

[文章编号] 1004- 0609(2002)03- 0529- 05

快速超薄铸轧机铸轧辊变形热力耦合计算^①

熊勇刚^{1, 2}, 云忠¹, 王桥医^{1, 2}, 王文明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] 根据快速超薄铸轧机铸轧辊的特点, 从热弹性力学的角度建立了热弹耦合方程并对其求解。综合接触压力(轧制力分布)模型, 确定了铸轧辊温度场边界条件, 得到了超薄铸轧机铸轧辊变形的计算模型。利用此模型计算了某铸轧机铸轧辊的温度场和变形量, 计算结果与现场测试数据吻合较好, 表明所建模型正确可信。通过对铸轧辊应力分析计算发现在不同半径处应力性质有突变, 从而找到了辊芯与辊套滑移、错位的根本原因。

[关键词] 铸轧辊; 计算模型; 应力应变场; 热力耦合**[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铸轧辊的变形直接影响到铝板带的断面形状和热变形, 是影响产品质量的重要因素之一。虽然有关轧辊变形的理论和模型比较丰富^[1~10], 分析计算对象众多, 但快速超薄铸轧机铸轧辊却与一般的热、冷轧辊不同, 主要表现在: 1) 辊芯与辊套为两种不同材质配合而成的复合体, 且存在不连续的结合面, 辊芯内有几何结构复杂的内冷水槽而非单一实心体; 2) 周向温差较大, 其温度场为非对称三维温度场, 由此而带来的问题有辊芯与辊套滑移、错位和铸轧辊过度磨损、开裂以及对原始辊缝形状、板型、带坯表面的影响。因此必须考虑热弹性应变与温度场的相互影响, 考虑非稳态过程, 深入研究复合材质型轧辊的温度场, 耦合热弹性应变对温度的影响, 科学处理运动热和力载荷边界, 从而更加精确计算轧辊的变形量。由于铸轧辊内部几何结构复杂且为材质相异, 因此如何合理真实精确地建立铸轧辊三维热力耦合模型以及对各种复杂边界条件的科学处理是关键问题。

1 热弹耦合方程及其求解

在热弹性力学中, 热传导方程和热弹性力学方程是相互耦合的。热传导耦合项的存在, 表明了热弹性体上的温度场与热弹性应变有关。耦合热弹性问题的控制方程由热传导方程和热弹性力学方程构

成。对于平面问题, 由具耦合项的热传导方程导出的温度场 $\{T\}$ 的有限元列式为

$$[C]\{T\} + [[K_c] + [K_b] + [k_p] + [K_r]]\{T\} = \{R_T\} + \{R_q\} + \{R_b\} + \{R_r\} + \{R_v\} \quad (1)$$

式中 $[C] = \sum [C]^e =$

$$\sum \int_{\Omega^e} \Theta [N]^T [N] d\Omega \text{ — 热容矩阵;}$$

$$[K_c] = \sum [K_c]^e =$$

$$\sum \int_{\Omega^e} [B]^T [K_T] [B] d\Omega \text{ — 热传导矩阵;}$$

$$[K_b] = \sum [K_b]^e =$$

$$\sum \int_{S_3} b [N]^T [N] d\Gamma \text{ — 热交换矩阵;}$$

$$[K_r] = \sum [K_r]^e =$$

$$\sum 4T^3 \int_{S_4} \eta \chi [N]^T [N] d\Gamma \text{ — 热辐射矩阵;}$$

$$[K_p] = \sum [K_p]^e =$$

$$\sum \int_{\Omega} \frac{1}{\Delta t i} [N]^T [\beta] [P] (\{\delta\}_i^e - \{\delta\}_{i-1}^e) d\Gamma \text{ — 热耦合矩阵。}$$

2 边界条件的处理

2.1 触压力(轧制力分布)模型

铸轧过程中铸轧坯与铸轧辊接触表面的磨擦一般为混合磨擦状态, 即存在 3 个区: 滑动区、粘着区和停滞区, 按混合磨擦条件和轧制压力连续条件解轧制区平衡微分方程可表示为

^① [基金项目] 国家计委重点科技攻关基金资助项目

[收稿日期] 2001-11-26; [修订日期] 2002-02-28

[作者简介] 熊勇刚(1966-), 男, 博士研究生。

$$\begin{aligned}
 P_x = & \\
 \left| \frac{K_1 \alpha A}{\alpha A + \frac{2\mu}{h}} e^{-\alpha A x} + K_2 \left(1 - \frac{2A}{\alpha A + \frac{2\mu}{h}}\right) e^{\frac{2\mu}{h}(X+Z_3)} \right. & \\
 & \quad \text{(后滑区)} \\
 \left. \frac{K_1 \alpha A}{\alpha A - \frac{2\mu}{h}} e^{-\alpha A x} + K_1 \left(1 + \frac{\sigma}{K_1} - \frac{\alpha A}{\alpha A - \frac{2\mu}{h}} e^{-\alpha A x}\right) e^{-\frac{2\mu}{h}} \right. & \\
 & \quad \text{(前滑区)} \\
 - \frac{K_1}{\alpha A h} e^{-\alpha A x} + K_1 \left(\frac{1}{2\mu} + \frac{1}{\alpha A h}\right) e^{-\alpha A x_c} & \quad \text{(后粘着区)} \\
 \frac{K_1}{\alpha A h} e^{-\alpha A x} + K_1 \left(\frac{1}{2\mu} - \frac{1}{\alpha A h}\right) e^{-\alpha A x_c} & \quad \text{(前粘着区)} \\
 K_1 e^{-\alpha A x} - \frac{K_1 e^{-\alpha A x_e}}{2 \bar{h} l_{en}} (X - X_n)^2 - & \\
 K_1 \left(\frac{1}{\alpha A h} + 1 - \frac{l_{en}}{2 \bar{h}}\right) e^{-\alpha A x_e} + & \\
 K_1 \left(\frac{1}{2\mu} + \frac{1}{\alpha A h}\right) e^{-\alpha A x_e} & \quad \text{(停滞区)}
 \end{aligned}$$

2.2 铸轧辊温度场边界条件确定

在进行铸轧辊温度场的数值模拟时, 不考虑重力的影响, 因辊的温度沿辊身方向以中轴面成对称分布, 故可取半辊身部分作为计算区域, 其物理模型如图1所示。

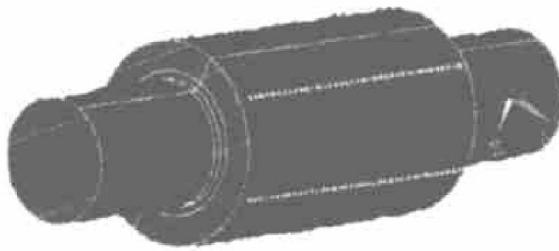


图1 铸轧辊物理模型

Fig. 1 Physicil model of cast-rolling

1) 在铸轧区范围内, 铸轧辊与铸轧坯接触界面可视为第三类边界条件, 即 $r = \frac{D}{2}$, $-\varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_0$, $-\frac{B}{2} \leq z \leq \frac{B}{2}$ 处

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial r} = h_r (t - t_{r\infty}) \quad (4)$$

式中 D 为铸轧辊外径; φ_0 为咬入角; B 为铸轧板宽; λ 为导热系数; h_r 为铸轧辊与铸轧坯接触表面间的换热系数($J/(cm^2 \cdot s \cdot K)$); $t_{r\infty}$ 为铸轧坯温度。换热系数 h_r 可由下式计算:

$$h_r = n_1 \cdot \left(\frac{P}{H}\right)^{n_2}$$

式中 H —接触副较软材料的显微硬度, N/cm^2 ,

$$H = 1.14 \times 10^4 \times \exp\left(1.94 \times \frac{T_w - T}{T_m + 273}\right) (\text{kg}/\text{cm}^2)$$

2) 在非铸轧区范围内, 铸轧辊与空气接触处为自然对流加辐射传热, 即 $r = \frac{D}{2}$, $0 \leq \varphi \leq (360 - \varphi_0)$, $-\frac{B}{2} \leq z \leq \frac{B}{2}$ 处

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial r} = h_a (t - t_{a\infty}) \quad (5)$$

$$h_a = h_c + h_r$$

式中 h_c 为气体自然对流换热系数; h_r 为辐射换热系数。

3) 铸轧辊冷却水槽与冷却水之间的传热采用紊流对流传热模型, 即 $r = \frac{d}{2}$, $-\frac{L}{2} \leq z \leq \frac{L}{2}$ 处

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial r} = h_w (t - t_l) \quad (6)$$

式中 d 为辊套内径; t_l 为冷却水入口温度; L 为铸轧辊长; h_w 为冷却水槽与冷却水之间的热交换系数, $W/(cm^2 \cdot ^\circ C)$, h_w 可按下式计算:

$$\frac{h_w D}{k_w} = 0.023 \left(\frac{D V_w}{\eta}\right)^{0.8} \left(\frac{C_w \eta}{K_w}\right)^{0.4}$$

式中 D —冷却水槽的当量直径, cm ; k_w —冷却水的导热系数, $W/(cm \cdot K)$; η —水的粘度, $g/(cm^2 \cdot s)$; V_w —水的流量, $g/(cm^2 \cdot s)$; C_w —水的比热容, $J/(g \cdot K)$

4) 在 $z = 0$ 剖面处, 可视为绝热, 即 $z = 0$ 处

$$\frac{\partial t}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

5) 沿辊身非铸轧区范围内, 铸轧辊与空气接触处为自然对流加辐射传热, 即 $r = \frac{D}{2}$, $\frac{B}{2} \leq z \leq \frac{L}{2}$ 或 $-\frac{L}{2} \leq z < -\frac{B}{2}$ 处

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial r} = h_a (t - t_{a\infty}) \quad (8)$$

3 分析计算

3.1 计算模型

计算某厂铸轧机, 已知辊径 D 、轧制速度 v 、带坯宽度 B 、轧辊初始温度和冷却液温度, 计算步骤如下:

1) 将轧辊离散为 1 012 个单元, 考虑轧辊表层温度合应力比中心的变化要大, 表层加密。

2) 轧辊的弹性模量 E 、泊松比 ν 、导热系数 k 、热膨胀系数 α 等物理参数均是温度的函数, 因而弹性矩阵 $[D]^e$ 也是温度的函数, 用回归计算处理。辊芯与辊套取不同物理参数。

3) 冷却水的流量和压力保持不变。

4) 假设轧辊不运动, 其边界作用绕轧辊反方向运动, 不必重新网格划分, 即轧辊在某一时刻的初始温度场就是上一时刻增量步结束的最终值。

3.2 计算结果

用上述模型与边界条件, 对某厂铸轧机计算其温度场、变形场、应力场, 计算结果如图 2~5 所示。

3.3 试验测试

测试条件(工艺参数)如表 1 所列, 变形量见图 6。

3.4 结果分析

图 2 表示了理论计算的铸轧辊变形的规律, 与图 6 的测试结果比较相吻合, 即铸轧辊变形于辊中

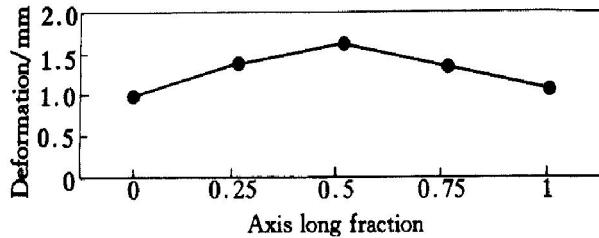


图 2 理论计算的铸轧辊变形轴向分布

Fig. 2 Calculated axial distribution of cast roller deformation

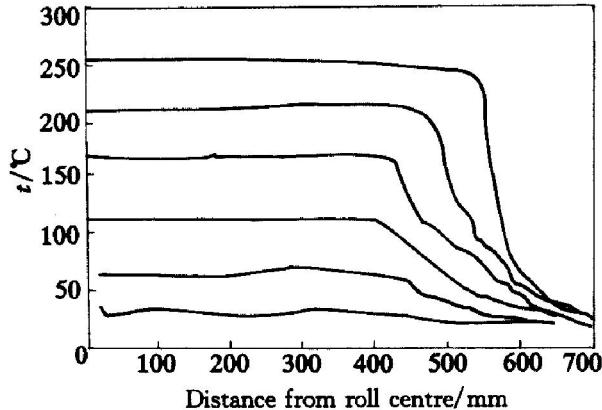


图 3 半辊轴向不同辊径的温度分布

Fig. 3 Calculated temperature field of half cast roller

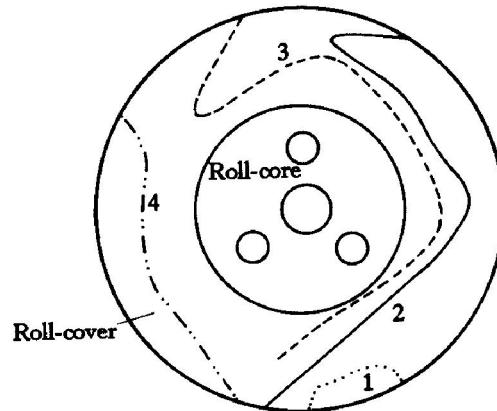


图 4 铸轧辊中轴面等温线分布

Fig. 4 Temperature field of cast roller
1—310 °C; 2—270 °C; 3—225 °C; 4—45 °C

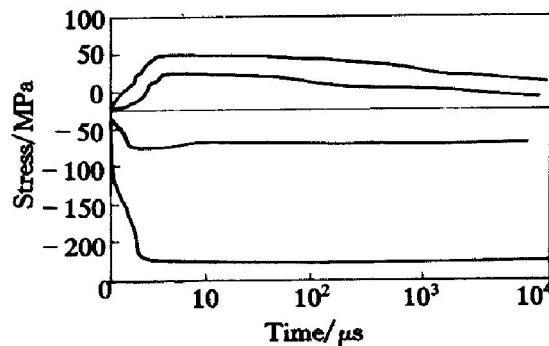


图 5 辊芯辊套结合面应力曲线

Fig. 5 Stress curve in contact face between roll-cover and roll-core

表 1 测试工况和测试条件(工艺参数)

Table 1 Test condition(technology parameters)

| Al liquid temperature / °C | Cast rolling high / mm | Cast rolling plank breadth / mm |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 694 | 74 | 1 325 |
| Import water pressure / MPa | Cast rolling speed / (m·min⁻¹) | Room temperature / °C |
| 0.2 | 1.04 | 31 |

部大, 边缘小, 基本呈抛物线分布, 最大值为 1.60 mm。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; 在铸轧区陡升(500 °C), 温度最大值点在铝液开始被冷却凝固的铸轧前区(图 4 中“1”等温线)。图 7 所示的测试数据(轧辊表面温度)与计算值(图 4 中温度等值线上的端点)比较吻合, 从铸轧开始一直上升到一稳定值(稳态), 而温度的变化梯大最大区也在与轧件相接触处附近。

从图 5 应力曲线可以看出: 铸轧开始时的一瞬间应力水平上升快, 随后趋于平稳而有所减小, 并

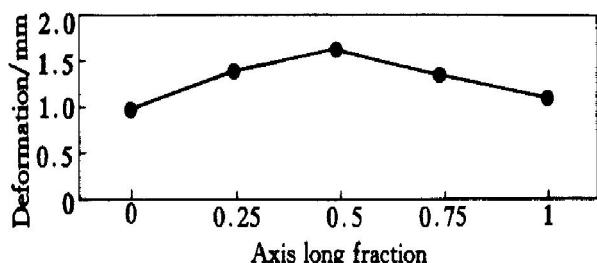


图6 铸轧辊变形轴向分布测试结果

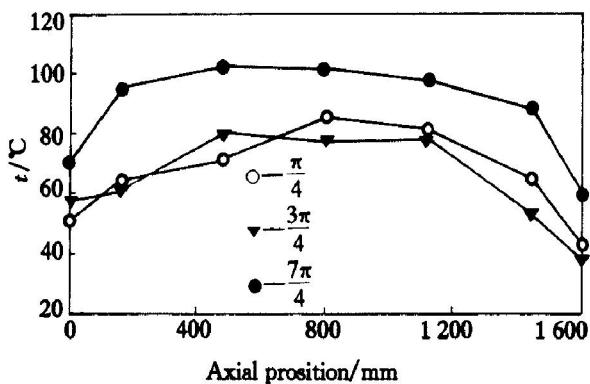
Fig. 6 Measured axial distribution of cast roller deformation

图7 辊面温度分布曲线

Fig. 7 Measured temperature distribution along roll axis

且在不同半径处应力性质有变化(拉、压应力)，即应力不连续状态，这便是辊芯与辊套滑移、错位的根本原因之一。

4 结论

- 1) 计算了铸轧辊的温度场其特点为铸轧开始时的一瞬间应力水平上升快，随后趋于平稳。
- 2) 从热弹性力学的角度，计算铸轧辊热力耦合变形，得到了铸轧辊变形基本呈抛物线分布的规律。
- 3) 得到的温度场和变形场数据与现场测试数据吻合较好，表明所建模型正确可信。
- 4) 通过对铸轧辊应力分析计算，找到了辊芯与辊套滑移、错位的根本原因之一：在不同半径处应力性质有突变。

[REFERENCES]

[1] 钟掘. 冶金机械数理基础与现代技术 [J]. 中南工

业大学学报, 1995, 5: 28- 38.

ZHONG Jue. The base of metallurgical machinery and modern technology [J]. Journal of Central South University of Technology, 1995, 5: 28- 38.

- [2] 王国栋. 板型控制理论与实践 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986. 288- 290.
- WANG Guo-dong. The Theory and Practice of the Shape Control [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1986. 288- 290.
- [3] 陈杰. 辊辊弹性变形理论与应用 [D]. 长沙: 中南工业大学, 1999.
- CHEN Jie. The theory and application of the roller elastic strain [D]. Changsha: Central South University of Technology, 1999.
- [4] 汪凌云. 1850 轧机辊系变形研究及板形预报 [J]. 钢铁, 1998, 6: 44- 48.
- WANG Ling-yun. The shape pre-judge and research for 1850 rollers strain [J]. Iron and steel, 1998, 6: 44- 48.
- [5] 连家创. 四辊轧机的辊形设计及辊形调整 [J]. 重型机械, 1984, 9: 22- 24.
- LIAN Jia-chuang. The design for four-rollers shape and adjust [J]. Heavy machinery, 1984, 9: 22- 24.
- [6] 邹家祥. 轧钢机械理论与结构设计 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993. 127- 134.
- ZHOU Jia-xiang. The Theory and Structure Design of Rolling Steel [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993. 127- 134.
- [7] 王洪纲. 热弹性力学概论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1989. 328- 350.
- WANG Hong-gang. Study on Thermoelasticity Mechanics [M]. Beijing: Qinghua University Press, 1989. 328- 350.
- [8] 李世显. 热辊型动态形成机理 [D]. 长沙: 中南工业大学, 1998.
- LI Shixian. Dynamic mechanism study on the thermal roller [D]. Changsha: Central South University of Technology, 1998.
- [9] 郭剑波. 热带钢连轧机工辊温度场和热凸度计算 [J]. 燕山大学学报, 1998, 7: 255- 258.
- GUO Jian-bo. The calculation of work rolls temperature field and thermal crown in hot strip mills [J]. Journal of Yanshan University, 1998, 7: 255- 258.
- [10] 丁克伟. 任意厚度闭合柱壳对称温度应力 [J]. 计算力学学报, 1999, 2: 167- 173.
- DING Ke-wei. Thermal stresses for open laminated cylindrical shells of arbitrary thickness [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 1999, 2: 167- 173.

Calculation of strain coupling thermal force for thin-gauge high-speed roll casting

XIONG Yong-gang^{1, 2}, YUN Zhong¹, WANG Qiao-yi^{1, 2}, WANG Wen-ming¹, TAN Jian-ping¹

(1. College of Mechanical and Electronical Engineering, Central South University,
Changsha 410083, China;

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

[Abstract] According to the characteristics of the thin-gauge high-speed roll casting roller, based on thermoelasticity mechanics, the stress-strain field coupling thermal force was analysed and calculated for the thin-gauge high-speed roll casting roller, and it was found that the stress in different radius changes suddenly, which is one of the basic reason of slide between the roll-cover and roll-core. The result fits well with the testing data. This indicates the model is right and trusty.

[Key words] casting roller; computing model; stress-strain field; coupling thermal force

(编辑 朱忠国)