

高碳钢线材轧制组织和性能模型的应用

张云祥^{1,2} 张海鸥¹ 王桂兰¹ 赵嘉蓉²

(1 华中科技大学材料和冶金学院, 武汉 430074; 2 武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081)

摘要 开发了用于模拟高碳钢高速线材生产过程中断面温度分布, 奥氏体组织演变和产品性能的系统数学模型组。由实验确定的临界应变、奥氏体再结晶、斯太尔摩冷却线上奥氏体相变、组织和力学性能关系子模型耦合软件温度场, 构建了一个组织性能预报系统。该系统所计算出的轧制线上关键点钢材温度, 奥氏体晶粒度和力学性能与实测值吻合较好。

关键词 高碳钢 温度分布 组织演变 力学性能

Application of Model of Structure and Properties for High Carbon Steel Wire Rods

Zhang Yunxiang^{1,2}, Zhang Haiou¹, Wang Guilan¹ and Zhao Jiarong²

(1 School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074; 2 College of Material and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract A systematic mathematical model group has been developed to simulate the billet section temperature distribution, austenite structure evolution and products properties. The prediction system for structure and properties is established based on the sub-models determined by test including critical model, austenite recrystallization, phase transformation in steel at Stelmor cooling line and relation between structure and mechanical properties to couple temperature fields of billet. The billet temperature at key point of rolling production line, austenite grain size rating and mechanical properties calculated by this system are in agreement with measured value at situ.

Material Index High Carbon Steel, Temperature Distribution, Microstructural Evolution, Mechanical Properties

武钢高线车间单线配置了 30 架轧机, 从预精轧机开始分线, 双线共配置了 44 架轧机。坯料为全线采用无扭和扭转轧制相结合, 实现了微张力控制轧制工艺。粗轧机共有 6 个机架, 平立交替布置; 中轧有 10 个机架, 为水平布置; 预精轧有 4 个机架平立交替布置; 精轧机为 10 个机架顶交 45°无扭精轧机。精轧机前的预水冷设置 2 个水冷箱, 精轧机后水冷设置 5 个水冷箱, 吐丝后平铺在斯太尔摩线上风冷, 由集卷器收集后通过 C 型钩至打捆称重入库。所研究高碳钢的化学成分见表 1。

1 数学模型

模拟高碳钢线材轧制时, 所涉及的数学模型

包括轧制变形-温度模型、奥氏体组织演变模型、奥氏体相变模型和组织-力学性能关系模型等子模型^[1,2]。

1.1 温度模型

通过建立在无限长圆柱体一维非稳态热传导基础上的傅立叶热传导方程式(1)来计算轧件断面上温度分布, 断面温度场的分布采用等效圆截面来计算。在轧制区段, 轧件温度变化考虑两方面的因素: 一方面由于辐射的热损失, 使轧件温度下降; 另一方面由于变形机械能转化为热, 使轧件温度上升^[3]。在水冷区段, 轧件的冷却受表面传热系数控制, 根据轧制线上水冷箱的布置, 可以分为 3 种情况确定轧件表面的传热系数即轧件穿行

表 1 高碳钢的化学成分/%

Table 1 Chemical compositions of high carbon steels /%

钢种	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	N	Als
SWRH82B	0.81~0.85	0.15~0.35	0.60~0.90	≤0.020	≤0.015	0.15~0.23	≤0.20	≤0.005	≤0.04
SWRH72A	0.70~0.74	0.20~0.30	0.40~0.50	≤0.020	≤0.015	-	≤0.10	-	-

于空气、冷却水和水蒸汽等介质中的热交换系数 $h^{[4]}$, 分别见式(2)~(6)。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\rho \cdot c_p \partial T}{K \partial t} \quad (1)$$

式中: T - 线材温度/K; t - 冷却时间/s; r - 径向距离/m; K - 材料的导热系数/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{k})^{-1}$; ρ - 材料密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; c_p - 材料热容量/ $\text{J}(\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ 。

(1) 在空气中冷却时传热系数 h 。

$$h = h_r = \sigma \varepsilon \frac{\left(\frac{T_s + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100}\right)^4}{(T_s - T_a)} \quad (2)$$

式中: T_s - 轧件表面温度/ $^{\circ}\text{C}$; T_a - 空气温度/ $^{\circ}\text{C}$; σ - Stefan-Boltzmann 常数/ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{k}^4)^{-1}$; ε - 辐射率。

(2) 喷嘴开启的水冷管中冷却时传热系数 h 。

$$h = h_r + h_c \quad (3)$$

$$h_c = 0.1 \text{ W} \cdot \text{K} \quad (4)$$

式中: h_c - 冷却水中的对流传热系数/ $\text{kW} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})$; W - 水流量/ $\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$; K - 与水温有关的校正系数。

(3) 在充满水蒸汽的冷却管中冷却时的传热系数 h 。

$$h = h_r + h_v \quad (5)$$

$$h_v = 0.62 \left[\frac{H_v (\rho_l - \rho_v) K_v^3}{(T_s - T_{\text{sat}}) \mu D} \right]^{0.25} \quad (6)$$

式中: h_v - 水蒸汽中的对流传热系数/ $\text{kW} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_{sat} - 水蒸汽饱和温度/K; H_v - 有效水蒸汽热/ $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_v - 水蒸汽密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_l - 液态水密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; K_v - 水蒸汽导热系数/ $\text{J} \cdot (\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{s})^{-1}$; D - 轧件直径/m; μ - 水蒸汽的粘度/ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

1.2 奥氏体组织演变的数学模型

(1) 临界应变模型^[5]

$$\varepsilon_c = 0.01 d_0^{0.177} Z^{0.142} \quad (7)$$

$$Z = \varepsilon \exp(165\,282/R/T) \quad (8)$$

式中: d_0 - 变形前晶粒尺寸/ $180 \mu\text{m}$; ε - 变形速度/s; T - 变形温度/K; R - 气体常数。

(2) 再结晶模型^[6]

$$X_{\text{rx}} = 1 - \exp[-0.693(t/t_{0.5})^n] \quad (9)$$

$$d_{\text{stx}} = 95.5 \varepsilon^{-0.5} \dot{\varepsilon}^{-0.1} d_0^{0.39} \exp(-3\,500/RT) \quad (10)$$

$$d_{\text{stx}} = 26\,000 \cdot Z^{-0.23} \quad (11)$$

式中: X_{rx} - 静态或亚动态再结晶体积百分数/%; d_{stx} - 静态再结晶完成时的晶粒直径/ μm ; t - 道次间隔时间/s; $t_{0.5}$ - 完成 50% 静态再结晶所花的时间/s; d_{stx} - 亚动态再结晶完成时的晶粒直径/ μm ; n - 模型系数。

(3) 奥氏体晶粒长大模型采用 Maccagno 等人的模型^[6]: 当时间 $> 1 \text{ s}$ 时, 晶粒粗化可由晶粒尺寸的 7 次方公式来计算; 当晶粒长大时间 $< 1 \text{ s}$ 时, 则采用 2 次方公式来计算。

1.3 奥氏体相变模型

$$F = 1 - \exp(-bt^n) \quad (12)$$

$$\ln b = A_1 - A_2 D - A_3 T \quad (13)$$

$$S_p^{-1} = -0.21 + 0.0703 \cdot \Delta T \quad (14)$$

式中: F - 相变体积百分数/%; t - 相变时间/s; D - 相变前奥氏体晶粒尺寸/ μm ; T - 相变温度/ $^{\circ}\text{C}$; S_p - 珠光体片层间距/ μm ; ΔT - 相变过冷度/ $^{\circ}\text{C}$; A_1 、 A_2 、 A_3 - 由试验确定的系数, 因钢种而异。

1.4 组织与力学性能关系模型

$$\sigma_b = B_1 + B_2 \bar{S}_p^{-2} + B_3 \text{Mn} \quad (15)$$

$$\psi = C_1 + C_2 D^{-1/2} + C_3 \text{Mn} + C_4 V^{1/2} \quad (16)$$

式中: σ_b - 抗拉强度/MPa; \bar{S}_p - 珠光体平均片层间距/ μm ; ψ - 断面收缩率/%; Mn- 锰含量/%; B_1 、 B_2 、 B_3 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 - 试验确定的系数, 因钢种而异。

模拟计算时, 将线材在斯太尔摩线上的连续冷却过程离散为一系列短时等温过程。按照等温孕育期可叠加原理, 计算奥氏体向珠光体相变的开始温度。相变开始后, 考虑对流和辐射引起的温降和相变引起的温升来叠代计算每个时间步长的等温相变温度。每个时间步长内的相变增量用叠加原理计算^[3]。珠光体平均片层间距为各等温时间步长内转变的珠光体片层间距的加权平均值。

2 模型验证

2.1 轧制线上和斯太尔摩线上的温度

由实验取得水冷箱的热交换系数确定傅立叶方程的边界条件, 利用有限差分方法来计算线材的截面温度。图 1 为所计算出 82B 钢 $\Phi 12.5 \text{ mm}$ 线材的温度, 包括表面、中心和平均温度以及用圆点表示的关键点实测表面温度: 第 1 架入口温度、预精轧出口温度和吐丝温度。其轧制工艺为: 粗

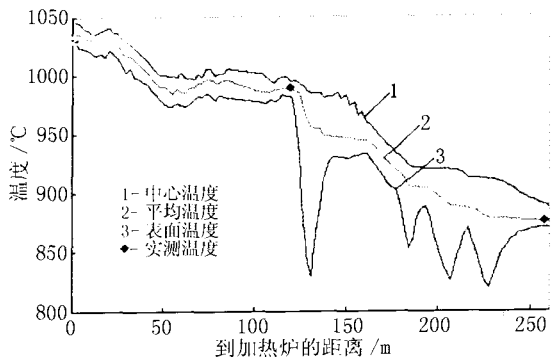


图 1 82B 钢 Φ12.5 mm 线材的温度分布

Fig.1 Temperature distribution of 82B steel Φ12.5 mm rod

轧 6 道,中轧 10 道,预精轧 4 道,水冷 1[#] 开,水冷 2[#] 关,精轧 4 道,水冷 3[#]、4[#]、5[#] 开。

2.2 奥氏体晶粒尺寸验证

为了验证奥氏体变形-再结晶模型计算的准确性,在工厂轧制 82B 钢 Φ12.5 mm 线材时现场取样,测定了 20[#] 预精轧机出口的奥氏体晶粒尺寸与计算值相对比。该线材生产工艺制度为:精轧末架轧制速度为 26.78 m/s,加热炉温度 1 050 ℃,吐丝温度为 860 ℃,空气温度为 30 ℃,水温 22.7 ℃。将所取的试样腐蚀,并用图像分析仪测定奥氏体晶粒度为 7.5 级(相当于 30 μm)。利用模型计算的试样奥氏体晶粒尺寸为 32.8 μm。计算各道次的奥氏体晶粒直径见图 2 所示。

2.3 计算的抗拉强度和实测值比较

对钢绞线 82B 钢 Φ12.5 mm 线材 22 个头部和中部试样及钢帘线 72AΦ5.5 mm 线材 6 个头部和中部试样的力学性能进行检测,其结果见图 3 中纵坐标所对应的数值。从图 3 可见,计算值和实

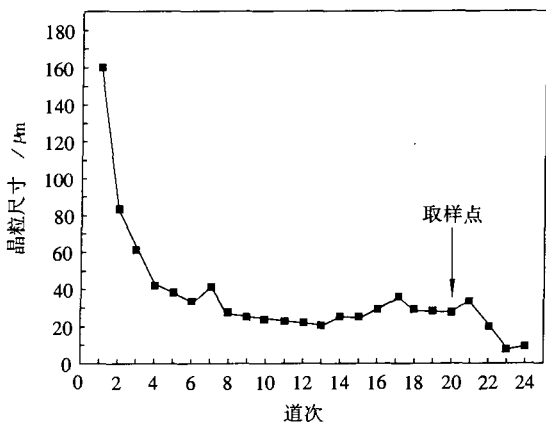


图 2 计算各道次的 82B 钢奥氏体晶粒直径

Fig.2 Calculated austenite grain size of 82B steel at each pass

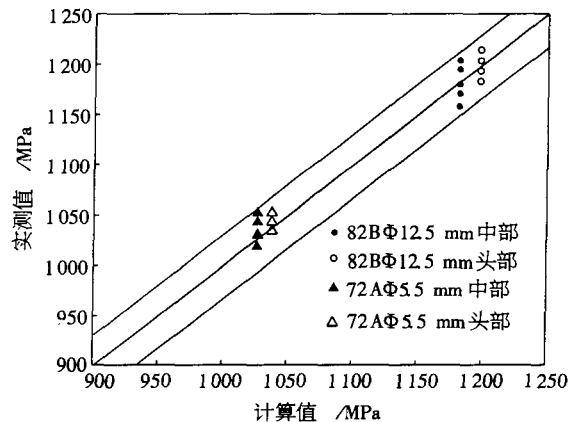


图 3 计算的抗拉强度与实测值比较

Fig.3 Comparison of tensile strength between calculated value and measured value

测值比较吻合,且头部抗拉强度大于中部。这是由于线材头部在经过水冷箱时不通水,使得终轧温度和吐丝温度比中部温度要高,导致相变前的奥氏体晶粒较粗大,奥氏体比较稳定,相变区间降低,相变过程推迟,珠光体片间距更细小,因此头部的抗拉强度要高一些。

3 结论

用有限差分方法计算了线材变形过程中及冷却过程中轧件二维温度场,在实验室中建立临界应变模型、亚动态再结晶和静态再结晶等模型。工业试验表明,利用所建立的模型组计算的温度、微观组织和最终的力学性能与实测值吻合较好,可以应用这套模型对高碳钢高速线材的组织-性能进行离线预报研究。

参考文献

- 1 吴迪,赵宪明,何纯玉,等.高碳钢高速线材轧制组织性能预测模型研究.钢铁,2003,38(3):43
- 2 赵嘉蓉,张翔,张云祥,等.热轧高碳钢线材制造工艺的计算机模拟.钢铁,2005,40(2):41
- 3 Anell E. Application of Mathematical Modeling to Hot Rolling and Controlled Cooling of Wire Rods and Bars. ISIJ International, 1992, 32(3):440
- 4 Morales R D, Lopez A G, Olivares I M. Heat Transfer Analysis during Water Spray Cooling of Steel Rods. ISIJ International, 1990, 30(1):49
- 5 刘丹,杭乃勤,黄灿,等.82B 高碳钢临界应变的数学模型.特殊钢,2004,25(4):19
- 6 Maccagno T M, Jonasand J J, Hodgson P D. Spreadsheet Modelling of Grain Size Evolution during Rod Rolling. ISIJ International, 1996, 36(6):720

张云祥(1970-),男,讲师,博士生,材料成形与控制工程。

收稿日期:2006-01-16