

[文章编号] 1004- 0609(2001)03- 0485- 04

超薄快速铸轧机铸轧辊温度场和热凸度仿真及实验^①

熊勇刚^{1,2}, 毛明智¹, 臧铁刚¹, 谭建平¹

(1. 中南大学 机电工程学院, 长沙 410083; 2. 株洲工学院 机械系, 株洲 412008)

[摘要] 轧辊热凸度是影响板形的一个重要因素, 其计算精度直接影响到成品的板凸度和板形精度。采用轴对称差分法计算了超薄快速铸轧机铸轧辊温度场和热凸度, 计算结果与现场测试结果相吻合, 为铸轧辊原始设计和板形控制提供了依据。

[关键词] 超薄快速铸轧机; 轧辊温度场; 热凸度

[中图分类号] TG 302

[文献标识码] A

铝板带快速超薄铸轧具有节能、生产周期短、投资小、见效快等优点。作为铸轧机核心部件的铸轧辊的变形直接影响到铝板带的断面形状, 热变形是其中很重要的部分之一。70 年代, Larke 总结提出的黑箱法不仿真整个轧制过程轧辊温度场的动态变化过程, 以轧制过程中实测的轧辊辊面温度为依据计算热变形。这一方法的计算过程非常简单, 但精度较低^[1~3]。博罗维克注意到了轧辊温度分布的不均匀性, 因此基于对轧制过程中轧辊横截面内温度场分布特征进行了归纳和总结, 因轧辊温度分布是动态变化的, 博罗维克试图用静态分析公式进行简单描述与实际情况是不相符的。仿真法根据边界条件确定轧辊的温度场, 求出热变形, 其基本立论合理, 但边界条件的处理是其难点。应用仿真法求解温度场的 3 类方法中, 有限元法的精度最高, 但计算的工作量大; 解析法由于采用了较多的假设条件, 其计算的精度和适用的广泛性受到限制。文献[4~8]广泛采用了特点介于有限元法与解析法之间的差分法, 取轧制过程中轧辊表面板宽范围内任一点为研究对象, 它的热流输入和输出过程不是同时发生的。但目前求解轧辊温度场和热变形时对轧辊边界上的热载荷计算采用了迭加耦合的处理方法, 这样处理的结果尽管使问题的求解简单, 但这中间的人为因素直接影响到计算结果的准确性和可靠性。目前对轧辊温度场及热变形计算大多缺乏可靠的实验验证, 主要用于定性分析轧辊温度场及热变形的规律及一些控制策略, 热变形的计算迄今尚未形成公认的精确定义的求解模式和方法。快速超

薄铸轧中, 热循环周期短, 边界条件更加复杂, 热变形反映到轧辊变形而影响板型, 故定量计算铸轧辊温度场、热变形对原始辊型设计及板控策略有重要技术意义。

1 轧辊温度场的差分求解

1.1 计算假设和计算模型^[1,2]

轧辊的温度场不仅不均匀, 而且同一点的温度也在随各种条件的变化而变化。同时, 轧辊的实际边界条件是相当复杂的。为了简化计算作如下假设:

- 1) 轧辊为各向同性且为内部无热源的台阶形圆柱体;
- 2) 忽略轧辊在圆周方向的热传递;
- 3) 轧辊温度相对于轴线和辊身中部呈对称分布。

影响轧辊温度场的因素包括两个方面:

流入轧辊热量:

- 1) 高温轧件接触传热及热辐射;
- 2) 轧件塑性变形及与轧辊磨擦生热;
- 3) 轧辊轴承发热。

流出轧辊热量:

- 1) 粘着于轧辊表面的冷却液带走热量;
- 2) 接触传到支承辊的热量;
- 3) 传到辊颈的热量及辊面向空间辐射的热量。

可见, 热轧中发生在轧辊周围的传热过程是一个非常复杂的过程, 但影响轧辊温度场的主要因素

① [基金项目] 国家计委重点科技攻关项目《铝及铝合金连续铸轧新技术及新设备研究》资助项目

[收稿日期] 2000- 09- 27; [修订日期] 2001- 03- 29

[作者简介] 熊勇刚(1968-), 男, 博士研究生。

只有两个,即轧件与轧辊之间的接触传热和冷却液的对流散热。

1.2 差分式的建立^[2, 3]

取通过轧辊轴线作剖面的四分之一,并将其划分为如图1所示的矩形网格,共约250个网格,根据热传导方程建立差分格式的差分解法。

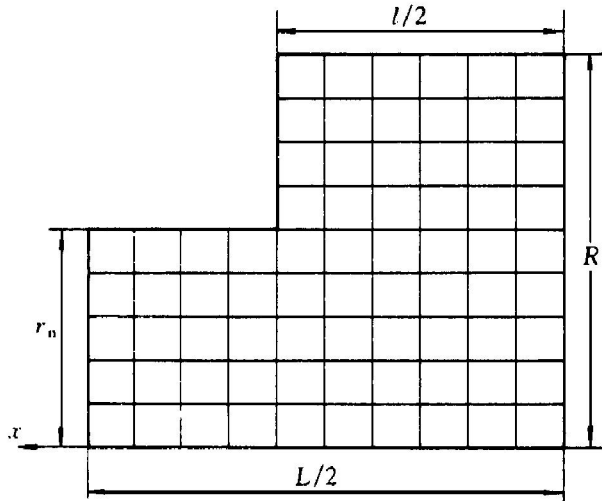


图1 铸轧辊尺寸及差分网格

Fig. 1 Dimension of work roll and its differential nets

在圆柱坐标系下,热传导的偏微方程可写为

$$\rho_d c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial r \partial \varphi} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right] + q \quad (1)$$

式中 ρ_d —轧辊密度, kg/m^3 ; c —比热容, $\text{J}/(\text{°C} \cdot \text{kg})$; λ —导热系数, $\text{J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{°C})$; T —温度, K ; r_n, R —辊颈半径, 轧辊半径, m ; φ —圆周角度, rad ; q —单位体积热源在单位时间内发出的热量, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

轧制过程中,热输入为从轧件传递到轧辊中的热量,由于此热量的传输包含在边界条件内,故根据假设3),得 $\partial^2 T / \partial \varphi^2 = 0$, 则热传导方程成为

$$\frac{\rho_d c}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial r \partial \varphi} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2)$$

以差分形式表示偏微分方程, 则有

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i+1,j}^{(t)} + T_{i-1,j}^{(t)} - 2T_{i,j}^{(t)}}{(\Delta x)^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{T_{i,j}^{(t)} - T_{i,j-1}^{(t)}}{\Delta r} \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{T_{i,j+1}^{(t)} + T_{i,j-1}^{(t)} - 2T_{i,j}^{(t)}}{\Delta r^2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{i,j}^{(t)} - T_{i,j}^{(t-\Delta t)}}{\Delta t} \quad (6)$$

上述式中,上角标表示时刻,下角标表示网格节点序号。

将式(2)~(5)代入式(1), 并令

$$A = \frac{1}{\Delta r} - \frac{2r}{(\Delta r)^2} - \frac{2r}{(\Delta x)^2} \frac{\rho_d c r}{\lambda \Delta t},$$

$$B = \frac{r}{(\Delta r)^2}, \quad C = \frac{1}{\Delta r} + \frac{r}{(\Delta r)^2},$$

$$D = E = \frac{r}{(\Delta x)^2}, \quad F = -\frac{\rho_d c r}{\lambda \Delta t}$$

则得

$$AT_{i,j}^{(t)} + BT_{i+1,j}^{(t)} + CT_{i-1,j}^{(t)} + DT_{i,j+1}^{(t)} + ET_{i,j-1}^{(t)} = FT_{i,j}^{(t-\Delta t)} \quad (7)$$

式(7)即为热传导方程的全隐式差分格式,对每个内节点建立一个差分方程,便得到以 $t - \Delta t$ 时刻温度为已知量、以 t 时刻值为未知量的线性方程组,求解此线性方程组可确定各节点在 t 时刻的温度。

1.3 边界条件的处理^[2, 3]

对图1所示的轧辊边界建立下述边界条件:

1) 辊身的轧制部分 ($r = R, 0 \leq x \leq B/2$)

$$\alpha_{s1}(T - T_s) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r}$$

2) 辊身的轧制部分 ($r = R, B/2 \leq x \leq L_r$)

$$\alpha_{s2}(T - T_w) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r}$$

3) 辊颈部分 ($r = r_n, L_r \leq x \leq L/2$)

$$\alpha_{s3}(T - T_n) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r}$$

4) 辊肩部分 ($x = L_r/2, R_n \leq r \leq R$)

$$\alpha_{n1}(T - T_a) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$

5) 辊端部分 ($x = x_0, 0 \leq r \leq r_n$)

$$\alpha_{n2}(T - T_r) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$

式中 $\alpha_{s1}, \alpha_{s2}, \alpha_{s3}, \alpha_{n1}, \alpha_{n2}$ 分别为各部分的换热系数; T_s, T_w, T_a, T_n, T_r 分别为铝液、冷却液、轧辊轴承、室内和辊端的温度。

铸轧辊轴线及左右对称线处均作为绝热边界条件处理,且每个角部的节点兼有两种边界条件,将边界条件写成相应的差分形式,即可得出各边界节点的全隐式差分格式的热传导方程。铸轧辊温度场的计算^[3]采用差分方程构成的线性方程组,采用列主元高斯消元法求解。用 Visual C++ 编写程序,首先设置时间间隔 Δt 及轧制时间 t_{\max} ,轧制开始时轧辊温度随时间变化,通过对线性方程组的求解得到 $t = \Delta t$ 时刻工作辊的温度分布,再以此为已知量,求得 $t = 2\Delta t$ 时刻轧辊的温度场,这样一直计算下去,直到 $t = t_{\max}$,终止计算。图2所示为轧辊

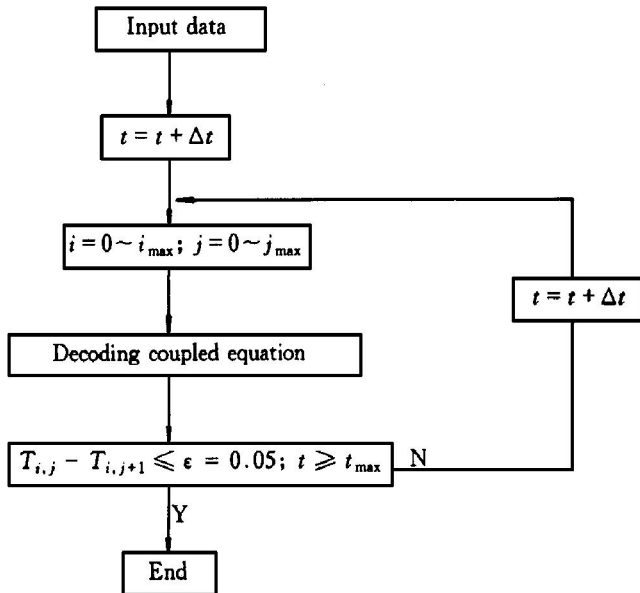


图 2 轧辊温度场隐式差分法计算流程图

Fig. 2 Calculation flow scheme of implicit differentia method of work roll temperature field

温度场隐式差分法的计算流程图。

2 铸轧辊温度场计算与实测

2.1 温度场计算

应用前面建立的模型, 对某厂 4[#] 铸轧机带工作温度场进行了计算, 初始数据及计算条件见表 1, 结果见图 3。图 3 中时间间隔为 4~ 5s, 趋于平稳时间约为 40~ 50s。

表 1 轧辊参数及计算条件

Table 1 Cast roll parameters and condition

Parameters	Unit	Amount
$L/2$	m	1.1
$l/2$	m	0.9
R	m	0.459
r_n	m	0.3
ρ_d	kg/m ³	850
c	J/(°C·kg)	50
λ	J/(m·s·°C)	45.2
T_w	°C	18

图 3 表明, 由于轧辊中部和边部的受热及冷却条件不同, 随着轧制时间的增加, 轧辊中部与边部的温差越来越大, 轧制刚开始时, 由于轧辊表面吸收了轧件的热量, 使最外层与心部产生一定的温差, 热量不断向轧辊内部传递, 随着轧制的进行, 轧辊内外温差逐渐缩小。

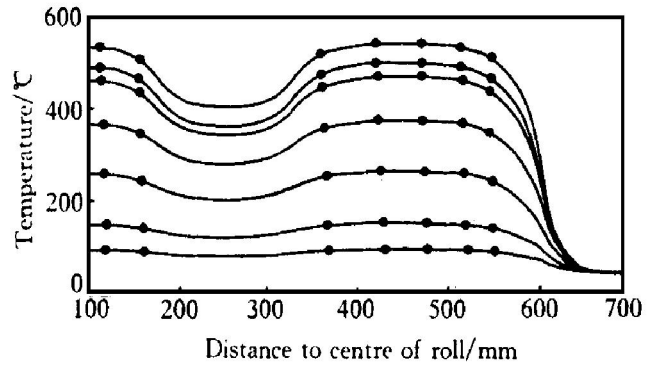


图 3 不同轧制时间工作辊表面温度沿轴向分布曲线

Fig. 3 Axial distribution curves of cast roll surface temperature during different rolling time (Dots represent measured data)

2.2 热凸度的计算与实测

轧辊的热凸度可用下式计算^[9]

$$u(x) = 2(1 + \nu) R \beta_1 \int_0^l T r^* dr^* \quad (8)$$

式中 ν —泊松系数, β_1 —热膨胀系数, $r^* = r/R$ 。

采用梯形法数值积分方法求解式(8), 计算出铸轧辊热凸度结果如表 2 所示。

表 2 铸轧辊热凸度计算结果

Table 2 Thermal crown calculation result of roll

Measuring dot	Calculated crown /mm	Measured crown/mm	
		1	2
1	0.60	0.61	0.61
2	0.61	0.61	0.60
3	0.57	0.58	0.63
4	0.56	0.55	0.66
5	0.60	0.61	0.65
6	0.60	0.61	0.65
7	0.61	0.61	0.67

采用图 4 所示装置, 对某厂 4[#] 铸轧机的工作辊热凸度进行了测量, 实测结果列于表 2。

3 结论

用轴对称隐式差分法, 计算出了快速超薄铸轧辊温度场, 铸轧辊表面的稳态温度计算值与实测值吻合较好, 表明建立的轧辊温度场计算模型达到了一定精度。温度分布的特点是: 辊面温度沿辊身分布为中间高, 边缘突降且按中轴对称分布。因此相应热变形也是中间大, 两边变形小, 与辊身温度分布基本相符。

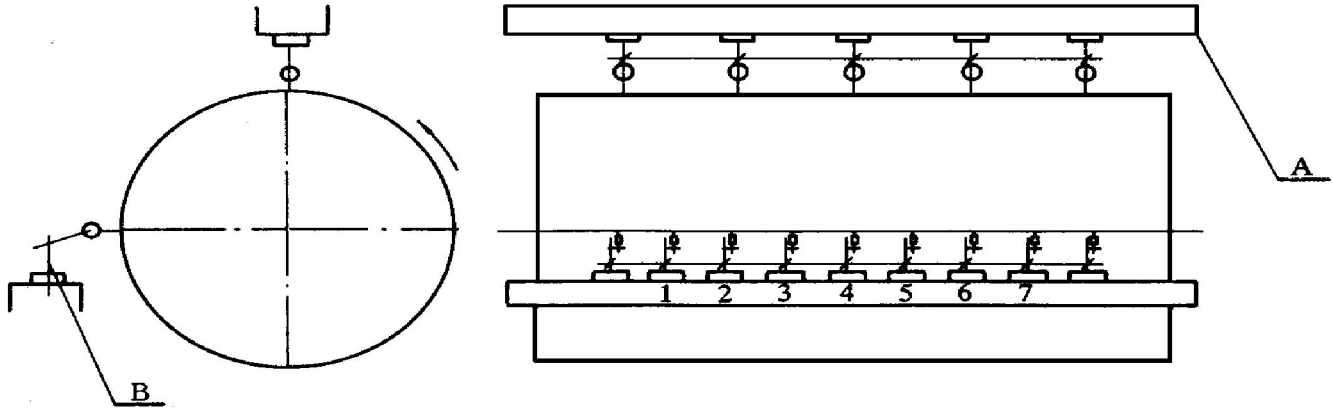


图4 测点布置图

Fig. 4 Measuring dots arrangement

A—Top side support beam; B—Indicator

[REFERENCES]

[1] LI Shi-xiang(李世显). Dynamic Mechanism Study on the Thermal Roller (热辊型动态形成机理) [D]. Changsha: Central South University of Technology, 1998. 118- 130.

[2] LI Xiao-qian(李晓谦). 连铸铸带坯在轧制区温度场数学模型[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 1997, 7(4): 68- 70.

[3] GUO Jian-bo(郭剑波). 热带钢连轧机工辊温度场和热凸度计算[J]. Journal of Yanshan University(燕山大学学报), 1998, 7: 225- 258.

[4] CAO Biao(曹标), CHEN Zhong-hua(陈振华), GAO Ying-jun(高英俊). 金属非平衡凝固热力学行为分析[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 1998, 8(1): 15- 18.

[5] SHI Shi-xia(史守峡), LIU Dian-kui(刘殿魁). SH波与界面多圆孔散射及动应力集中[J]. Acta Mechanica Sinica(力学学报), 2001, 33(1): 60- 62.

[6] LUO Guan-wei(罗冠伟). 两自由度塑性碰撞系统动力学研究[J]. The Chinese Journal of Computational Mechanics (计算力学学报), 2000, 32(5): 579- 68.

[7] HU Chao(胡超). 含孔Von karman板中非线性波散射与边值问题[J]. Acta Mechanica Sinica(力学学报), 2000, 32(4): 439- 441.

[8] ZHUO Sheng-jie(周慎杰). 弹性薄板弯曲边界轮廓法[J]. Acta Mechanica Sinica(力学学报), 2000, 32(6): 717- 719.

[9] WANG Guo-deng(王国栋). The Theory and Practice of the Shape Control(板型控制理论与实践) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1986. 288- 299.

[10] DING Ke-wei(丁克伟). 任意厚度闭合柱壳对称温度应力[J]. The Chinese Journal of Computational Mechanics(计算力学学报), 1999, 31(2): 167- 173.

Emulation and test research of temperature field and thermal crown for super-thin high-speed mills roll

XIONG Yong-gang^{1,2}, MAO Ming-zhi¹, ZANG Tie-Gang¹, TAN Jian-ping¹
 (1. College of Mechanical and Electronical Engineering, Central South University, Changsha 410083, P. R. China;

2. Department of Mechanical Engineering, Zhuzhou Institute of Technology, Zhuzhou 412008, P. R. China)

[Abstract] The thermal crown of high-speed cast rolls is a very important factor influencing the thickness transverse distribution of hot strip mills, and the final crown and shape quality of strip. The cast roll's temperature field and hot crown for super-thin high-speed mill roll were calculated by implicit differentia method. The results show good agreement with test results.

[Key words] super-thin high-speed cast mills; roll temperature field; roll thermal crown

(编辑 袁赛前)