

文章编号: 1004-0609(2003)01-0051-05

# 1400F 轧机工作辊与冷却液之间的换热特性<sup>①</sup>

尹凤福<sup>1, 2</sup>, 李谋渭<sup>1</sup>, 张大志<sup>1</sup>, 刘鸿飞<sup>1</sup>, 梁志远<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083; 2. 山东理工大学设备系, 淄博 255012)

**摘要:** 在分析轧制过程中热量转移的基础上, 应用 ANSYS 有限元软件分析了 1400F 铝带轧机工作辊与冷却液之间的换热特性, 得到了工作辊表面与冷却液之间的对流换热系数, 以及对流换热中的冷却液喷射速度和温度的影响。模拟结果表明, 对流换热系数值和热流密度值均随工作辊表面温度降低而减小, 冷却液喷射速度的增大和温度的降低都会导致对流换热系数的增大。仿真结果得到了实验的验证, 为计算工作辊温度场提供了边界条件。

**关键词:** 对流换热系数; 工作辊; 冷却液; 有限元

**中图分类号:** TG 335.5; TK 124

**文献标识码:** A

带材轧制过程中工作辊变形主要有两种类型, 即轧制力引起的变形和板形调控机构引起的变形。轧制过程中轧件在两工作辊之间产生塑性变形, 工作辊受到反作用力后就会产生挠曲, 由轧制力引起工作辊变形的另一原因是工作辊压扁。板形调控机构用来对轧机的辊缝形状做适当的人为调整, 以获得良好的板形, 这些板形调控手段有弯辊、倾斜、轧辊移动、喷淋冷却等。喷淋冷却是以热胀冷缩的形式使轧辊变形, 从而产生所要求的轧辊凸度, 这是一个复杂的热量转移过程, 因为喷淋冷却(即局部分段冷却)控制系统具有非线性、强耦合、大滞后等特性, 故很难建立精确的热量转移数学模型, 其难点在于无法获得冷却液与工作辊之间精确的对流换热系数。目前的对流换热系数大多采用经验公式计算, 结果差别较大<sup>[1~7]</sup>。本文作者尝试用有限元分析了这个热量转移过程中的换热特性。

## 1 实际轧制过程中的对流换热分析

实际工程问题中经常遇到的对流传热问题, 往往是流体与固体壁面接触时, 由于温差的存在引起的热量交换, 在这个过程中不但有流体的对流作用, 还有导热作用, 两者同时存在, 对流换热可用牛顿冷却方程来描述<sup>[8]</sup>:

$$\Phi = h(T_s - T_L)S$$

式中  $\Phi$  为对流传热中传递的热量;  $h$  为对流换热系数, 它的大小反映了对流换热的强弱;  $T_s$  为

固体表面的温度;  $T_L$  为流体的温度;  $S$  为固体表面与周围流体接触面积。

牛顿冷却方程仅仅给出了对流换热系数的定义, 研究对流换热的主要任务就是用各种方法得到不同情况下的一个具体数值。对流换热可以分为两类: 自然对流和受迫对流。自然对流是在流体内部冷热部分的密度不同而产生的浮升力的作用下发生流动的。受迫对流是由于水泵、风机或其它压差作用下所发生的流动。冷却液与工作辊之间对流换热属于受迫对流换热。下面简要分析一下冷却液与工作辊之间对流换热情况。

轧制过程中随着轧辊旋转, 轧辊表面反复接受变形热和摩擦热的热量输入, 以及喷淋冷却后冷却液带走的热量输出, 因此可大致将轧辊表面分为受热和冷却两个区:

1) 受热区 受热区域的温度变化只限于轧件和工作辊的接触弧附近, 热量来自变形热和摩擦热。在这个区域, 热量由接触弧以热传导方式传给工作辊和轧件, 使其温度升高。

2) 冷却区 冷却区包括冷却液直接喷射到工作辊表面的直接水冷区, 以及冷却液沿工作辊表面向下流动过程中形成的冷却区域。在这个区域中, 冷却液与工作辊之间的对流换热系数较大, 是工作辊的主要冷却区域。此时的冷却能力因工作辊表面的温度、冷却液流量、冷却液温度和压力、冷却液喷射方式等不同而各异。

3) 其它区域 主要是受热区和冷却区以外的区

① 收稿日期: 2002-03-18; 修订日期: 2002-05-17 作者简介: 尹凤福(1969-), 男, 博士研究生  
通讯联系人: 尹凤福, 北京科技大学机械工程学院 99 博, 电话: 010-62348476; E-mail: yinff3@Sohu.com.

域。这些区域中，工作辊表面与空气接触，从而也形成了对流换热，一般这个区域的对流换热系数较小，对工作辊表面温度的影响也较小。

## 2 有限元模型及边界条件

1400F 轧机分段冷却部分是一排喷嘴喷射冷却液到工作辊表面，在建立有限元模型时应加以简化，可只模拟一个喷嘴与工作辊之间的换热特性。ANSYS 有限元软件中的 FLOTRAN 功能是一个专门用于分析流体流动场的先进工具，利用 FLOTRAN 分析中的流热耦合分析，通过求解质量、动量和能量 3 个守恒方程以及温度方程和湍流方程等<sup>[9, 10]</sup>，可得到不同参数和边界条件下的换热特性，为下一步的温度场计算及热力耦合计算提供基础<sup>[11~ 14]</sup>。

### 2.1 有限元模型

根据实际情况简化后，只模拟一个喷嘴与工作辊之间的换热特性(在模拟及后面的实测中，基本润滑部分的作用可认为是恒定的，故暂不考虑)。在进行有限元分析时首先以实际几何尺寸建立几何模型，然后用映射网格划分几何模型，得到的有限元模型如图 1 所示。求解区域包括了流体在流动过程中所经过的区域，流体以一定的初速度从 A-B 处喷射出，然后喷到工作辊圆弧 C-D-E 上，划分网格的区域包含了流体在流动过程中可能经过的地方，边界条件设置在 A-B 和 C-D-E 边界上。经初步计算雷诺数在 10<sup>5</sup> 数量级，处于紊流状态，FLOTRAN 分析计算中应激活紊流选项，流体按不可压缩流体计算。经过反复试算后表明当单元的尺寸减小到 0.3 mm 时，计算结果是收敛的。对于流体没有经过的区域，单元尺寸可稍加大，这是为了减少单元数、提高运算速度，又不至于影响计算结果的精度。

#### 2.2 边界条件与初始条件

计算过程中需要施加的边界条件包括冷却液的速度、压力、温度和 VFRC(volume fraction, 体积分数)，具体如下：

$$\begin{aligned}
 A-B \text{ 处} \quad & v_{LX} = v_{LX0} = 27 \text{ m/s}, \\
 & v_{LY} = v_{LY0} = -12 \text{ m/s}, \\
 & p = p_0 = 10.13 \text{ kPa}, \\
 & T_L = T_{L0} = 308 \text{ K (流体温度)},
 \end{aligned}$$

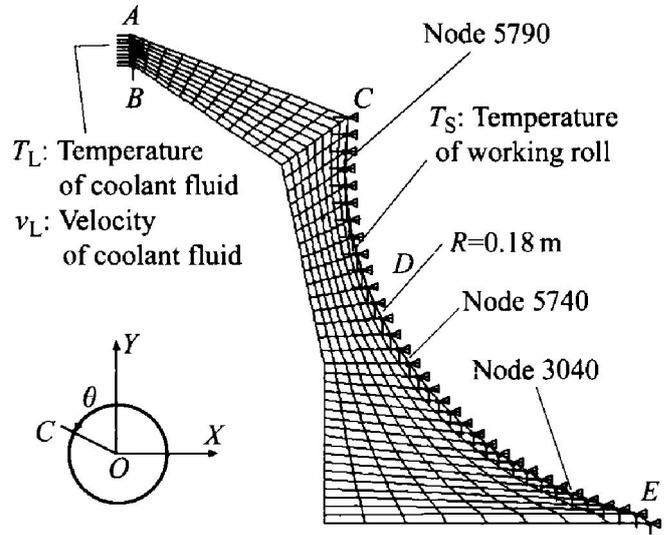


图 1 对流换热分析的有限元网格划分示意图

Fig. 1 Gridding of finite element analysis of convective heat transfer analysis

VFRC= 1 (初始 VFRC= 1)

圆弧 C-D-E 处  $T_S = T_{S0} = \{383 \text{ K}, 363 \text{ K}, 343 \text{ K}, 313 \text{ K}\}$

其余边界为自由未知边界，重力加速度  $g_Y = 9.8 \text{ m/s}^2$ ，以上的  $v_{LX0}$ ,  $v_{LY0}$ ,  $T_0$  为初始条件。

### 2.3 流体材料特性

1400F 铝带箔轧机中的冷却液材料主要是以低粘度的矿物油(煤油)作为基础油，再加 1%~ 5% 油性添加剂、抗氧化剂、极压剂等组成的。因而，流体材料特性以煤油特性为准。在 37.8 °C 时，煤油的运动粘度为  $1.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ <sup>[12]</sup>。在 0~ 34 °C 时煤油的热导率是 0.17 W/(m·K)，煤油的密度按 800 kg/m<sup>3</sup>，煤油的比热容按 2 207 kJ/(kg·K) 计算。

## 3 有限元仿真结果及对应的实验

根据已经建立的有限元模型、施加的边界条件与初始条件、流体材料特性以及分析参数的设置，进行了工作辊与冷却液之间换热特性的有限元仿真，得到了工作辊表面的换热特性，如图 2~ 6 所示，图中的横坐标是沿工作辊圆周方向的距离(图 1 中的角度  $\theta$  对应工作辊圆弧长)，0.55 m 大致对应图 1 中的 C 点，0.8 m 大致对应 E 点。

图 2 表示出了工作辊表面 3 个节点位置处的换热系数曲线，3 个节点的位置见图 1，节点 5790 的位置在冷却液冲击区域附近，节点 5740 的位置在工作辊表面冷却圆弧的中点，节点 3040 在冷却圆

弧的末端。从图中可看出: 3 个节点的换热系数曲线接近于一条水平直线, 这表明流体状态稳定后换热系数值是稳定的; 不同位置的换热系数值是不同的, 在工作辊上部区域的换热系数值最大, 冷却圆弧末端的换热系数值因受流体温度升高的影响而最小, 冷却圆弧中点的换热系数值居中。图 3 和 4 分别表示了在工作辊表面温度不同条件下与冷却液之间的换热系数和热流密度。从图 3 中看出, 在 343 K 到 363 K 之间工作辊表面温度对换热系数的影响明显小于 313 K 到 343 K 之间的对应值, 这表明在接近室温时冷却液与工作辊之间对流换热作用明显减弱。从 313 K 到 363 K, 热流密度曲线上的变化却是明显的, 即温度变化越大, 转移的热量也越多。

目前, 铝带轧机方面对有关对流换热系数的经

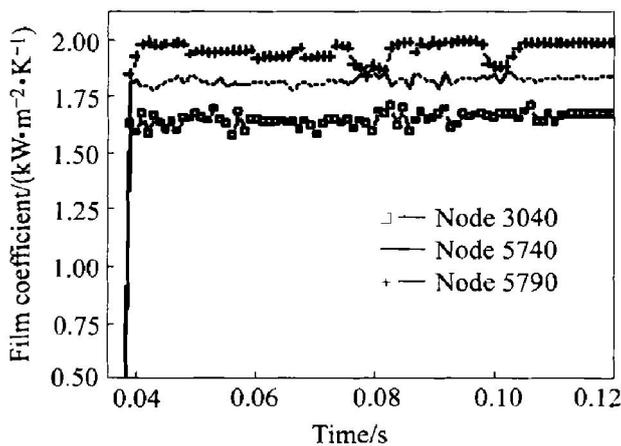


图 2 不同位置的工作辊表面与冷却液之间的换热系数

Fig. 2 Film coefficients variation with position of working roll surface

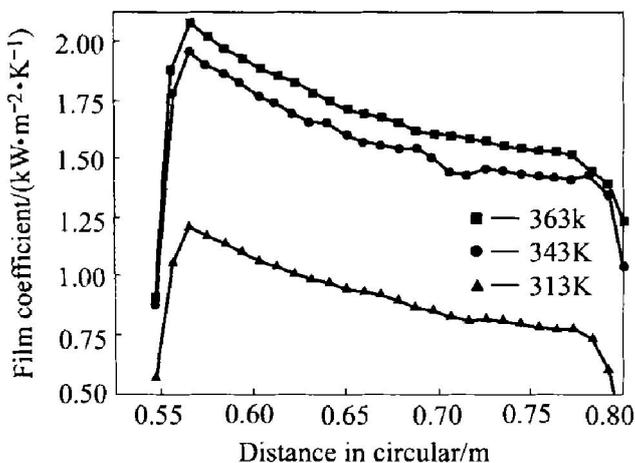


图 3 在不同的工作辊表面温度下辊表面与冷却液之间的换热系数的关系

Fig. 3 Film coefficients variation with surface temperature of working roll

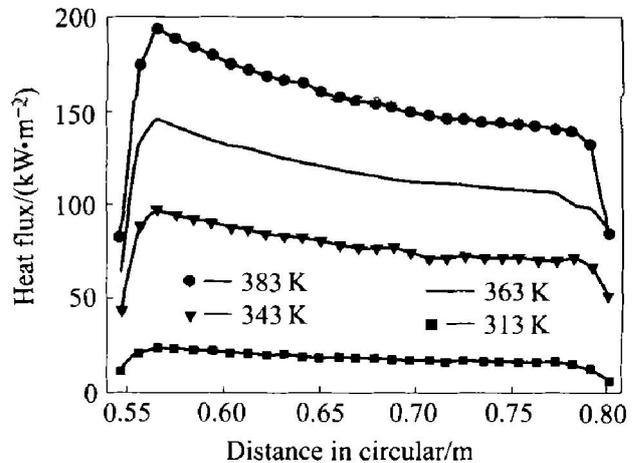


图 4 在不同的工作辊表面温度下辊表面与冷却液之间的热流密度的关系

Fig. 4 Heat flux variation with surface temperature of working roll

验值较少, 若按照参考文献[13]中给出的带钢轧机中, 直接水冷区域的对流换热系数值最大可达  $116\ 300\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 常用的范围是  $1\ 163 \sim 5\ 815\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  之间, 而本文的仿真结果的范围大致在  $1\ 000 \sim 2\ 000\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  之间, 与带钢轧机相比, 对流换热系数值小的主要原因可能在于冷却介质物理性能的不同, 水与煤油在粘度、热导率、比热等方面存在差异, 尤以比热差异最大。实际冷却区的换热系数会因冷却条件不同而存在差异, 在此仅供参考。

在上述仿真计算对流换热系数的基础上, 还进行了对应的实验验证。当 1400F 铝带冷轧机处于正常工作状态后(实验时的轧制材料是 1200), 测量工作辊的辊面温度 ( $38.2\ ^\circ\text{C}$ ), 然后使工作辊旋转并喷射冷却液 60 s, 再测量工作辊温度 ( $36.1\ ^\circ\text{C}$ )。实验仪器为接触式温度计, 精度  $0.1\ ^\circ\text{C}$ 。仿真计算时工作辊的初始温度设定为  $38.2\ ^\circ\text{C}$ , 然后施加一个按温度变化的对流换热系数, 计算时间是 60 s, 得到的工作辊辊面温度与实测值接近。

实际问题中的很多参数都会影响工作辊与冷却液之间的换热特性, 例如, 冷却液的温度、速度、流量以及喷嘴的位置、喷射角度等, 在此只列出冷却液的温度和速度对换热特性的影响(分别见图 5 和 6)。冷却液温度的变化与换热系数之间的关系如图 5 所示。模拟结果表明, 当冷却液温度值降低  $5\ ^\circ\text{C}$  时, 在仿真的冷却液温度范围内对应的换热系数值大约增大 8%。由此可见, 降低冷却液温度值, 对增强冷却效果也非常明显。

从图 6 中可很明显地看出, 随着冷却液喷射速度的增大, 冷却液与工作辊之间的对流换热系数在

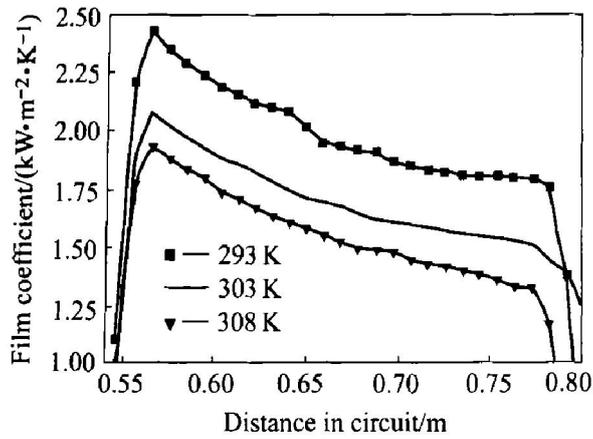


图5 冷却液温度不同条件下的换热系数  
Fig. 5 Film coefficients variation with temperature of coolant fluid

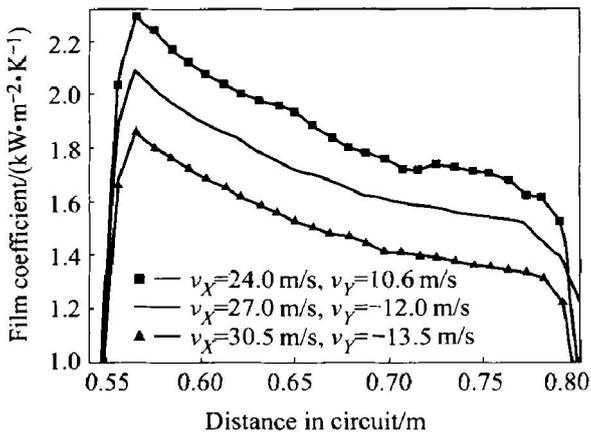


图6 冷却液喷射速度不同条件下的换热系数  
Fig. 6 Film coefficients variation with velocity of coolant fluid

增大, 而且在整个冷却区域内都遵循这个规律。原因在于冷却液喷射速度的增大实际上也就是冷却液流量的增大, 单位时间内参与热交换的冷却液体积增大, 从而导致了换热作用的增强。实际的模拟结果表明, 当速度绝对值增大 12.6% 时, 在仿真的速度范围内对应的换热系数值大约也增大 12%。增大冷却液的喷射速度, 对增强冷却效果也非常明显。

#### 4 结论

在分析轧制过程中热量转移的基础上, 应用大型有限元软件 ANSYS 分析了铝带轧机工作辊与冷却液之间的换热特性, 得到了工作辊表面不同温度下与冷却液之间的对流换热系数, 并给出了工作辊表面不同典型位置节点的对流换热系数曲线。仿真结果表明, 对流换热系数值和热流密度值均随工作辊表面温度降低而减小。文中还给出了冷却液的温度和速度对换热特性的影响, 冷却液喷射速度的增

大和温度的降低均导致对流换热系数值的增大。仿真结果得到了实际的验证, 为计算工作辊温度场提供了边界条件。

#### REFERENCES

[1] 钟掘, 段吉安. 现代复杂工艺制造系统的若干设计理论问题[J]. 机械工程学报, 2001, 37(12): 1-6.  
ZHONG jue, DUAN Ji'an. Several design problems for modern industrial manufacturing system [J]. China Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(12): 1-6.

[2] 金兹伯格著. 姜明东, 王国栋等译. 高精度板带轧制理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000. 293-313.  
Ginzburg V B. WANG Guo-dong Transl. High quality Steel Rolling: Theory And Practice[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000. 293-313.

[3] Nappez C. Control of strip flatness in cold rolling: a global approach [J]. Iron & Steel Engineer, 1997(4): 42-45.

[4] 乔俊飞, 郭戈, 柴天佑. 轧辊局部冷却控制系统的建模[J]. 钢铁研究学报, 1998, 10(6): 25-28.  
QIAO Jun-fei, GUO Ge, CHAI Tian-you. Modeling for partial cooling control system of rolls [J]. Journal of Iron and Steel Research, 1998, 10(6): 25-28.

[5] Goodwin G C. Analysis of thermal camber control in rolling mills [A]. In: Utkin Vetal ed. 11th World Congress "Automatic Control in the Service of Mankind" [C]. USSR: Tallinn, Estonia, 1990. 16.

[6] Downey. Differential roll cooling to control strip flatness and shape [J]. Steel Times, June, 1996(3): 226-229.

[7] Vladimir B G. Selection of optimum strip profile and flatness technology for rolling mills [J]. Iron & Steel Engineer, 1997(7): 30-37.

[8] 周筠清. 传热学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999. 2-25.  
ZHOU Jun-qing. Heat Transfer [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999. 2-25.

[9] ANSYS 分析手册[M]. 美国: ANSYS 公司北京办事处, 2000.  
Handbook of ANSYS analysis [M]. ANSYS Corp. Beijing Branch. 2000.

[10] 李世云, 张曙红, 张代明. 双金属复合带材轧制过程有限元模拟[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(6): 1078-1082.  
LI Shi-yun, ZHANG Shu-hong, ZHANG Dai-ming. Finite element simulation on rolling process of bimetal composite sheet [J]. The Chinese Journal of Nonferrous

- Metal, 2001, 11(6): 1078 - 1082.
- [ 11] 赵永和, 李重真, 郑长民. 大型铝带冷轧机轧辊温度场及热变形的研究[J]. 燕山大学学报, 1998, 22(7): 202 - 205.  
ZHAO Yong-he, LI Zhong-zhen, ZHENG Chang-men. The study of the temperature field and thermal deformation of the roll in large type mill [J]. Journal of Yan-shan University, 1998, 22(7): 202 - 205.
- [ 12] 王祝堂, 田荣璋. 铝合金及其加工手册[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2000. 10.  
WANG Zhu-dang, TIAN Rong-Zhang. Handbook of Aluminum Alloy and Manufacturing [M]. Changsha: Central South University Press, 2000. 10.
- [ 13] 日本钢铁协会编. 板带轧制理论与实践[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1990. 12.  
Japanese Association of Iron and Steel. Theory and Practice of Strip Rolling [M]. Beijing: Chinese Railway Press, 1990. 12.
- [ 14] 孔祥伟, 李壬龙, 王国栋. 轧辊温度场及轴向热凸度有限元计算[J]. 钢铁研究学报, 2000, 12(增刊): 51 - 54。  
KONG Xiang-wei, LI Ren-long, WANG Guo-dong. FEM calculation of temperature field and axial thermal crown for work roller [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2000, 12 (Supple) : 51 - 54.

## Convective heat transfer analysis between working roll and coolant fluid of mill 1400F

YIN Feng-fu<sup>1, 2</sup>, LI Mou-wei<sup>1</sup>, ZHANG Da-zhi<sup>1</sup>, LIU Hong-fei<sup>1</sup>, LIANG Zhi-yuan<sup>1</sup>  
( 1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing,  
Beijing 100083, China

2. Department of Equipment, Shandong University of Science and Technology, Zibo 255012, China)

**Abstract:** On the base of analysis of convective heat transfer during the milling, property of convective heat transfer between working rolls and coolant fluid of aluminum strip mill(1400F) was analyzed in detail with the famous software ANSYS. The value of film coefficients at different surface temperature of the working rolls was obtained. The effect of coolant fluid's velocity and temperature on convective heat transfer was also analyzed. The results of simulation show that the value of film coefficients and the value of heat flux will decrease as the surface temperature of the working roll drops. The value of film coefficients will increase with the rising speed and the reducing temperature of coolant fluid. These results are consistent with the experiments and provide the boundary conditions for working out the temperature field of the working rolls.

**Key words:** film coefficient; working rolls; coolant fluid; finite element analysis

(编辑 吴家泉)