

镁合金板材轧辊流体传热液固耦合传热模型研究

张国花¹, 马立峰¹, 黄庆学^{1,2}, 黄志权¹, 林金保¹, 刘鹏涛², 房大庆³

(1. 太原科技大学 重型机械教育部工程研究中心, 山西 太原 030024)

(2. 太原理工大学, 山西 太原 030024)

(3. 太原科技大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 针对目前镁合金板材轧制过程轧辊温度控制方式简易, 精度差, 易造成板材的板形、板厚及裂纹等缺陷, 采用流体循环流动传热的方式对轧辊进行温度控制, 且使用 Fluent 软件对二者间的流固耦合传热过程进行了数值模拟, 并进行了实验验证, 给出了其传热过程中轧辊温度场的趋势和规律。结果表明: 该方法加热轧辊时, 其表面温度分布较均匀, 边部与中间的温差最大为 6 °C, 且流体温度与速度对其影响较小; 在不同的流体温度和流体速度下, 轧辊表面温度均呈速率减小的趋势上升, 流体温度升高及速度增大时, 轧辊温升变快, 且流体温度对轧辊温升的影响大于流体速度对其的影响; 得出了在不同加热条件下, 轧辊表面的温度值与时间的关系式; 对轧辊停止加热后到轧辊表面开始降温有一段延续期, 流体的温度越高, 延长时间越长; 轧辊温升阶段的模拟结果与实验结果相比, 流体温度升高, 其误差变大, 轧辊温度升高, 误差也变大, 两者间最大误差为 16.16%, 总体结果较吻合, 表明该模型可以正确表示流体加热轧辊的传热过程。

关键词: 镁合金; 流体加热; 流固耦合; 传热模型; 数值模拟

中图分类号: TG146.22

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)08-2489-11

镁合金具有密度小、比强度高、散热好、消震性好、电磁屏蔽性能好、易于循环利用等一系列优点, 使其在航空、航天、汽车、高铁、电子产品等领域具有广泛的应用前景, 成为当今时代最有发展前景的有色金属材料^[1-7]。在镁合金板材轧制过程中, 温度对轧后板材的板形、板厚及裂纹等质量有非常大的影响^[7-10], 轧辊温度过低时, 会引起边裂和表面裂纹等缺陷, 轧辊温度过高时, 容易造成镁合金薄板黏辊和撕裂等缺陷^[10-12]。因此, 亟需开展对轧辊温度的在线精确控制方法和技术研究。

目前, 对镁合金板材轧辊加热的传统方法有感应加热法、电阻丝加热法、火焰加热法等^[13,14], 由于其存在加热时间长、加热不均匀、且温度过高时不能进行降温控制等问题, 本研究提出一种采用流体传热来进行轧辊温度调控的方法。镁合金板材轧制过程中存在着复杂的热传递过程, 镁板的变形热、摩擦热和与空气之间的对流传热和热辐射, 轧辊与镁板间的热传导和摩擦热及与外界的对流传热和热辐射, 流体与轧辊间的热传递, 见图 1 中箭头所示。镁合金变形热、

摩擦热等对温度场的影响较大, 尤其是薄板, 但轧制过程的温度场建立也很复杂, 故分两步走, 先是建立单一的轧辊与流体及空气间热传递的传热模型, 再在这个基础上把轧制传热过程耦合到一起。本研究先只进行轧辊与流体及空气间的热传递的传热模型的研究, 后续还需做大量的实验来修正理论模型。

因此以实验轧机的辊系(轧辊直径 $D=320$ mm, 辊身长 $L=350$ mm)为对象, 建立了轧辊流体传热过程的流固耦合模型, 基于 Fluent 软件环境, 研究了流体的温度与速度对轧辊温度的影响, 研究结果对轧制过程中轧辊温度的控制有重要指导意义, 可以精准有效地控制轧辊的温度。因此该研究可以解决现有镁合金板材轧制过程轧辊温度不能有效控制, 带来镁板凸度大、浪形严重及粘辊等缺陷, 可大幅提高镁合金板带材的轧制成材率。

1 轧辊流体传热结构设计^[15]

将轧辊辊身处设计温控油孔, 使流体循环流过油孔, 见图 2。在辊身处钻孔后, 其抗弯刚度必定会变

收稿日期: 2017-08-10

基金项目: NSFC-山西煤基低碳联合基金(U1510131); 山西省“青年三晋学者”计划; 晋城市科技计划项目(201501004-10); 山西省重点研发计划(201603D111004, 201603D121010); 江苏省“双创团队”领军人才项目; 国家自然科学基金青年项目(51604181)

作者简介: 张国花, 女, 1991 年生, 硕士, 太原科技大学重型机械教育部工程研究中心, 山西 太原 030024, 电话: 0351-2776769, E-mail: 1525686177@qq.com

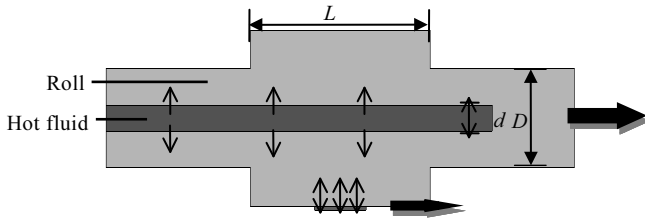


图 1 镁合金板材轧制过程中的热传递图

Fig.1 Heat transfer in the process of magnesium alloy sheet rolling

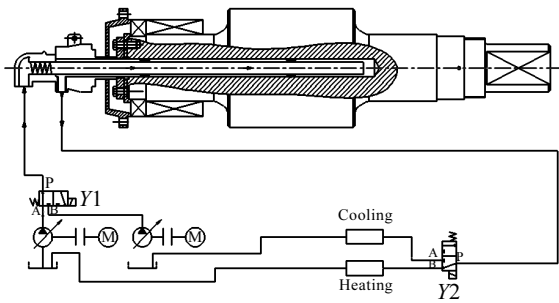


图 2 热流体加热轧辊简图

Fig.2 Schematic diagram of thermal fluid heating work roll

小, 为了防止由抗弯刚度不足引起一系列问题的出现, 所以设计孔时将抗弯强度减小率 M 控制在 8% 以内。

钻孔前的轧辊辊身处的抗弯刚度为: $E \frac{\pi D^4}{64}$, 钻孔后

轧辊辊身处最小抗弯刚度为:

$E \frac{\pi D^4 - 2n\pi d^4 - 16\pi Qs^2 d^2}{64}$, 对于实心轧辊本实验所述

轧辊辊身刚度减小量: $E(\frac{2n\pi d^4}{64} - Q \frac{\pi s^2 d^2}{4})$, 抗弯强度

减小率: $M = \frac{(2nd_0^2 + 16Qs^2)d_0^2}{D^4} \times 100\% \leq 8\%$ 。

式中, E 为轧辊材料的弹性模量 (Pa); d 为温控油孔的直径 (m); D 为轧辊辊身直径 (m); s 为温控油孔的中心与轧辊横截面中心的距离 (m); n 为温控油孔的数量的一半 (温控油孔个数为偶数);

$Q = \min[\sum_{k=0}^{k=2n-1} (\sin(x + \frac{\pi}{n}k))^2]$ (k 为整数, x 为实数且满足

$-\frac{\pi}{n} \leq x \leq \frac{\pi}{n}$, Q 值可由数学软件 MATLAB 求得)。

以上述轧辊为研究对象, 求得温控轧辊辊身上的温控油孔的直径为 48 mm, 温控油孔的数量为 1 个, 温控油孔的中心与温控轧辊横截面的中心重合, 此时轧辊辊身抗弯强度减小率为 5.32%, 符合要求。所述

温控轧辊装置采用的导热油根据实际使用需求为 L-QD330, 工作温度为 20~300 °C。

2 传热解析模型的建立^[16-18]

研究导热问题时, 最精确的求解方法是数学分析法, 但是分析法只能求解一些简单的导热问题, 很多复杂的导热问题只能通过数值计算得到, 所以本研究采用有限差分法对其进行计算。

2.1 假设条件

1) 假设轧辊温度场轴向对称, 将流体传热轧辊模型的三维复杂模型简化为空心圆柱二维非稳态导热模型。

2) 轧辊和流体的物理性能参数不随时间发生变化。

3) 将流体和轧辊内壁传热时的边界条件及轧辊外壁和外界边界条件视为第三类边界条件。

2.2 传热过程的计算

空心圆柱上的温度分布 $T(r, t)$ 随时间 t 和位置 r 的变化而变化, 初始温度分布为 $T(r, 0) = T(r)$, 空心圆柱半径范围为: $r_1 < r < r_2$ ($r_1 = 0.024$ m, $r_2 = 0.160$ m)。则有:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} & r_1 < r < r_2, t > 0 \quad (1a) \\ T(r, 0) = T(r) & r_1 \leq r \leq r_2, t = 0 \quad (1b) \\ -\lambda \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} + h_1 T(r, t) = f_1 & r = r_1, t > 0 \quad (1c) \\ \lambda \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} + h_2 T(r, t) = f_2 & r = r_2, t > 0 \quad (1d) \end{cases}$$

式中 $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$, $f_1 = h_1 t_{f1}$, $f_2 = h_2 t_{f2}$, 其中: h_1 为流体与内壁的传热系数 ($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$), h_2 为外壁与空气的传热系数 ($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$), λ 为轧辊的导热系数 ($W/(m \cdot ^\circ C)$), ρ 为轧辊的密度 (kg/m^3), c 为轧辊的比热容 (kJ/kg), α 为轧辊的热扩散率 (m^2/s), t_{f1} 为流体的温度 ($^\circ C$), t_{f2} 为空气的温度 ($^\circ C$)。

将区域 (r, t) 划分成步长为 Δr 、 Δt 的网格, 见图 3。于是有:

$$r = j\Delta r \quad j = 0, 1, 2, \dots, N \quad L = r_2 - r_1 = N\Delta r \quad (2)$$

$$t = n\Delta t \quad n = 0, 1, 2, 3\dots \quad (3)$$

而温度可表示为

$$T(r, t) = T(j\Delta r, n\Delta t) \equiv T_j^n \quad (4)$$

对 $r=r_1$ 和 $r=r_2$ 处的边界条件分别用向前差分和向后差分, 得

$$-\lambda \frac{T_1^{n+1} - T_0^{n+1}}{\Delta r} + h_1 T_0^{n+1} = f_1 \quad (5)$$

$$\lambda \frac{T_N^{n+1} - T_{N-1}^{n+1}}{\Delta r} + h_2 T_N^{n+1} = f_2 \quad (6)$$

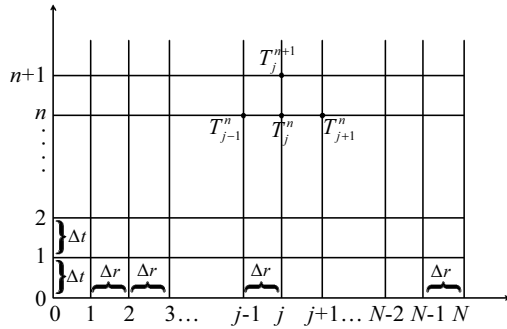


图 3 区域 (r, t) 中步长为 Δr 、 Δt 的网格

Fig.3 Grid of step length for Δr 、 Δt in area (r, t)

整理上式分别求出 T_0^{n+1} 和 T_N^{n+1} ：

$$T_0^{n+1} = \frac{1}{1+(h_1\Delta r/\lambda)} [T_1^{n+1} + \frac{f_1\Delta r}{\lambda}] \quad (7)$$

$n = 0, 1, 2, \dots; j = 0$

$$T_N^{n+1} = \frac{1}{1+(h_2\Delta r/\lambda)} [T_{N-1}^{n+1} + \frac{f_2\Delta r}{\lambda}] \quad (8)$$

$n = 0, 1, 2, \dots; j = N$

其截断误差的数量级为 Δr ，对式(1a)进行差分计算得

$$\frac{T_{j-1}^n - 2T_j^n + T_{j+1}^n}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{T_{j+1}^n - T_{j-1}^n}{2\Delta r} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{T_j^{n+1} - T_j^n}{\Delta t} \quad (9)$$

结合式(2)整理得：

$$T_j^{n+1} = (1 - \frac{1}{2j})mT_{j-1}^n + (1 - 2m)T_j^n + (1 + \frac{1}{2j})mT_{j+1}^n \quad (10)$$

$j = 1, 2, 3, \dots, N-1 \quad n = 0, 1, 2, \dots$

其中， $m = \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta r)^2}$ ，其截断误差的数量级为 $(\Delta r)^2 + \Delta t$ ，

式(10)的右边包括 $j=1$ 时的 T_0^n 和 $j=N-1$ 时的假想温度 T_N^n ，这些温度可由式(7)和式(8)计算得到，将上标 $n+1$ 代替为 n ，然后将得到的 T_0^n 和 T_N^n 代入式(10)，其结果综合如下：

$$T_0^{n+1} = \frac{1}{\beta_1} (T_1^{n+1} + \gamma_1) \quad j = 0 \quad (11)$$

$$T_1^{n+1} = (1 - 2m + \frac{m}{2\beta_1})T_1^n + \frac{3}{2}mT_2^n + \frac{m\gamma_1}{2\beta_1} \quad j = 1 \quad (12a)$$

$$T_j^{n+1} = (1 - \frac{1}{2j})mT_{j-1}^n + (1 - 2m)T_j^n + (1 + \frac{1}{2j})mT_{j+1}^n \quad (12b)$$

$j = 2, \dots, N-2$

$$T_{N-1}^{n+1} = \frac{2N-3}{2N-2}mT_{N-2}^n + (1 - 2m + \frac{m}{\beta_2} \cdot \frac{2N-1}{2N-2})T_{N-1}^n + \frac{m\gamma_2}{\beta_2} \cdot \frac{2N-1}{2N-2} \quad j = N-1 \quad (12c)$$

$$T_N^{n+1} = \frac{1}{\beta_2} (T_{N-1}^{n+1} + \gamma_2) \quad j = N \quad (13)$$

其中， $n=0, 1, 2, \dots$ ，且 $\beta_i = 1 + \frac{h_i\Delta r}{\lambda}$ $\gamma_i = \frac{f_i\Delta r}{\lambda}$ ， $i=1$ 或 2 。

初始条件可写为：

$$T_j^0 = T(j\Delta r) \equiv T(r) \quad j = 0, 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

式(11)~(14)给出了热传导方程的全部有限差分表达式。求解方法如下所述。

式(12)为求解 $(N-1)$ 个未知节点温度 T_1^{n+1} ， $T_2^{n+1} \dots T_{N-1}^{n+1}$ 提供了 $(N-1)$ 个代数方程。由于运用显式格式，这些方程不是耦合的，可以单独进行计算。计算先从 $n=0$ 开始， $T_1^1, T_2^1 \dots T_{N-1}^1$ 可根据式(12)求出，然后依次再求 $n=1, 2, \dots$ 的温度值，由于 T_1^{n+1} 和 T_{N-1}^{n+1} 可以由式(12)求得，则边界表面温度 T_0^{n+1} 和 T_N^{n+1} 可分别根据式(11)和(13)计算得到。

一旦 α 和 Δr 被确定，时间步长 Δt 容许的大小便由稳定性判据来限制：

$$m \equiv \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta r)^2} \leq \frac{1}{2} \quad (15)$$

2.3 传热系数的计算

当孔的尺寸和流体种类确定后，流体与内壁之间的传热系数 h_1 与流体的温度和速度有关，本研究选择导热油为 L-QD330，导热油在不同温度下的各物理特性参数见表 1。流体温度分别取 100、125、150、175 $^{\circ}\text{C}$ ，流体速度分别取 0.08、0.12、0.16、0.20 m/s，求解不同的加热条件下，流固耦合间传热系数的大小。

热流体的雷诺数为 $Re_f = \frac{u_m d}{\nu_f}$ ，普朗特数为

$$Pr_f = \frac{c\rho\nu_f}{\lambda}$$

当 $Re_e > 10^4$ 即流体流态为紊流时：谢努尔

特数为 $N_{u_f} = 0.027Re_f^{0.8}Pr_f^{1/3}(\frac{u_f}{u_w})^{0.25}$ ，所以传热系数

$$h_1 = \frac{\lambda N_{u_f}}{d}$$

整理得：

$$h_1 = 0.027 \times \frac{u_m^{0.8} c^{1/3} \rho^{1/3} \lambda^{2/3}}{\nu_w^{0.25} \nu_f^{13/60} d^{0.2}} \quad (16)$$

表 1 导热油 L-QD330 在不同温度下的物理特性参数
Table 1 Physical property parameters of heat conduction oil L-QD330 at different temperatures

Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Density/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Specific heat/ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	Heat conducti- vity coefficient/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	Kinematic viscosity/ $\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$
100	819.1	2.147	0.132	5.8
120	815	2.212	0.130	3.9
150	800	2.330	0.128	2.48
170	785	2.351	0.126	1.85

由单位时间内流体的散热量等于进出口的焓差，

得： $\overline{Mc}(t_f' - t_f'') = h_1 \pi d l [\frac{1}{2}(t_f' + t_f'') - t_w]$ ，化简求得：

$$t_f'' = \frac{h_1 \pi d l (t_w - \frac{1}{2} t_f') + \overline{Mc} t_f'}{\overline{Mc} + \frac{1}{2} h_1 \pi d l} \quad (17)$$

其中： u_m 为流体的速度(m/s)， ν_f 为流体的运动粘度(m²/s)， c 为流体的比热(kJ/kg)， ρ 为流体的密度(kg/m³)， λ 为流体的导热系数(W/(m·°C))， u_f ， u_w 为以 t_f 和壁温 t_w 作为定性温度的流体动力粘度(Pa·s)， t_f'' 为以 t_f' 作为定性温度下的流体出口温度， $\overline{M} = \rho \frac{\pi d^2}{4} u_m$ 为流体的质量流量。

求出出口温度 t_f'' 后，代入 $t_f''' = \frac{1}{2}(t_f' + t_f'')$ 中，即可

求出全管长流体平均温度 t_f'' ，再将 t_f'' 作为定性温度，重新进行校核计算，依次迭代，直到计算出的出口温度与前次的出口温度差异小于 1% 为止。

轧辊与外界的传热主要是与空气的自然对流传热和热辐射，空气自然对流的表面传热系数为：

$$h_2' = 0.53 \lambda \left[\frac{g P_r (T - t_{f2})}{\nu^2 l (t_m + 273)} \right]^{1/4} \quad (18)$$

式中： $t_m = \frac{T + t_{f2}}{2}$ ，金属与空气间的辐射换热系数为：

$$h_2'' = \sigma \epsilon [(T + 273)^2 + (t_{f2} + 273)^2] [(T + 273) + (t_{f2} + 273)] \quad (19)$$

其中： λ 、 ν 、 P_r 分别是温度为 t_m 时空气的导热系数(W/(m·°C))、运动粘度(m²/s)、普朗特数， T 为轧辊的平均温度(°C)， σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数， 5.669×10^{-8} ， ϵ 为轧辊的辐射率， t_{f2} 为外界空气温度，取 20 °C。

外壁与外界的总传热系数为 $h_2 = h_2' + h_2''$ 。

3 数值模拟与实验

3.1 数值模拟

3.1.1 Pro/E 模型建立

根据上述所取轧辊的大小及其计算出的关于温控油孔位置和大小设计值(即轧辊直径为 320 mm，辊身为 350 mm，1 个油孔，油孔直径取 48 mm，油孔中心与轧辊中的距离重合)，在有限元软件 pro-E 中对温控轧辊及导热油进行建模，见图 4a。

3.1.2 Fluent 数值模拟

打开 ANSYS 14.0-Workbench 14.0-FLUENT-Geometry-右键 Import Geometry-导入建立好的模型；

Geometry-右键 Edit Geometry-选择 Meter 进入 Design Modeler，点击 Generate 生成模型，select-

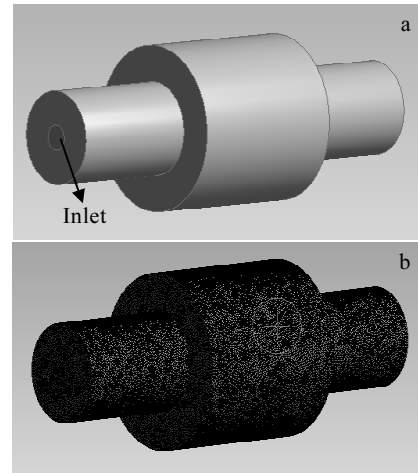


图 4 温控工作辊三维有限元模型

Fig.4 Three-dimensional finite element model of work roll

selection filter: bodies-select all-form new part，将流体部分设置为流体，将固体设置为固体，关闭 Design Modeler；

Mesh-右键 edit-设置轧辊的进出口面及轧辊的表面，对模型进行网格划分，综合考虑计算的时间和精确度，确定网格的最大值为 5⁻³ mm，最小值为 5⁻⁴ mm，由于导热油在流动过程中存在粘性，所以设置流体五层边界层，成长率为 1.1，划分好网格的模型如图 4b 所示，关闭 mesh；

Setup-右键 edit-状态改为 transient，温度单位改为 K，流体的状态设为紊流态，设置轧辊的参数，如表 2，轧辊的初始温度为 20 °C，对导热油速度分别 0.08、0.12、0.16、0.20 m/s 时的传热过程和温度分别在 100、125、150、175 °C 时的传热过程功进行 16 组数值模拟。

3.2 实验

将油温控制器、旋转接头及轧辊之间用通油软管连接成回路，对轧辊进行温升控制。轧辊的材料为 9Cr2Mo，对其在流体温度为 100~175 °C 和流体速度为 0.08~0.20 m/s 下进行多组实验，轧辊温度达到近似平衡状态时，停止加热，使其在室温环境中自然冷却。

在轧辊辊身方向平均取 8 个点，在辊身与辊颈过渡接触的地方，沿着轧辊两边径向方向平均取 3 个点，共 12 个点，如图 5 所示。用热电偶对其相应位置的温

表 2 轧辊的物性参数

Table 2 Physical property parameters of roll		
Density/ kg·m ⁻³	Specific heat/ kJ·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹	Heat conductivity coefficient/W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹
7800	0.86	49.8

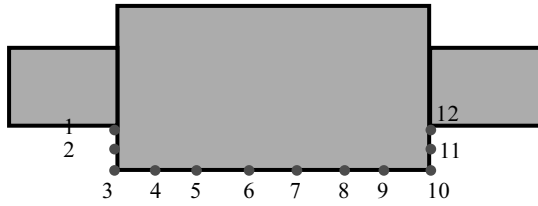


图 5 轧辊不同位置的取点
Fig.5 Different points on roll

度进行测试与记录。

4 结果与分析

4.1 模拟结果

在不同的流体温度 T_0 与流体速度 v 下，轧辊表面温度的模拟结果如图 6 所示。轧辊表面的温度值以速率减小的趋势上升，且随着流速的增大轧辊温升变快。在流体温度为 100 °C 下，当流速分别为 0.08、0.12、0.16、0.20 m/s 时，轧辊表面温度在 2.5 h 内从室温上升至 65、71、75、78 °C。在流体温度为 125 °C 下，当流速分别为 0.08、0.12、0.16、0.20 m/s 时，轧辊表面温度在 2.5 h 内从室温上升至 79、86、91、95 °C。在流体温度为 150 °C 下，当流速分别为 0.08、0.12、0.16、0.20 m/s 时，轧辊表面温度在 2.5 h 内从室温上

升至 93、102、108、113 °C。在流体温度为 175 °C 下，当流速分别为 0.08、0.12、0.16、0.20 m/s 时，轧辊表面温度在 2.5 h 内从室温上升至 107、118、125、130 °C。

流体温度为 100 °C 时，轧辊表面温度值 T 与加热时间 t 的关系式为：

$$\begin{cases} T = 18.57 + 63.92 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{110.55}\right) \right] & v = 0.08 \text{ m/s} \\ T = 17.95 + 67.18 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{93.86}\right) \right] & v = 0.12 \text{ m/s} \\ T = 17.83 + 68.80 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{82.93}\right) \right] & v = 0.16 \text{ m/s} \\ T = 17.92 + 69.68 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{75.47}\right) \right] & v = 0.20 \text{ m/s} \end{cases} \quad (20)$$

流体温度为 125 °C 时，轧辊表面温度值 T 与加热时间 t 的关系式为：

$$\begin{cases} T = 17.72 + 84.00 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{111.37}\right) \right] & v = 0.08 \text{ m/s} \\ T = 17.82 + 86.92 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{93.29}\right) \right] & v = 0.12 \text{ m/s} \\ T = 17.60 + 89.24 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{82.59}\right) \right] & v = 0.16 \text{ m/s} \\ T = 13.77 + 91.70 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{75.80}\right) \right] & v = 0.20 \text{ m/s} \end{cases} \quad (20)$$

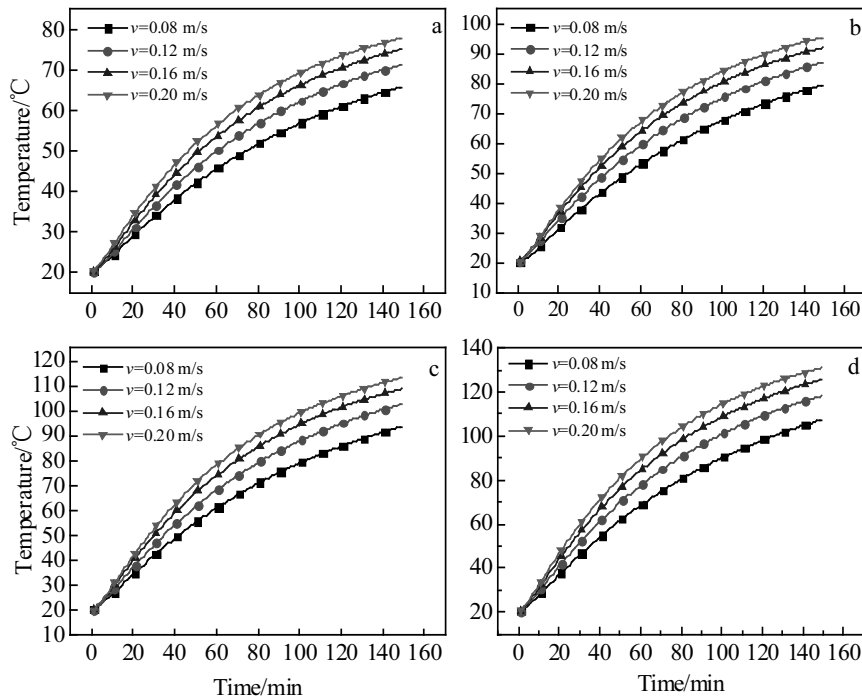


图 6 不同流体温度及不同流体速度下轧辊表面的温度变化趋势

Fig.6 Temperature of roll surface under various fluid temperatures and various velocities:

(a) $T_0=100$ °C, (b) $T_0=125$ °C, (c) $T_0=150$ °C, and (d) $T_0=175$ °C

流体温度为 150 °C 时, 轧辊表面温度值 T 与加热时间 t 的关系式为:

$$\begin{cases} T = 17.66 + 102.72 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{110.63}\right) \right] & v = 0.08 \text{ m/s} \\ T = 16.83 + 107.92 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{93.74}\right) \right] & v = 0.12 \text{ m/s} \\ T = 16.66 + 110.64 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{82.83}\right) \right] & v = 0.16 \text{ m/s} \\ T = 16.03 + 113.18 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{75.84}\right) \right] & v = 0.20 \text{ m/s} \end{cases} \quad (22)$$

流体温度为 175 °C 时, 轧辊表面温度值 T 与加热时间 t 的关系式为:

$$\begin{cases} T = 17.20 + 122.12 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{110.64}\right) \right] & v = 0.08 \text{ m/s} \\ T = 16.79 + 127.56 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{93.31}\right) \right] & v = 0.12 \text{ m/s} \\ T = 16.46 + 131.06 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{82.61}\right) \right] & v = 0.16 \text{ m/s} \\ T = 16.22 + 133.48 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{75.39}\right) \right] & v = 0.20 \text{ m/s} \end{cases} \quad (23)$$

当流体流速为 0.2 m/s 时, 流体温度分别为 100、125、150、175 °C 下轧辊温度的变化如图 7 所示。随

着流体温度的升高轧辊温升变快, 当不同流速下的流体加热轧辊 2.5 h 后, 轧辊表面温度分别为 78、95、113、130 °C, 对比不同流速下和不同温度下的流体加热, 得出流体温度对轧辊温升的影响大于流体速度的影响。

4.2 实验结果

当流体温度为 100 °C 时, 其不同流速下轧辊不同位置的温度变化如图 8 所示。当流体加热 110 min 后,

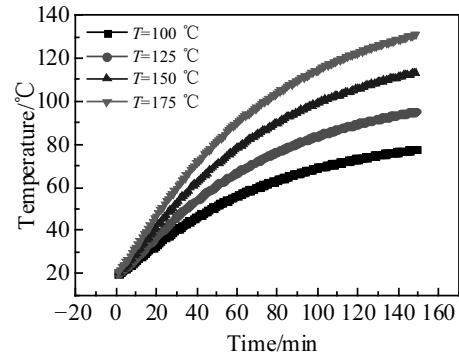


图 7 流体速度为 0.2 m/s 时不同导热油温度下的轧辊温度变化

Fig.7 Temperature variation under different roll temperatures at velocity of 0.2 m/s

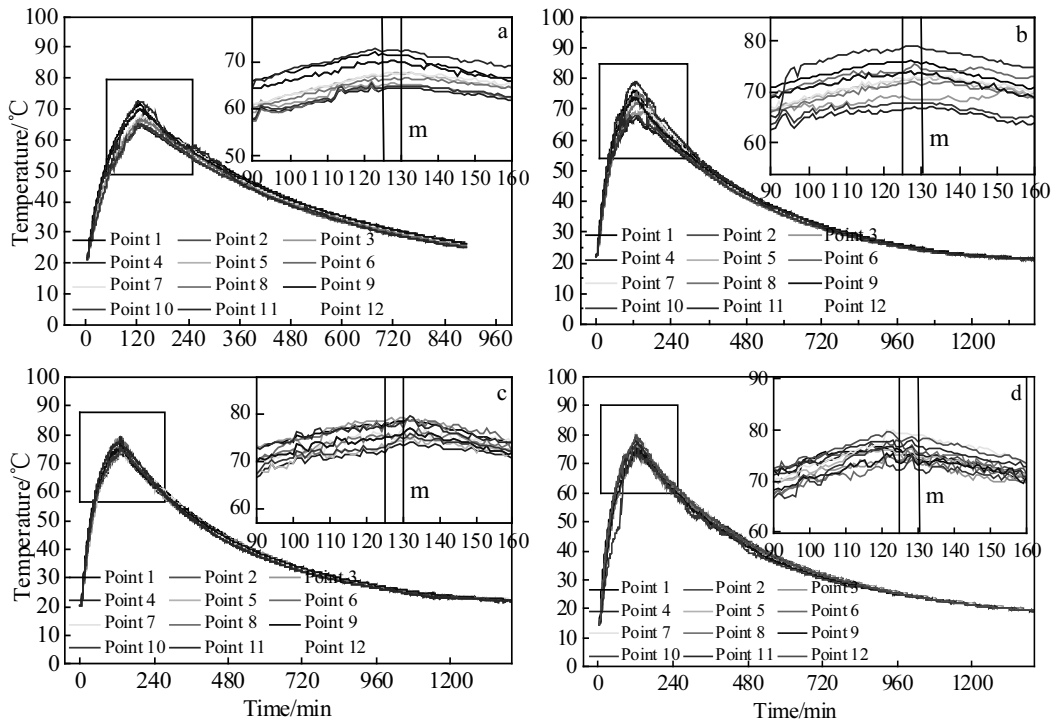


图 8 流体温度为 100 °C 时不同流速下的温度变化

Fig.8 Temperature variation under different velocities at 100 °C: (a) $v=0.08 \text{ m/s}$, (b) $v=0.12 \text{ m/s}$, (c) $v=0.16 \text{ m/s}$, and (d) $v=0.20 \text{ m/s}$

轧辊温度以很缓慢的速度升高，平均以 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/8\text{ min}$ 速度进行温升，可认为基本处于平衡状态，所以加热 125 min 后对其停止加热，但是由于轧辊内部温度高于轧辊表面温度使得温度变化有一段延长期，即停止加热后，温度不会立刻开始下降，而会延续一段时间后才慢慢下降，延长的时间随速度的改变基本不变，为 5 min 左右，如图 8 中 m 区所示。轧辊上的点在径向方向上的温度差，即图 5 中点 1 和点 3 的温度差和点 10 和点 12 的温度差最大为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，轧辊上的点在轴向上的温度差即点 3 和点 10 的温度差最大为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

不同流速下轧辊的温度变化趋势如图 9 所示。在加热阶段，轧辊温升趋势高度一致，流体的流速变大轧辊温升变快，达到稳定时的温度随着流速的增大而升高，流速分别为 0.08、0.12、0.16、0.20 m/s 时，达到稳定时的温度值为 66、72、74、75 $^{\circ}\text{C}$ 。停止加热后轧辊的降温趋势也高度一致，轧辊在空气中自然冷却时的温降速率很小，在冷却初期，以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的速率进行温降，随着时间的延长以斜率越来越小的趋势下降。

当流体温度为 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，其不同流速下轧辊不同位置的温度变化如图 10 所示。当流体加热 110 min 后，轧辊温度以很缓慢速度升高，平均以 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/6\text{ min}$ 速度进行温升，所以加热 125 min 后对其停止加热，停止加热后，温度延续 7 min 左右后慢慢下降，延长的时

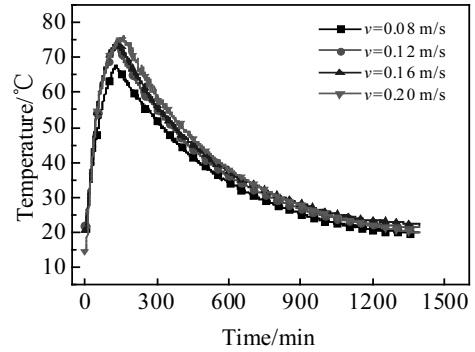


图 9 流体温度为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时不同流速下的温度比较

Fig.9 Temperature comparison under different velocities at $100\text{ }^{\circ}\text{C}$

间随速度的改变基本不变。轧辊上的点在径向方向上的温度差，即点 1 和点 3 的温度差和点 10 和点 12 的温度差最大为 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，轧辊上的点在轴向上的温度差即点 3 和点 10 的温度差最大为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

不同流速下轧辊的温度变化趋势如图 11 所示。在加热阶段，轧辊温升趋势高度一致，流体的流速变大轧辊温升变快，达到稳定时的温度随着流速的增大而升高，流速分别为 0.08、0.12、0.16、0.20 m/s 时，达到稳定时的温度值为 84、90、95、98 $^{\circ}\text{C}$ 。停止加热后轧

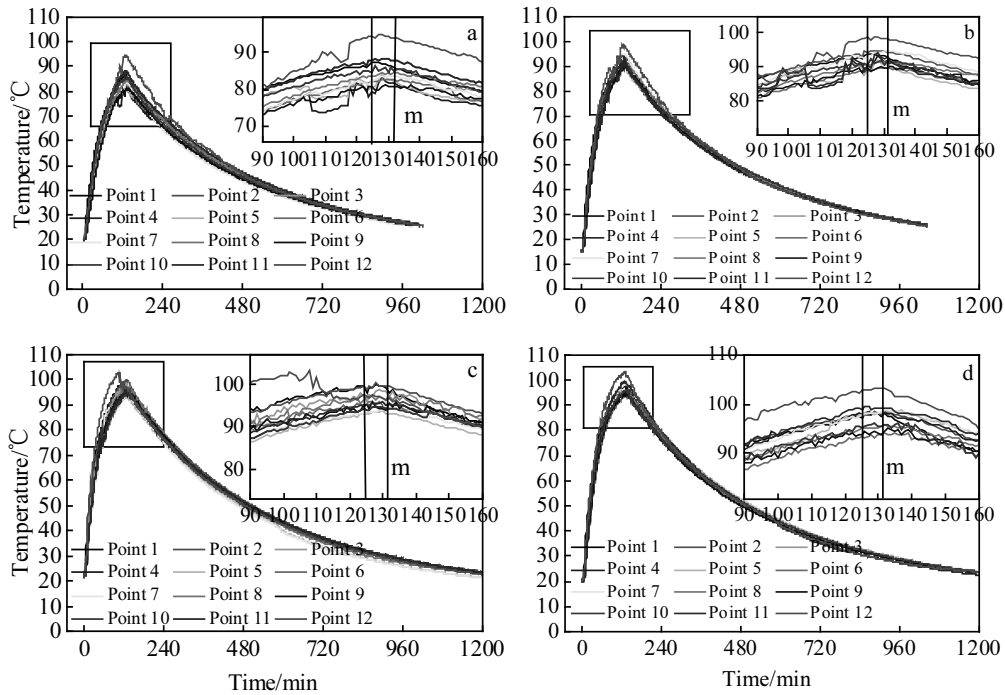


图 10 流体温度为 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时不同流速下的温度变化

Fig.10 Temperature variation under different velocities at $125\text{ }^{\circ}\text{C}$: (a) $v=0.08\text{ m/s}$, (b) $v=0.12\text{ m/s}$, (c) $v=0.16\text{ m/s}$, and (d) $v=0.20\text{ m/s}$

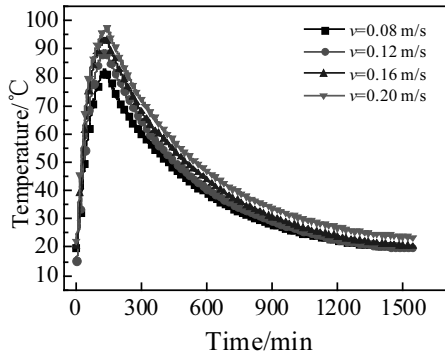


图 11 流体温度为 125 °C 时不同流速下的温度比较

Fig.11 Temperature comparison under different velocities at 125 °C

辊的降温趋势也高度一致, 轧辊在空气中自然冷却时的温降率度很小, 在冷却初期, 以 10 °C/h 的速率进行温降, 随着时间的延长以斜率越来越小的趋势下降。

当流体温度为 150 °C 时, 其不同流速下轧辊不同位置的温度变化如图 12 所示。当流体加热 120 min 后, 轧辊温度以很缓慢的速度升高, 平均以 1 °C/8 min 速度进行温升, 所以加热 140 min 后对其停止加热, 停止加热后, 轧辊温度延续 7 min 左右后慢慢下降, 延

长的时间随速度的改变基本不变。轧辊上的点在径向方向上的温度差, 即点 1 和点 3 的温度差和点 10 和点 12 的温度差最大为 8 °C, 轧辊上的点在轴向上的温度差即点 3 和点 10 的温度差最大为 5 °C。

不同流速下轧辊的温度变化趋势如图 13 所示。在加热阶段, 轧辊温升趋势高度一致, 流体的流速变大轧辊温升变快, 达到稳定时的温度随着流速的增大而升高, 流速分别为 0.08、0.12、0.16、0.20 m/s 时, 达到稳定时的温度值为 105、108、110、112 °C。停止加热后轧辊的降温趋势也高度一致, 轧辊在空气中自然冷却时的温降率度很小, 在冷却初期, 以 15 °C/h 的速率进行温降, 随着时间的延长以斜率越来越小的趋势下降。

当流体温度为 175 °C 时, 其不同流速下不同位置的温度变化如图 14 所示。当流体加热 120 min 后, 轧辊温度以很缓慢的速度升高, 平均以 1 °C/8 min 速度进行温升, 所以加热 140 min 后对其停止加热, 停止加热后, 轧辊温度延续 10 min 左右后慢慢下降, 延长的时间随速度的改变基本不变。轧辊上的点在径向方向上的温度差, 即点 1 和点 3 的温度差和点 10 和点 12 的温度差最大为 9 °C, 轧辊上的点在轴向上的温度差即点 3 和点 10 的温度差最大为 6 °C。

不同流速下轧辊的温度变化趋势如图 15 所示。在

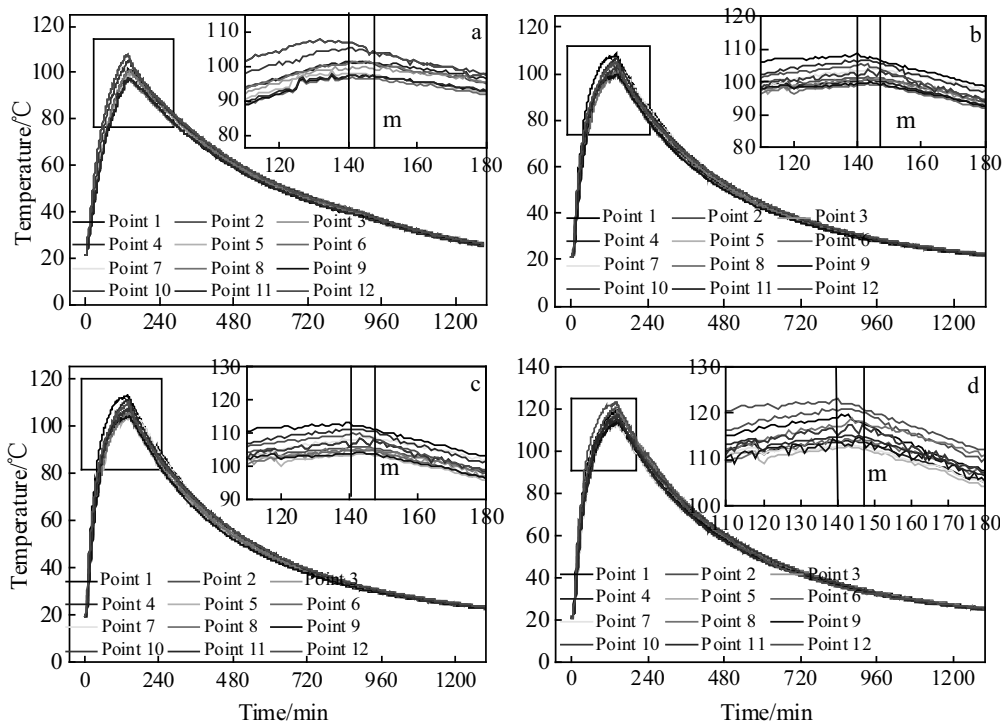


图 12 流体温度为 150 °C 时不同流速下的温度变化

Fig.12 Temperature variation under different velocities at 150 °C: (a) v=0.08 m/s, (b) v=0.12 m/s, (c) v=0.16 m/s, and (d) v=0.20 m/s

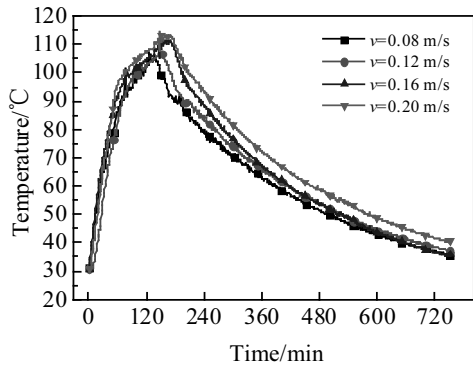


图 13 流体温度为 150 °C 时不同流速下的温度比较

Fig.13 Temperature comparison under different velocities at 150 °C

加热阶段，轧辊温升趋势高度一致，流体的流速变大轧辊温升变快，达到稳定时的温度随着流速的增大而升高，流速分别为 0.08、0.12、0.16、0.20 m/s 时，达到稳定时的温度值为 117、125、131、135 °C。停止加热后轧辊的降温趋势也高度一致，轧辊在空气中自然冷却时的温降率度很小，在冷却初期，以 15 °C/h 的速率进行温降，随着时间的延长以斜率越来越小的趋势下降。

当流体的流速最大为 0.2 m/s 时，温度不同时，其轧辊的温度场变化如图 16 所示。流体温度越高，轧辊温升越快，且达到基本稳定时的温度值越高。当流体温度为 100、125、150、175 °C 时，轧辊温度达到稳定时的值分别为 75、96、116 °C，且流体温度越高，在温降阶段温度下降速度越快，降到室温的时间的基本一致。

由上述不同流速下和不同温度下的轧辊温度变化比较可知，流体速度对轧辊温度的影响相对较小，流体温度对轧辊温度的影响相对较大，所以采用升高流体温度的方法来加快轧辊的预热，提高轧辊表面的温度值。

4.3 模拟结果与实验结果对比

实验结果与模拟结果比较如图 17 所示。在流体温度分别为 100、125、150、175 °C 4 个温度下的轧辊温度值比较，其误差范围分别为 0.18%~8.43%、0.08%~13.35%、0.03%~13.26%、2.6%~16.16%，得出流体温度越高，模拟结果与实验结果的误差越大，且随着轧辊温度的升高，误差越来越大。主要原因是：当流体温度变高时，流体的物理性能参数会发生变化，参数在其原范围内的取值还有待精准；当轧辊温度变高时，与外界的温差变大，从而传递的热量变多，故与模拟结果相差变大，所以下步需要修正轧辊在空气中的散热系数。

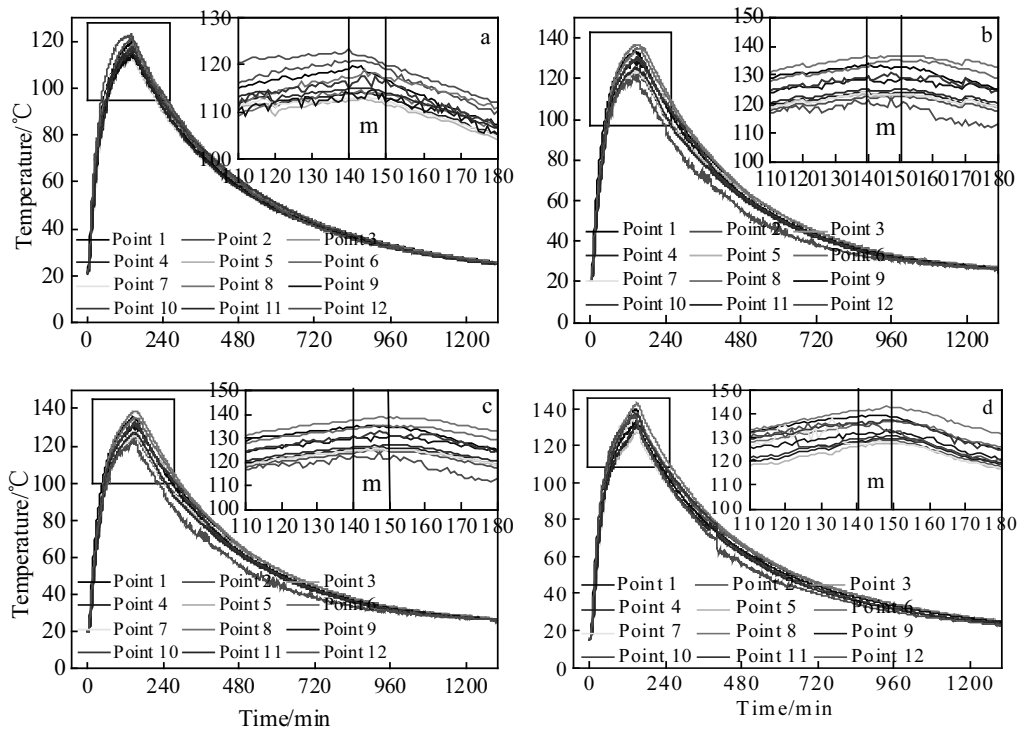


图 14 流体温度为 175 °C 时不同流速下的温度变化

Fig.14 Temperature variation under different velocities at 175 °C: (a) v=0.08 m/s, (b) v=0.12 m/s, (c) v=0.16 m/s, and (d) v=0.20 m/s

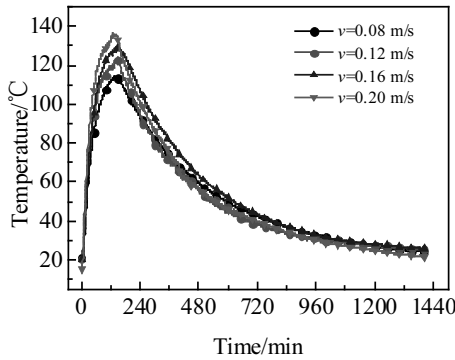


图 15 流体温度为 175 °C 时不同流速下的温度比较

Fig.15 Temperature comparison under different velocities at 175 °C

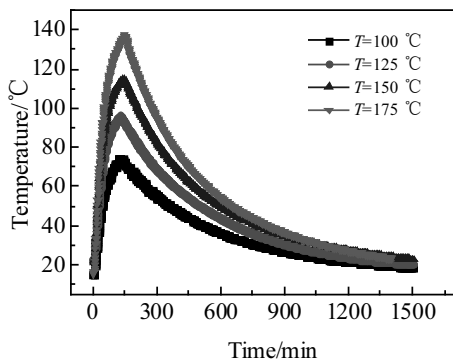


图 16 流体速度为 0.2 m/s 时不同导热油温度下的轧辊温度

Fig.16 Roll temperature under different temperatures at velocity of 0.2 m/s

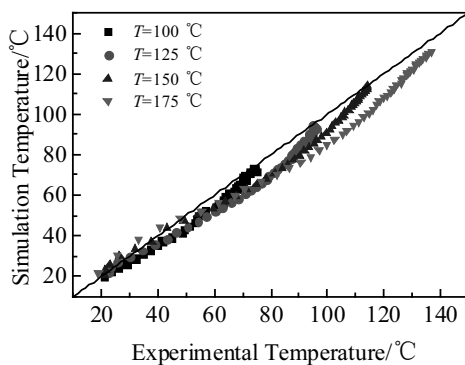


图 17 不同流体温度下的轧辊温度对比

Fig.17 Roll temperature under different roll temperatures

5 结论

1) 采用流体循环流动传热的方法加热轧辊时,其表面温度分布较均匀,边部与中间的温差最大为 6

°C,且流体温度与速度对其影响较小。

2) 流体在不同的温度和速度下加热轧辊时,轧辊的温升趋势高度一致,都呈速率减小的趋势上升,且随着温度的升高和流速的增大轧辊温升变快。流体温度对轧辊温升的影响大于流体速度对其的影响,故采用升高流体温度的方法来加快轧辊的预热。

3) 对轧辊停止加热后,其温度不会立刻开始下降,会延续一段时间,流体的速度对延长时间影响很小,流体的温度越高,延长时间越长。

4) 在轧辊温升阶段,模拟结果与实验结果的误差随流体温度及轧辊温度的升高而变大,最大误差为 16.16%,总体结果较吻合。表明该模型可以正确表示流体加热轧辊的传热过程。

参考文献 References

[1] Chen Zhenhua(陈振华). *Wrought Magnesium Alloys(变形镁合金)*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 1

[2] Luo Jinru, Liu Qing, Liu Wei *et al. Acta Metallurgica Sinica* [J], 2012, 48(6): 717

[3] Maksoud I A, Ahmed H, Rodel J. *Materials Science & Engineering A*[J], 2009, 504(1-2): 40

[4] Watanabe H, Mukai T, Ishikawa K *et al. Journal of Materials Preprocessing Technology*[J], 2007, 182(1-3): 644

[5] Ma Lifeng(马立峰), Jia Weitao(贾伟涛), Lin Jinbao(林金宝) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2016, 45(2): 339

[6] Ma Lifeng(马立峰), Pang Zhining(庞志宁), Ma Ziyong(马自勇) *et al. Journal of Materials science and Engineering(材料科学与工程学报)*[J], 2014, 32(5): 665

[7] Jia Weitao(贾伟涛), Ma Lifeng(马立峰), Ma Ziyong(马自勇) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2016, 45(1): 152

[8] Jia Weitao(贾伟涛), Ma Lifeng(马立峰), Jiang Yaping(蒋亚平) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2016, 45(3): 702

[9] Jia Weitao(贾伟涛), Ma Lifeng(马立峰), Liu Pengtao(刘鹏涛) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2016, 45(5): 1175

[10] Miao Q, Hu L X, Wang G J *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2011, 528(22-23): 6694

[11] Beausir B, Biswas S, Kim D I *et al. Acta Materialia*[J], 2009, 57(17): 5061

[12] Wang Lingyun(汪凌云), Huang Guangjie(黄光杰), Chen Lin(陈林) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2007, 36(5): 910

- [13] Jiang Xianquan(蒋显全), Cheng Renju(程仁菊), Pan Fusheng(潘复生) *et al.* *China Patent*(中国专利), 201310467215.X[P], 2014
- [14] Quan Jizhe(全基哲), Duan Mingnan(段明南), Yao Shoujun(姚寿军) *et al.* *China Patent*(中国专利), 201120342220.4[P], 2012
- [15] Chang Hong(常红), Zhao Zilong(赵子龙). *Mechanics of Materials*(材料力学)[M]. Beijing: Science Press, 2015
- [16] Yu Changming(俞昌铭). *Heat Conduction*(热传导)[M]. Beijing: Higher Education Press, 1983: 533
- [17] Wang Houhua(王厚华). *Heat Transfer*(传热学)[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2006: 87
- [18] Qiao Zhonghua(乔中华). *Hydromechanics*(流体力学)[M]. Shanxi: Shanxi Science and Technology Press, 2001: 72

Fluid-Solid Coupling Heat Transfer Model for Fluid Heating Transfer Roll of Magnesium Alloy Sheet

Zhang Guohua¹, Ma Lifeng¹, Huang Qingxue^{1,2}, Huang Zhiquan¹, Lin Jinbao¹, Liu Pengtao², Fang Daqing³

(1. Heavy Machinery Engineering Research Center of the Ministry Education, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

(2. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(3. College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Nowadays, the roll temperature control method of the magnesium alloy sheet rolling process is not accurate, which has a serious influence on the shape, thickness and crack of sheets. So the method for fluid circulation to control temperature was adopted, the fluid-solid coupled heat transfer process was simulated and verified using Fluent software by experiment, and then the heat transfer trends and laws were given. The results show that when heating the roll by this method, the surface temperature distribution is uniform, the maximum temperature difference between the edge and the middle is 6 °C, and the fluid temperature and velocity have little effect on it. At different fluid temperatures and velocities, the temperature of the roll rises with the rate decreasing, and when the fluid temperature rises and the velocity increases, the temperature rise of the roll becomes faster. The effect of the fluid temperature on the roll temperature rise is greater than that of the fluid velocity. The relationship between the temperature of the roll surface and the time is obtained under different heating conditions. The roll surface temperature drop has a period of extension when the roll heating is stopped; the higher the temperature of the fluid, the longer the extension. There is an error between the simulation results and the experimental results at the roll temperature rise stage; when the fluid temperature increases, the error becomes larger; when the roll temperature increases, the error also becomes larger; the maximum error is 16.16%. Their results are consistent, indicating that the model can correctly represent the heat transfer process of the fluid heating roll.

Key words: magnesium alloy; fluid heating; fluid-solid coupling; heat transfer model; numerical simulation

Corresponding author: Ma Lifeng, Professor, Heavy Machinery Engineering Research Center of the Ministry Education, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, P. R. China, Tel: 0086-351-2776769, E-mail: malifengfqh@163com