

# 难变形金属薄带温轧卷取加热温度计算

矫志杰<sup>1</sup>, 闫恩波<sup>2</sup>, 李建平<sup>1</sup>

(1. 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 110819; 2. 徐州工程机械集团有限公司  
徐工基础工程机械有限公司, 江苏 徐州 221004)

**摘 要:** 设计开发了两侧配备热卷取箱的温轧机组, 用于难加工金属薄带成卷轧制生产. 采用二维圆柱坐标系, 考虑沿带卷的径向和轴向传热, 建立薄带卷取温度计算模型. 在计算径向导热系数时将带卷沿径向分为薄带层、氧化层和间隙层. 利用有限差分法, 建立轴向和径向的显式差分方程和隐式差分方程, 并采用交替方向隐式法进行求解. 边界传热系数以辐射换热为主, 并通过引入修正系数来考虑其他因素的影响. 进行薄带卷取加热测温实验, 回归实测温度与加热时间的关系函数, 利用实测温度对传热修正系数进行优化, 计算温度和实测温度偏差控制在  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内.

**关 键 词:** 难变形金属; 温轧; 卷取; 加热温度; 有限差分法

中图分类号: TG 335.52

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2019)07-0952-04

## Calculating Strip Coil Heating Temperature in the Warm-Rolling Process for Difficult-to-Deform Metals

JIAO Zhi-jie<sup>1</sup>, YAN En-bo<sup>2</sup>, LI Jian-ping<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. XCMG Foundation Construction Machinery Co., Ltd., Xugong Construction Machinery Group, Xuzhou 221004, China. Corresponding author: JIAO Zhi-jie, E-mail: jjaozj@ral.neu.edu.cn)

**Abstract:** A warm-rolling mill with two hot coil boxes was designed to process difficult-to-deform metals strip. A numerical model was built to calculate strip coil temperature in a two dimensional cylindrical coordinate system, which considered the heat transferring along radial and axial directions. The thermal conductivity coefficient of radial direction was calculated according to the structures of strip layer, oxide layer and interface layer. The axial and radial explicit and implicit differential equations were deduced by finite differential method, solved by the alternating direction implicit method (ADI). The boundary condition of heat transfer coefficient was dominated by radiation mechanism, where a correction coefficient was introduced to consider other factors. The strip coil heating temperature was firstly measured through experiment. Then a linear relation between the actual temperature and heating time was regressed. After using the correction coefficient of heat transfer optimized by the actual temperature, the temperature can be calculated by the model, with the error within  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  compared with the experimental temperature.

**Key words:** difficult-to-deform metal; warm-rolling; strip coil; heating temperature; finite differential method

难变形金属薄带一般无法采用常规冷轧方法进行最终成品轧制,但随着轧制温度的提高,部分难变形金属的变形性能得到明显改善,因此可以采用温轧方法实现其轧制生产<sup>[1-3]</sup>. 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室在前期大量

研究工作的基础上,设计了两侧配备热卷取箱的温轧装备,实现采用温轧生产难变形金属薄带的工艺路径.

在温轧过程中,轧材提温和轧制温度精确控制,是该工艺路线能否实现的关键. 本文重点针对

金属薄带卷取加热过程温度计算开展研究,为整个温轧过程的温度精确控制奠定基础.

## 1 工艺设备概况

新型温轧机组的工艺设备概况如图 1 所示,在温轧机的两侧卷取机外部各配备一台热卷取箱.热卷取箱由保温材料、耐火材料和电加热器组成,利用电加热器通过辐射加热可以将热卷取箱内温度控制在一定范围,从而保证卷取机中带材的温度.热卷取箱的主要工艺参数如表 1 所示.

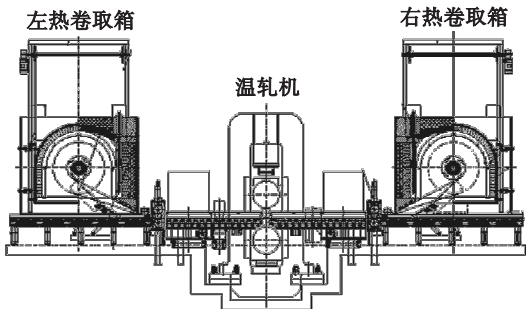


图 1 温轧机组工艺设备概况  
Fig. 1 Schematic of warm-rolling mill process equipment

表 1 热卷取箱主要工艺参数  
Table 1 Main processing parameters of coiling box

带材宽度 mm	带材厚度 mm	卷筒尺寸 mm	卷径 mm	卷取速度 m·s <sup>-1</sup>	加热温度 ℃
300 ~ 550	≤3	φ508 × 700	508 ~ 1 100	0.2 ~ 2	≤1 000

## 2 卷取温度计算

### 2.1 卷取温度计算对象建模

温轧过程中,薄带在热卷取箱中的卷取机卷筒上进行卷取保温,卷取后的带卷近似为圆柱体.带卷温度计算可以看作圆柱体温度计算,并认为沿圆柱体的径向和轴向传热,周向温度保持一致.由于卷取后带卷轴向左右对称,且周向温度一致,因此,以轴向长度中心为对称面,并沿周向 4 均分后取其中一份,即取整个圆柱体的 1/8 作为温度计算的对象,如图 2 所示,采用二维圆柱坐标系建模.带卷在热卷取箱中温度计算的基础是二维圆柱坐标系导热微分方程,如式(1)所示:

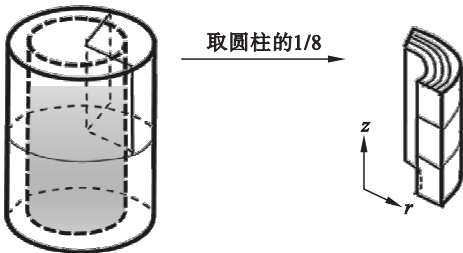


图 2 薄带卷取温度计算对象建模

Fig. 2 A model for calculating strip coil temperature

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_r r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (1)$$

式中: $T$ 为待求温度; $\tau$ 为时间; $r, z$ 分别为圆柱坐标系中径向和轴向坐标; $\rho$ 为材料密度; $c$ 为材料

比热容; $\lambda_r, \lambda_z$ 分别为径向和轴向导热系数.其中轴向导热系数 $\lambda_z$ 为薄带材料本身导热系数,而带卷在径向为多层结构,径向导热系数 $\lambda_r$ 需要重点研究.

### 2.2 带卷径向传热

带卷温度计算时,一般认为带卷沿径向各层之间的结构示意图如图 3 所示<sup>[4-9]</sup>,薄带表面存在氧化层,且两层薄带之间为有限点接触,存在间隙层,间隙层中充满气体介质.一个径向单元层结构上下对称,各部分厚度分别为 $H_s/2, H_o, H_i$ ,其中,上下层薄带厚度各取其厚度的一半.则其总厚度 $H$ 由式(2)确定.

$$H = H_s + 2H_o + H_i. \quad (2)$$

式中: $H_s$ 为单层薄带厚度; $H_o$ 为氧化层厚度; $H_i$ 为间隙层厚度.

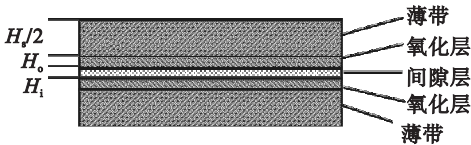


图 3 薄带卷结构示意图  
Fig. 3 Diagram of strip coil layers

径向导热系数计算考虑薄带层、氧化层和间隙层的各部分热阻 $R_s, R_o$ 和 $R_i$ ,间隙层热阻 $R_i$ 认为是带材接触传热阻 $R_{i,s}$ 、空气传热阻 $R_{i,a}$ 及辐射热阻 $R_{i,rd}$ 三部分热阻并联,如图 4 所示.径向导热系数计算采用文献[4]中公式,如式(3)所示.

$$\lambda_r = \frac{H}{\frac{H_s}{\lambda_s} + \frac{2 \cdot H_o}{\lambda_o} + \left[ \frac{1.13 \lambda_s m}{n} A^{0.94} + \frac{(1-A) \lambda_a}{42.7 \times 10^{-6} \cdot e^{-0.05P}} + 4(1-A) \varepsilon \sigma T^3 \right]^{-1}}. \quad (3)$$

式中： $\lambda_s, \lambda_o, \lambda_a$  分别为带钢、氧化层和空气的导热系数； $\varepsilon$  为钢卷黑度； $\sigma$  为玻尔兹曼常数； $m, n$  为与表面粗糙度相关的系数； $A$  为接触比例系数，该参数与钢卷的材质及卷取时的层间压应力有关，按照式(4)计算。

$$A = \frac{P}{P_0 + P} \tag{4}$$

其中： $P_0$  为带材的微观硬度； $P$  为层间压应力，层间压应力  $P$  需根据初始卷取张力及加热过程卷径变化造成的压力变化确定。

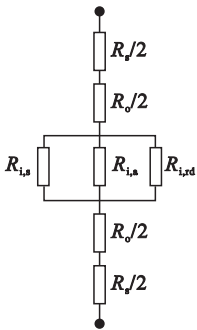


图 4 薄带卷径向导热热阻示意图  
Fig. 4 Diagram of thermal resistance of unit strip coil radial layers

2.3 带卷温度求解

为求解式(1)，采用有限差分方法进行数值求解。分别建立轴向显式和隐式差分方程，以及径向显式和隐式差分方程。并采用交替显式和隐式方向迭代法(ADI)进行求解，将时间步长一分为二，在前半个时间步长内， $z$  方向(轴向)采用显式格式， $r$  方向(径向)采用隐式格式；在后半个时间步长内， $z$  方向采用隐式格式， $r$  方向采用显式格式<sup>[10]</sup>。

带卷加热过程的边界条件，即热卷取箱内部环境与钢卷表面的传热系数( $h$ )是钢卷加热速度的关键影响因素。钢卷外径受到碳棒辐射、炉膛辐射以及炉内气体对流换热等的综合影响。将边界导热系数简化为辐射换热形式，并引入修正系数考虑其他因素的影响，见式(5)。在后续试验中，利用实测温度数据拟合获得修正系数。

$$h = \alpha \frac{\varepsilon \cdot \sigma (\theta_s^4 - \theta_E^4)}{\theta_s - \theta_E} \tag{5}$$

式中： $\alpha$  为修正系数； $\theta_s$  为钢卷温度； $\theta_E$  为热卷取箱内环境温度； $\varepsilon$  为钢卷黑度； $\sigma$  为玻尔兹曼常数。

3 薄带卷取加热测温实验

3.1 实验过程

为了进行测温实验，需要在常温下进行薄带卷取和焊接热电偶，直接使用难变形材料无法完成该操作，因此采用普碳钢作为替代材料。

将实验薄带卷取在热卷取箱卷轴上，在各层之间焊接 K 型热电偶线，并通过专用输入模块接入 PLC 中，实现温度的快速测量。带钢选用 Q195 材质普碳钢，厚度 1.7 mm，宽度 120 mm，长度 8 770 mm。将热卷取箱加热提温，期间卷轴带着钢卷缓慢旋转，保证加热均匀。在热卷取箱壁上也安装有热电偶用于检测热卷取箱环境温度。实验照片如图 5 所示，实验过程中热卷取箱门关闭。

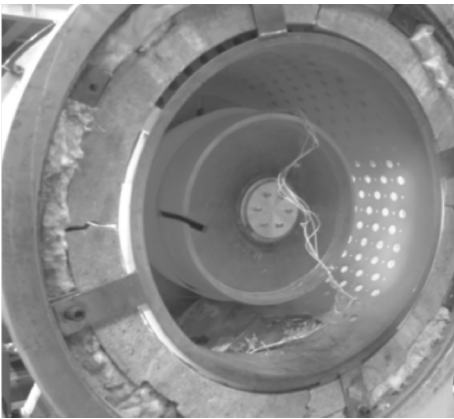


图 5 带卷热卷取加热测温实验  
Fig. 5 Temperature measuring experiment for strip coil

3.2 实测温度检测及拟合

炉内环境温度实测点标记为  $\theta_E$ ，带卷内部由里向外实测温度点标识  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 。分析温度实测值，发现各测温点温度实测值  $\theta_E, \theta_1, \theta_2, \theta_3$  与时间  $t$  近似呈线性规律变化，对各实测温度进行一次线性拟合，获得热卷取箱内部环境温度以及带卷各实测温度点温度随时间变化规律如式(6)~式(9)所示。各拟合直线的线性相关系数值分别为 0.997 99, 0.999 25, 0.998 70 和 0.993 85，可以看出，实测温度的线性拟合精度较高，见图 6，拟合函数可代替实测温度进行后续计算分析。

$$\theta_E = 263.45 + 0.0499 \cdot t, \tag{6}$$

$$\theta_1 = 124.94 + 0.0642 \cdot t, \tag{7}$$

$$\theta_2 = 179.50 + 0.0648 \cdot t, \tag{8}$$

$$\theta_3 = 227.95 + 0.0498 \cdot t. \tag{9}$$

3.3 模型修正系数优化

根据实测温度对式(5)中的修正系数  $\alpha$  进行优化。修正系数  $\alpha$  从 1.0~2.5 每隔 0.1 选取一个

值,采用 ADI 方法<sup>[10]</sup> 分别计算各点温度随时间变化值,并与实测温度值比较,获得最佳的修正系数  $\alpha$  为 2.0. 图 7 为  $\theta_2, \theta_3$  计算温度和实测温度对比图,温度偏差在  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内.

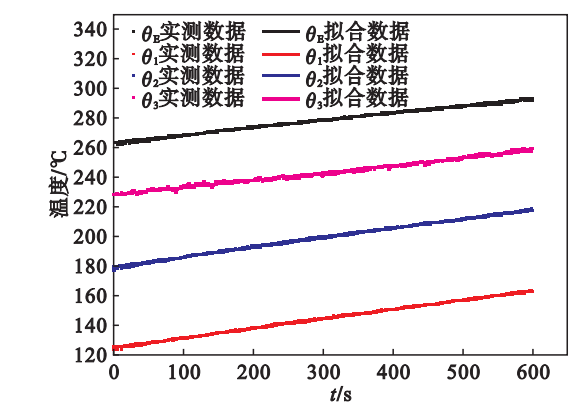


图 6 实测温度数据和回归温度数据对比  
Fig. 6 Comparison between the measured and fitted temperature of strip coil

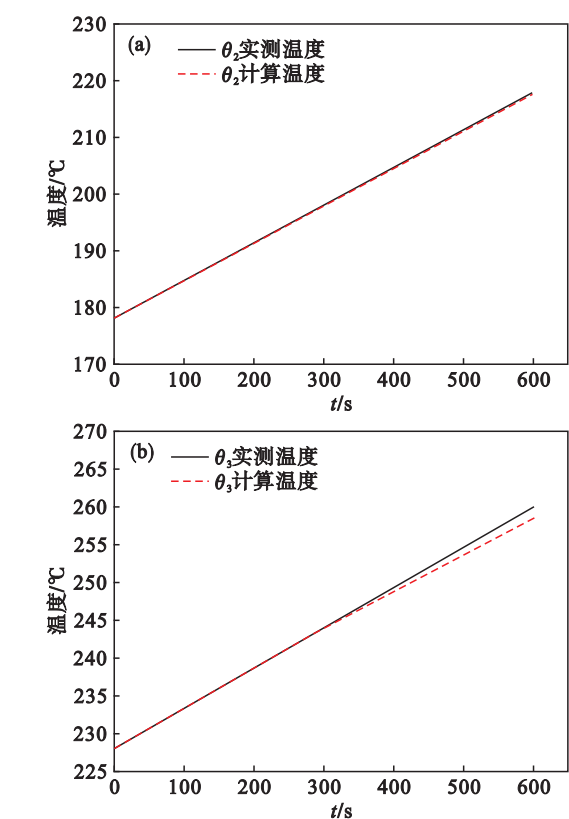


图 7 带卷实测温度和计算温度对比  
Fig. 7 Comparison between the measured and calculated temperature of strip coil  
(a)— $\theta_2$  点; (b)— $\theta_3$  点.

## 4 结 论

1) 设计开发两侧配备热卷取箱的温轧机组,用于难加工金属薄带成卷温轧生产.

2) 建立薄带热卷取加热过程的温度计算模型. 采用二维圆柱坐标系,考虑沿带卷的径向和轴向的传热;将带卷沿径向分为薄带层、氧化层和间隙层,在计算径向导热系数时考虑这三部分结构;利用圆柱坐标系二维有限差分法,分别建立轴向和径向的显式差分方程和隐式差分方程,采用交替显式和隐式方向迭代法进行数值求解;边界传热系数以辐射换热为主,并引入修正系数以考虑其他因素的影响.

3) 进行薄带卷取加热测温实验研究. 回归实测温度与加热时间的一次线性函数;利用实测温度对传热修正系数进行优化,带卷计算温度和实测温度偏差可以控制在  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内.

## 参考文献:

[ 1 ] Ye F, Liang Y F, Wang Y L. Fe - 6. 5wt% Si high silicon steel sheets produced by cold rolling [ J ]. *Materials Science Forum*, 2009, 638/639/640/641/642: 1428 - 1433.

[ 2 ] Fu H D, Zhang Z H, Pan H J, et al. Warm/cold rolling processes for producing Fe - 6. 5wt% Si electrical steel with columnar grains [ J ]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2013, 20( 6 ): 535 - 540.

[ 3 ] 矫志杰, 孙涛, 李建平. 难变形材料轧制实验机开发及实验研究 [ J ]. *东北大学学报 ( 自然科学版 )*, 2017, 38 ( 2 ): 229 - 233.  
( Jiao Zhi-jie, Sun Tao, Li Jian-ping. Pilot mill development for the difficult-to-deform material rolling and experimental research [ J ]. *Journal of Northeastern University ( Natural Science )*, 2017, 38( 2 ): 229 - 233. )

[ 4 ] Park S J, Hong B H, Baik S C. Finite element analysis of hot rolled coil cooling [ J ]. *ISIJ International*, 1998, 38 ( 11 ): 1262 - 1269.

[ 5 ] Saboonchi A, Hassanpour S. Heat transfer analysis of hot-rolled coils in multi-stack storing [ J ]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 182( 1/2/3 ): 101 - 106.

[ 6 ] Saboonchi A, Hassanpour S. Simulation-based prediction of hot-rolled coil forced cooling [ J ]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28( 13 ): 1630 - 1637.

[ 7 ] Cho H H, Cho Y G, Im Y R. A finite element analysis for asymmetric contraction after coiling of hot-rolled steel [ J ]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210 ( 6/7 ): 907 - 913.

[ 8 ] Zhang X, Yu F, Wu W. Application of radial effective thermal conductivity for heat transfer model of steel coils in HPH furnace [ J ]. *International Journal of Thermophysics*, 2003, 24( 5 ): 1395 - 1405.

[ 9 ] 祁卫东. 罩式退火炉传热模型与带钢氧化控制研究 [ D ]. 沈阳: 东北大学, 2013.  
( Qi Wei-dong. Research on heat transfer model of bell-type annealing furnace and oxidization control of strip steel [ D ]. Shenyang: Northeastern University, 2013. )

[ 10 ] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [ M ]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 43 - 46.  
( Yang Shi-ming, Tao Wen-quan. Heat transfer [ M ]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 43 - 46. )