

## 层流冷却过程中带钢温度场数值模拟

谢海波, 徐旭东, 刘相华, 王国栋

(东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110004)

**摘 要:**分析了带钢层流冷却过程中的传热, 并利用有限元法对层流冷却过程中带钢温度场进行了模拟计算。结果表明:随着轧件厚度的减薄, 在带钢厚度方向上的温差逐渐减小; 冷却速度不同时, 带钢表面温度和中心温度的变化趋势以及波动幅度相应发生变化。在进行模型计算时, 应合理考虑带钢厚度及内部热传导的影响。这对提高数学模型的精度, 控制卷取温度, 提高产品质量以及指导生产具有重要意义。

**关键词:**热轧; 带钢; 层流冷却; 温度场; 数值模拟

**中图分类号:** TG335. 11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0963(2005)04-0033-04

## Numerical Simulation on Hot Strip Temperature Field in Laminar Cooling Process

XIE Hai-bo, XU Xu-dong, LIU Xiang-hua, WANG Guo-dong

(Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** In order to improve the calculating precision of mathematical model, the heat transfer in laminar cooling process for hot strip mill was analyzed by using finite element to simulate temperatures of strip laminar cooling. The difference in temperature of strip thickness decreases with the decrease of thickness. Surface and center temperature curves of the strip vary under the conditions of different cooling rates.

**Key words:** hot rolling; strip; laminar cooling; temperature field; numerical simulation

卷取温度对热轧带钢再结晶晶粒的尺寸、析出物数量和形态所产生的影响, 将导致金属的微观组织发生变化, 所以它是决定成品带钢加工性能、力学性能和物理性能的重要工艺参数之一。热轧带钢的卷取温度主要是通过精轧后带钢的冷却系统来调节。在实际生产中, 对冷却系统的控制不仅决定了整个带钢卷取温度的精度, 而且对带钢头部, 特别是薄规格带钢在输出辊道上的运行稳定性也有较大的影响<sup>[1~3]</sup>。

目前, 在带钢热连轧生产中, 由于实时性的要求及受计算机能力的限制, 对生产过程中带钢温度变化规律的计算, 仅通过简化的经验公式模型得到, 计算精度不高。同时, 在这些经验模型中, 都忽略了带钢内部的热传导, 因此无法得到带钢横断面及全长

的温度分布, 掩盖了带钢在层流过程中温度变化的复杂性。计算带钢层流冷却过程中的温度场已经是现代材质预报的一个重要手段, 研究带钢在层流过程中的温度变化和轧件内部温度场不仅具有理论意义, 也具有十分明显的实用价值<sup>[4,5]</sup>。笔者利用有限元分析法研究了层流冷却过程中带钢内部的温度场, 得到了带钢表面和中心温度随时间的变化曲线。

### 1 层流冷却工艺及设备布置

某热轧厂层流冷却设备的布置如图 1 所示。经过精轧出口后带钢穿过一个层流冷却区, 该区有 12 个集管组。这些集管组上下对应, 分别位于热输出辊道的上方和下方。在每组集管组后都装有侧喷装置, 前 9 组为粗调段, 后 3 组为精调段, 精调段主要

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59995440)

作者简介: 谢海波 (1972-), 男, 博士生; E-mail: hbxie@126.com;

修订日期: 2004-09-07

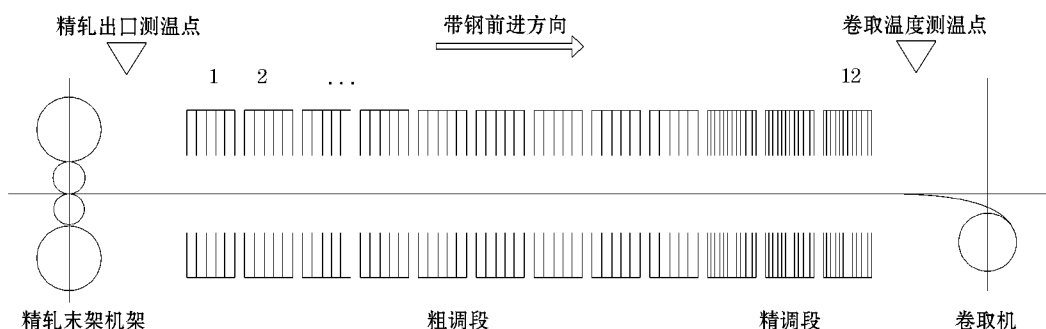


图 1 热轧带钢层流冷却过程示意图

Fig 1 Layout of laminar cooling system of HSM

用于反馈控制。经过层流冷却区后,带钢达到目标卷取温度,最后进行卷取。

## 2 传热分析及有限元模拟

层流冷却时带钢的传热过程主要包括空冷及水冷两部分。空冷指带钢在空气中向环境散热的温降过程,其传热方式以辐射为主;水冷指带钢向喷淋至其表面的冷却水传热的温降过程。

层流冷却数学模型包括空气冷却和喷水冷却模型。两种模型都是由求解傅里叶微分方程而得到:

$$c_p = \frac{d}{dt} = \frac{d}{dx} \left( \frac{d}{dx} \right) \quad (1)$$

式中  $\rho$  ——钢的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$c_p$  ——带钢的定压比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;

$\lambda$  ——导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;

$T$  ——带钢温度,  $^\circ\text{C}$ ;

$t$  ——时间,  $\text{s}$ ;

$x$  ——带钢截面温度分布的法线方向。

换热系数是反映带钢与介质之间热交换能力的重要参数,其中包括空冷区换热系数和水冷区换热系数。

空冷区换热系数:

$$a = H_c + (T_K + T_{Ka})(T_K^2 + T_{Ka}^2) \quad (2)$$

$$H_c = 2.15(f - a)^{0.25} \quad (3)$$

水冷区换热系数:

$$w = B \times 0.277 \times (1060 - f) W_{sp}^{0.35} \quad (4)$$

式中  $T_K = t_0 + 273.15$ ;

$T_{Ka} = t_a + 273.15$ ;

$T_K, T_{Ka}$  ——带钢和介质的绝对温度,  $\text{K}$ ;

$t_0, f$  ——带钢的初始温度和终了温度,  $^\circ\text{C}$ ;

$t_a$  ——介质(空气或水)的温度,  $^\circ\text{C}$ ;

$a, w$  ——空冷和水冷换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;

$H_c$  ——对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;

$\sigma$  ——史蒂芬-波尔兹曼常数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;

$\epsilon$  ——带钢热辐射系数;

$B$  ——自学习因子;

$W_{sp}$  ——单位水流量,  $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ 。

由于带钢的长度远大于宽度,而宽度又远大于厚度,所以传热在厚度方向最快,在长度方向最慢,因此对层流冷却中带钢温度场的计算主要是考虑厚度和宽度方向。笔者采用二维有限元模拟求解,取 1/4 断面进行分析,在带钢厚度和宽度方向,划分了  $5 \times 250 = 1250$  个单元。

## 3 有限元计算结果及其分析

### 3.1 温度场数值模拟计算的验证

为了校核和验证有限元模拟结果的可靠性,结合现场的实际生产工艺,对厚度规格为  $h = 2.0 \sim 12 \text{ mm}$ ,卷取温度在  $510 \sim 740$  范围内,带钢速度为  $2.0 \sim 10 \text{ m/s}$  的碳素结构钢(Q235B)、优质碳素结构钢(08Al)以及冷轧带钢[低碳钢(Stw22)]在层流冷却区的温度场进行了模拟计算,并将计算得到的带钢在卷取处的温度与实测表面温度进行了对比,结果示于图 2。可见:卷取温度计算值与实测值的均方差为 6.488,相对误差不大于 3%。数据处理结果表明模拟计算值与实测值吻合得很好。

### 3.2 带钢的表面温度和中心温度

图 3 分别示出了厚度为 12 mm 和 6.3 mm 的带钢在层流冷却过程中,表面温度和中心温度随时间的变化。可见随着轧件厚度的减小,带钢厚度方向上的温差逐渐缩小。例如厚度为 12 mm 的带钢,表

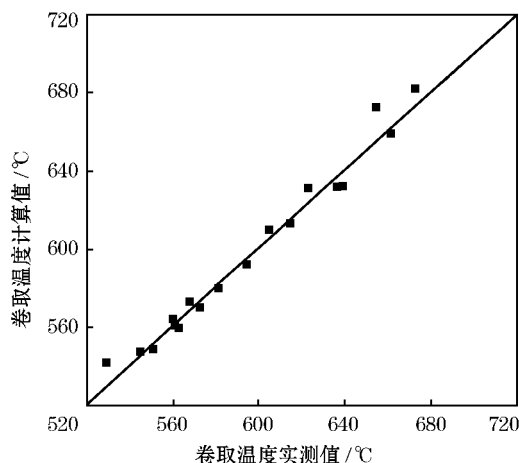


图 2 带钢表面温度的模拟计算值与实测值的比较  
Fig 2 Comparison between calculated and measured temperatures of strip surface

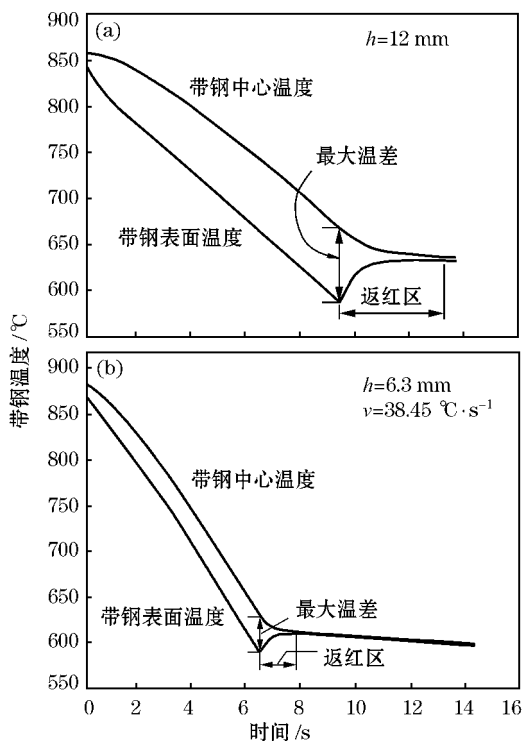


图 3 带钢表面温度和中心温度的变化曲线  
Fig 3 Calculated temperature curves of strip surface and center

面与中心的温差约为  $80^{\circ}\text{C}$ ; 而厚度为  $6.3\text{ mm}$  的带钢, 表面与中心的温差仅为  $40^{\circ}\text{C}$  左右。在空冷过程中, 带钢表面温度迅速回升。从图中可以看出, 厚度为  $12\text{ mm}$  带钢的返红温度可达  $600^{\circ}\text{C}$ , 返红时间可持续  $4\text{ s}$  左右; 而厚度为  $6.3\text{ mm}$  的带钢的返红温度

为  $350^{\circ}\text{C}$ , 返红时间仅持续了  $1.5\text{ s}$  左右。因此, 在利用模型进行带钢温度计算时, 应该综合考虑带钢厚度以及内部热传导的影响。

### 3.3 冷却速率对带钢温度的影响

图 3(b) 和图 4 分别示出了不同冷却速率 ( $v$ ) 下带钢表面温度和中心温度随时间的变化。图 3(b) 为前段主冷 ( $v = 38.45^{\circ}\text{C/s}$ ), 图 4 为稀疏冷却 [冷却速率分别为  $v = 20.32^{\circ}\text{C/s}$  和  $v = 21.74^{\circ}\text{C/s}$ ]。可以看出, 同一规格的带钢且具有相同的终轧温度和卷取温度时, 由于其在层流冷却过程中的冷却速率不同, 所对应的层流冷却区的温度变化曲线也发生了改变。带钢温度将对带钢的再结晶晶粒尺寸产生影响, 所以冷却速率会进一步影响带钢的组织性能, 这对于制定带钢冷却工艺有实际指导意义。

## 4 结 论

(1) 模拟计算能较准确地模拟带钢在层流冷却过程中的温度变化趋势, 而且模拟计算得到的卷取温度与实测卷取温度接近, 二者的均方差仅为  $6.488$ , 相对误差不大于  $3\%$ , 模拟计算值与实测值吻合得很好。

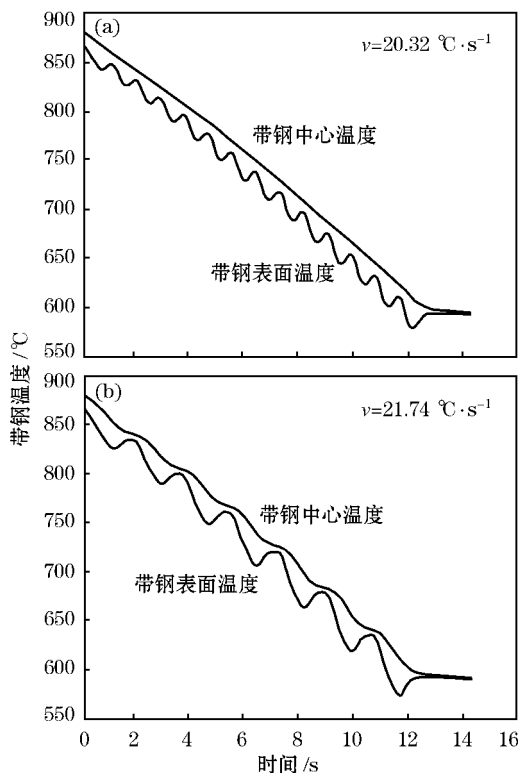


图 4 不同冷却速率下带钢温度的变化

Fig 4 Temperature curves of strip at different cooling rates  
(下转第 50 页)

脱碳作用有关外,前者较低的碳含量也是一个主要原因。

#### 参考文献:

- [1] 凌 刚, 艾家和, 刘 宇, 等. 轧制工艺参数对 60Si2MnA 钢静态再结晶影响的数值模拟[J]. 钢铁研究学报, 2003, 15(4): 37-41.
- [2] 王忠英, 于桂玲. 60Si2Mn(A) 弹簧钢的脱氧工艺[J]. 钢铁研究学报, 2003, 15(2): 1-4.
- [3] 赵同春, 张麦仓, 董建新, 等. 60Si2MnA 弹簧钢的热变形行为[J]. 钢铁研究学报, 2002, 14(2): 28-31.
- [4] 李 晶, 傅 杰, 李 健, 等. 60Si2MnA 弹簧钢脱氧工艺的优化[J]. 钢铁研究学报, 2001, 13(3): 6-9.
- [5] 朱应波. 国外弹簧钢生产技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- [6] 章守华, 吴承建. 钢铁材料学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.
- [7] Kapadia B M, Brown R M, Murphy W J. The Influence of Nitrogen, Titanium and Zirconium on the Boron Hardenability Effect in Constructional Alloy Steels [J]. Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 1968, 242(8): 1689-1694.
- [8] 本溪钢铁公司第一炼钢厂. 硼钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1977.
- [9] 曹 杰, 项长祥, 李联生, 等. M2 和 M2Al 高速钢的氧化和脱碳[J]. 特殊钢, 1999, 20(4): 19-21.
- [10] 曹 杰, 项长祥, 李联生, 等. 几种高速钢的氧化脱碳行为[J]. 北京科技大学学报, 2000, 22(1): 16-19.
- [11] 石之 茂也, 臧迫 誠志郎, 大西 一曺. 用鋼の 間鍛造 スケールの侵入 凍 に及ぼすボロン効果の 値統計による解析[J]. 鐵と鋼, 2003, 89(10): 1090-1092.
- [12] 胡庚祥, 钱苗根. 金属学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
- [13] 石田洋一. 表面界面与扩散现象[M]. 东京: 日本金属学会, 1979.

#### (上接第 35 页)

(2) 随着轧件减薄, 带钢在厚度方向上的温差逐渐缩小。在冷却区水冷段带钢的温降迅速; 在空冷段, 带钢的表面温度迅速回升。对于厚度为 12 mm 的带钢, 其返红温度可达到 60 左右, 返红时间可持续约 4 s。因此在进行模型计算时, 应综合考虑带钢厚度及内部热传导的影响, 以便提高模型计算的精确度。

(3) 在终轧温度和目标卷取温度相同的情况下, 冷却速率不同, 必将导致带钢表面温度和中心温度的变化趋势以及波动幅度相应地发生变化; 带钢温度不同, 将影响再结晶晶粒的尺寸, 进而影响带钢的

组织性能。

#### 参考文献:

- [1] 刘相华. 刚塑性有限元及其在轧制过程中的应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.
- [2] 蔡 正, 王国栋, 刘相华, 等. 热轧带钢温度场的数值模拟[J]. 金属成形工艺, 1998, 16(5): 30-42.
- [3] 熊野征晴, 高 出雲男, 吉間 豊, ほか. 厚板圧延における鋼板温度予 モデル[J]. R & D 神戸制鋼技報, 1986, 36(3): 47-49.
- [4] 蔡 正, 王国栋, 刘相华, 等. 层流冷却中带钢温度分布模型的开发[J]. 钢铁, 1998, 33(8): 31-34.
- [5] 周 进, 沈丙振, 韩志强, 等. 精轧区热轧带钢温度场的数值模拟[J]. 钢铁研究学报, 2003, 15(2): 14-18.