: T_{initial} - 轧件初始温度; T - 轧件温度; T_a - 空气温度; t - 时间; r - 计算点径向坐标; σ - 波尔兹曼常数, 为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ε - 线材表面辐射率, 取 0.8。由此, 辐射换热系数表示如下:

$$h_r = 4.536 \left| \left| \frac{T_s + 273}{100} \right|^4 - \left| \frac{T_a + 273}{100} \right|^4 \right| / (T_s - T_a) \quad (5)$$

(2) 轧件在水箱内, 换热方式为轧件与冷却水的对流和辐射换热。

$$\text{初始条件: } T=f(r, t^*) \quad (6)$$

$$\text{边界条件: } -k \frac{\partial T}{\partial r} = h(T_s - T_w), r=R \quad (7)$$

式中: $f(r, t^*)$ - 水箱入口处线材计算点的温度; T_s - 线材表面温度; T_w - 冷却水温度; t^* - 到达水箱入口处时间; h - 换热系数。总换热系数 h 为辐射换热系数 h_r 与对流换热系数 h_c 之和, $h = h_r + h_c$ 。

$$h_c = 0.1 W \quad (8)$$

式中: W - 每个水喷嘴每秒每平方米的水流量^[2]。

$$h_r = 4.536 \left| \left| \frac{T_s + 273}{100} \right|^4 - \left| \frac{T_w + 273}{100} \right|^4 \right| / (T_s - T_w) \quad (9)$$

(3) 轧件在两个水箱之间的换热受沿线材运动方向和轧件从水冷箱带出的水量的影响。因为线材运行速度很快, 轧件表面会附着冷却水。轧件与附着的冷却水及水蒸汽的混合物进行对流换热, 并通过蒸汽膜辐射^[3]。

$$h_c = 0.62 \left| \frac{H_v' \rho_v g (\rho_w - \rho_v) k^3}{(T_s - T_{\text{sat}}) \mu D} \right|^{1/4} \quad (10)$$

式中: g - 重力加速度; ρ_w - 水密度; ρ_v - 蒸汽密度; μ - 粘度系数; D - 线材直径; H_v' - 与汽化热 H_v 的关系如下:

$$H_v' = H_v \{ 1 + [0.84 C_p (T_s - T_{\text{sat}}) / H_v] \} \quad (11)$$

$$H_v = -2576.57 T + 32.11 \times 10^5 \quad (12)$$

式中: C_p - 材料定压比热容; T_{sat} - 饱和水蒸汽温度。

$$h_r = 4.536 \left| \left| \frac{T_s + 273}{100} \right|^4 - \left| \frac{T_w + 273}{100} \right|^4 \right| / (T_s - T_w) \quad (13)$$

1.2 风冷段控冷过程

风冷段的温度较低, 处于钢的相变区, 因而模型中需考虑冷却过程中释放出的相变潜热, 这样, 根据傅立叶导热定律和能量守恒定律可以推导出有内热源情况下的换热方程:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (14)$$

式中: \dot{q} - 线材中过冷奥氏体相变的体积热流。

边界条件的处理如下: 在中心线处, 温度场呈

$$\text{轴对称, 因而有: } -k \frac{\partial T}{\partial r} = 0, r=0 \quad (15)$$

在线材表面, 热交换为外表面与空气之间的对流换热和与周围环境的辐射换热:

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = h(T_s - T_a), r=R \quad (16)$$

式中: h - 组合换热系数, $h = h_r + h_c$; h_c - 空气对流换热系数; h_r - 辐射换热系数, 可以用下式描述:

$$h_r = 4.536 \left| \left| \frac{T_s + 273}{100} \right|^4 - \left| \frac{T_a + 273}{100} \right|^4 \right| / (T_s - T_a) \quad (17)$$

空气与线材表面的对流换热系数 h_c 可以通

$$\text{过下式来计算: } h_c = \frac{\lambda_0}{D} N_u \quad (18)$$

式中: λ_0 - 介质换热系数; N_u - Nusselt 数。

考虑到线材在风冷线上分布不均匀, 线材搭结点处冷却速度慢, 换热系数小, 非搭结点处冷却速度快, 换热系数大。因此 N_u 需要分别计算^[4]。

$$\text{非搭结点处: } Nu_m = C (Re_m Pr_m)^n \quad (19)$$

式中: Re_m - Reynolds 数; Pr_m - Prandtl 数; C, n - 常数, 根据 Re_m 的值确定。

$$\text{搭结点处: } Nu_u = 0.5 Re_i^{0.5} Pr_i^{0.38} (Pr_i / Pr_s)^{0.25}$$

$$(20)$$

式中: Re_i - 温度为 $(T_s + T_a)/2$ 的 Reynolds 数; Pr_i - 空气与钢之间温度为 $(T_s + T_a)/2$ 气膜的 Pr 值; Pr_s - 钢温为 T_s 的 Pr 值。

换热过程中考虑相变的热源相,用下式描述:

$$q = h(T) \frac{\Delta F}{\Delta t} \quad (21)$$

式中: ΔF - 奥氏体向珠光体的转变量; Δt - 转变时间; $h(T)$ - 相变热焓。

由此,风冷段上的温度场数学模型为:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + h(T) \frac{\Delta F}{\Delta t} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (22)$$

相变百分数 ΔF 的计算以 Avrami 方程为基础,根据钢材的 TTT 曲线,将 TTT 曲线的孕育期数值化,并对 TTT 曲线进行离散处理,利用 Scheil 迭代法则,当孕育期: $\sum \frac{\Delta \tau_i}{t_{yun_i}} = 1$ 时,相变开始,并随时间逐步增加,直到转变结束。

$$V = 1 - \exp(-b \cdot t^n) \quad (23)$$

为了准确计算连续冷却过程中的相转变量,取时间步长为 Δt ,引入虚拟时间和虚拟转变量:

$$t_i^* = \left[-\frac{\ln(1 - V_{i-1}^*)}{b_i} \right]^{1/n_i} \quad (24)$$

$$V_i^* = 1 - \exp[-b_i(t_i^* + \Delta t)^{1/n_i}] \quad (25)$$

$$V_i = V_{\max} V_i^* (V_{\gamma_{i-1}} + V_{i-1}) \quad (26)$$

式中: $V_{\gamma_{i-1}}$ - $i-1$ 时刻未分解的奥氏体百分数; V_{\max} - 新相的最大转变量,对于珠光体转变有:

$$(V_{\gamma_{i-1}} + V_{i-1}) = 1; V_{\max} = 1 \quad (27)$$

方程(1)~(27)构成了高速线材 82B 轧后控冷过程计算的基本数学模型。

2 模型计算的验证

82B 钢的成分(%)为:0.80~0.82C、0.6~0.90Mn、0.15~0.25Si、<0.02P、<0.02S、0.016V。可将 82B 钢生产的水冷段划分为 7 个不同的传热段(表 1)。第 1 段为线材与周围环境的辐射换热,2、4、6 段为水箱内线材与冷却水之间的对流和辐射换热,恢复段 3、5、7 段可统一按线材处于两水箱之间的情况处理,即线材与水和水蒸汽的混合物之间的对流换热以及通过蒸汽膜的辐射换热。130 mm × 130 mm 铸坯轧成 $\Phi 12.5$ mm 线材。每线用水总量为 325 m³/h,其中高压水 25 m³/h,水压为 1.2 MPa,低压水 300 m³/h,水压为 0.6 MPa,水温为 20 °C,精轧出口速度为 70 m/s。

精轧出口(1段入口)温度控制在 1 020 °C,3[#]

表 1 82B 钢生产水冷线各段长度

Table 1 Length of each zone of water cooling line for production of steel 82B

段号	长度/mm	段号	长度/mm
1	3 100	5	15 000
2	5 500	6	8 300
3	300	7	2 500
4	5 500		

水箱入口温度控制在 930~960 °C,实测一般也在此范围波动。吐丝温度控制范围在 860~960 °C,实测一般在 870~880 °C。

基于以上计算模型,利用大型商用有限元软件 Marc/Mentat 计算线材表面温度随时间的变化曲线,计算结果如图 2 所示。通过模拟计算 3[#]水箱入口处线材表面的温度为 935.8 °C,与现场实测比较,模拟误差在 25 °C 以内。

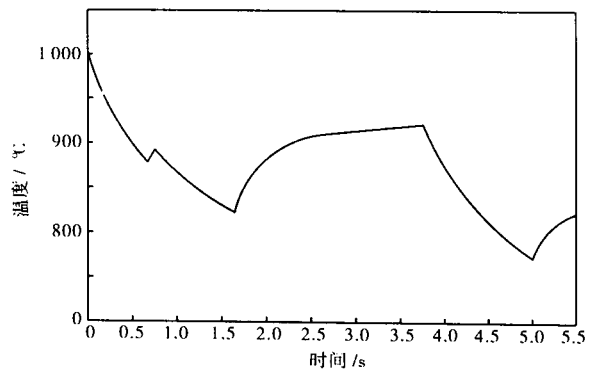


图 2 水冷段 82B 钢线材表面温度随时间变化曲线
Fig. 2 Change of surface temperature of steel 82B rod with time at water cooling zone

3 结论

基于建立的数学模型,以现场水冷段为例,使用大型商用有限元软件 Marc,模拟了现场表面温度随时间的变化曲线。将模拟计算的结果与现场实测值进行比较,误差在 25 °C 以内。

参考文献

- 1 章熙民,任泽需,梅飞鸣,等. 传热学. 北京:中国建筑工业出版社,1993
- 2 Morales R D, Lopez A G, Olivares I M. ISIJ International, 1990, 30 (1): 48
- 3 Morales R D, Lopez A G, Olivares I M. Ironmaking and Steeling, 1991, 18(2): 128
- 4 刘庄,吴肇基,吴景之,等. 热处理过程的数值模拟. 北京:科学出版社,1996

徐进桥(1977-),男,博士研究生。

收稿日期:2006-03-06