

板带轧制过程温度场有限元模拟 及影响因素分析(I)*

张 鹏 鹿守理 高永生 赵 辉 赵俊萍 曹 辉

北京科技大学材料科学与工程学院 北京 100083

摘要 采用弹塑性大变形热力耦合有限元法研究了铝板温轧过程,侧重计算轧件厚向温度分布,并分析了接触热传导系数、轧件热物性参数(导热系数、比热、密度)对计算结果的影响,计算结果与实验结果比较吻合

关键词 有限元法,接触热传导系数,热物性参数,板带轧制

中图分类号 TG302

温度是影响金属热轧过程的重要物理量.对于它的作用,Yoshida H^[1]作了形象的描述.因此,在世界范围内,轧制时轧件与轧辊内温度分布一直是各国学者研究的重要课题^[2~4].本文应用商业软件 MARC,采用热力耦合弹塑性大变形有限元法模拟了铝板温轧过程温度场,同时讨论了轧件轧辊间接触热传导系数以及轧件热物性参数等因素对计算结果的影响.

1 试验

采用了文献 [4]的试验数据,即采用厚度为 12.9 mm、初始温度为 155℃ 的铝板,经半径为 127 mm 的二辊轧机轧制,压下量为 18.7%.轧辊转速为 10.4 r/min,初始温度为室温(20℃).为测定轧件内部温度场,将 Chromel-Alumel 热电偶置于轧件尾部距轧件表面 2 mm 和轧件上下表面中心对称面处,详见文献 [5].

2 有限元模型

轧件变形视为平面变形,变形前的情况见图 1.高温轧件与低温的轧辊接触后,热量从轧件向轧辊传递,引起轧辊从表面沿径向一定厚度范围内和周向一定范围内升温.根据文献 [6],这个厚度值 δ 为:

$$\delta/R \leq 4.24 / \sqrt{Pe} \quad (1)$$

$$Pe = R^2 \omega / \alpha \quad (2)$$

$$\alpha = k / \rho c \tag{3}$$

式中, Pe 为贝克来数, R, ω - 轧辊半径和转速; k - 导热系数; ρ - 密度; c - 比热容. 经计算, δ 值为 9.12 mm, 本文选取 $\delta = 10$ mm, 轧辊沿周向 1/6 为研究对象并用热传导元对其进行离散.

模拟时轧件单元的平均尺寸与时间步长存在优化的关系如下^[7]:

$$\frac{k \Delta t}{\rho c \Delta x^2} = 0.1 \tag{4}$$

式中, Δt - 时间步长, s; Δx - 平均单元尺寸, mm.

这个优化的关系表明, 对于一定单元尺寸选择满足这个关系的步长, 计算结果较为理想. 较大的时间步长会降低计算精度, 较小的时间步长增加计算时间, 但计算精度不会得到改善. 经计算, $\Delta t \approx 0.001$ s

轧制过程的热传导现象是一个复杂的热力学问题, 这里主要介绍求解问题的边界方程, 而解这一问题的详细理论描述可参见文献[8]. 轧制时有热传导、对流和热辐射 3 类热边界条件, 对于热辐射和对流换热情况, 边界条件可统一描述为:

$$Q = H(T - T_x) \tag{5}$$

式中, Q - 热流密度, H - 等效热传导系数, $H = h + h_r$, h - 对流换热系数, h_r - 辐射换热系数, $h_r = E\sigma(T + T_x)(T^2 + T_x^2)$, E 是黑度, σ - 波尔兹曼常数, T, T_x - 轧件表面和环境温度.

接触热传导可描述为:

$$Q_c = h_c(T - T_d) \tag{6}$$

式中, h_c - 接触热传导系数; T, T_d - 轧件表面和与之相接触轧辊表面温度.

上面公式中各参数取值为: $h = 0.01$ kW / (m² · °C), $E = 0.6$, $h_c = 40$ kW / (m² · °C). 此外接触面的摩擦边界条件为:

$$Q_f = f_t \cdot V_{rel} \tag{7}$$

式中, f_t - 接触面摩擦力; V_{rel} - 轧件与轧辊相对滑动速度.

Wertheimer T B^[8]. 认为对于大多数金属 90% 的变形功可转化为热量, 热转化系数为 0.9. 本文计算工作在 SGI / INDIGO 工作站上进行.

3 结果与讨论

图 2 给出图 1 中第 210 节点 (距表面 2 mm) 和 206 节点 (心部) 经 0.2~0.5 s 温度变化情况. 由图可见, 轧件与轧辊接触前温度变化缓

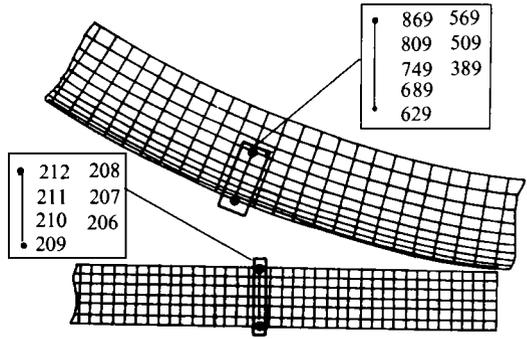


图1 有限元模型图

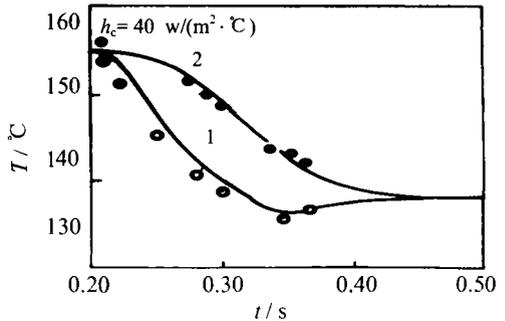


图2 轧件内温度变化计算与实测结果的比较
1, 2 为表面和心部温度变化;
○, ● 分别为它们的实测值

慢,接触后温度明显降低,2 mm 处尤为迅速.比较计算和试验发现,两者符合较好.

图 3 表示接触热传导系数值对轧件(图 3(a))和轧辊(图 3(b))内部分布的影响.共有 3 种情况,对应 3 种不同的热传导系数值,每种情况包括 3 条曲线,分别代表轧件内部 3 个不同位置(节点 206, 210, 212)和轧辊内部 3 个不同位置(节点 389, 509, 869)经历从 0.3~0.5 s 温度变化情况.由图 3 可见,接触热传导系数 h_c 值的变化对轧件表面温度变化的影响相对于内部较大,如以 $h_c = 30 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 为基准,其值在 $20 \sim 40 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ($\pm 30\%$) 范围内变化,轧制过程轧件内部各点的温度和轧后轧件平均温度的变化范围在 30% 之内.当 $h_c = 30 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 时,轧后轧件平均温度为 140°C ,若选取 $h_c = 20 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,轧后轧件平均温度为 143°C . h_c 的变化引起轧件平均温度的变化为 3°C ,轧件总的温降为 15°C ,因此由 h_c 的变化引起轧件平均温度的相对变化为 20%.此外图 3 还反映出轧件和轧辊内部不同位置的温度变化历史.大概在 0.34 s 之前,轧件表面温度不断降低,但温度的斜率越来越小.对应观察图 3(b)相应轧辊温度变化曲线,辊面温度不断增加且斜率越来越小,大约在 0.33 s 之后轧辊温度开始下降.以上现象可以解释为,由于在轧件和轧辊相接触时,所研究的点在表面几乎重合,因此轧件表面温降同时对应轧辊表面温升.由于两接触表面间的温度梯度越来越小,所以单位时间内从轧件传到轧辊表面的热量减少,导致表示其温度变化的曲线的斜率减小.两者脱离之后,轧件内部高温地方的热量向表面低温的地方传递,表现为心部温度不断降低直到和表面温度一致.当轧后轧件温度基本一致时,轧辊内部温度梯度还较大.此外,由图 3(b)还可以看出:在整个时间范围内节点 869 的温度没有变化,这说明假设 $\delta \leq 10 \text{ mm}$ 是

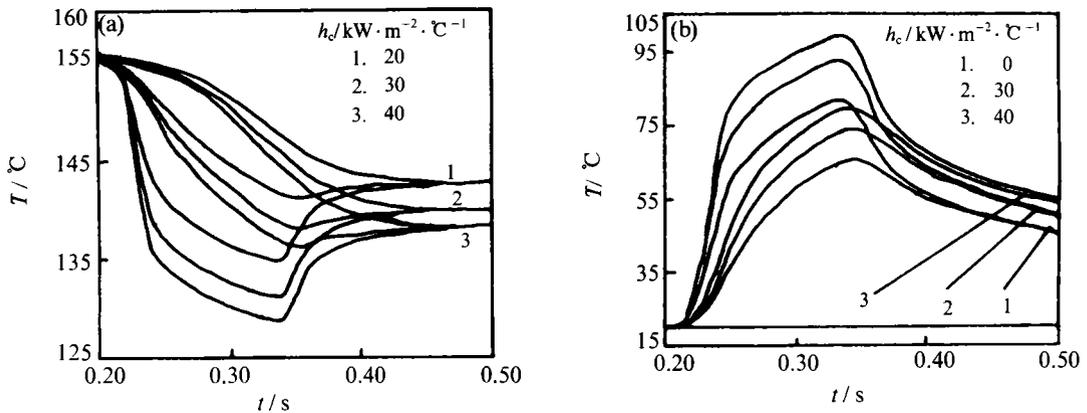


图 3 接触热传导系数对轧件(a)和轧辊(b)温度变化历史的影响

合理的.

图(4)表示导热系数变化对模拟结果的影响.基准值 $k = 242 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,其变化范围为 $\pm 10\%$,因此共对应 3 种情况,每种情况包括 3 条曲线,分别代表 206, 210 和 212 节点的温度变化.由图 4 可见,总的趋势是: k 值越小,计算得到的轧件心部温度越高,表面温度越低.这可以解释为:导热系数较小时,热量从内部相对温度较高的地方流到相对温度较低的地方的速度较慢,从而造成轧件表面温降较大;反过来,表面温降对内部温度变化影响较小,因此内部相对温降较小.由图 4(b)可见,轧件导热系数的变化对轧辊内部温度变化的影响较小.总而言之,轧件导热系数发生 10% 的偏差引起轧件以及轧辊计算温度的最大偏差不超过 10%.

图 5 表示轧件密度、比热容的变化对轧件 3 个不同位置(节点 206, 210, 218)和轧辊 3 个

不同位置 (节点 389, 509, 569) 计算温度变化的影响. 结果表明, 密度、比热容对计算结果的影响表现出完全相同的趋势. 即密度增加 10%, 得到的计算温度变化曲线与比热容增加 10% 得到的结果曲线完全重合. 因此, 图 5 表示的是两者乘积的变化对计算结果的影响. 由图 5(a) 可见: ρc 增加, 轧件各处的温度增加, 轧后的平均温度也增加, 而对轧辊温度的计算结果影响很小. 这是由于 ρc 体现了轧件的热容能力, 在散失相同热量的前提下, ρc 越大, 轧件的温度变化越小. 由图 5 还可见, ρc 发生 10% 的偏差, 引起表面计算温度的偏差不超过 10%, 心部不超过 15%. 从以上分析中可以得到减小由于 ρ 和 c 引起计算结果的偏差的方法. 因为两者的作用是相反的, 一个物理量增加带来的偏差可通过另一个物理量的减小来抵消.

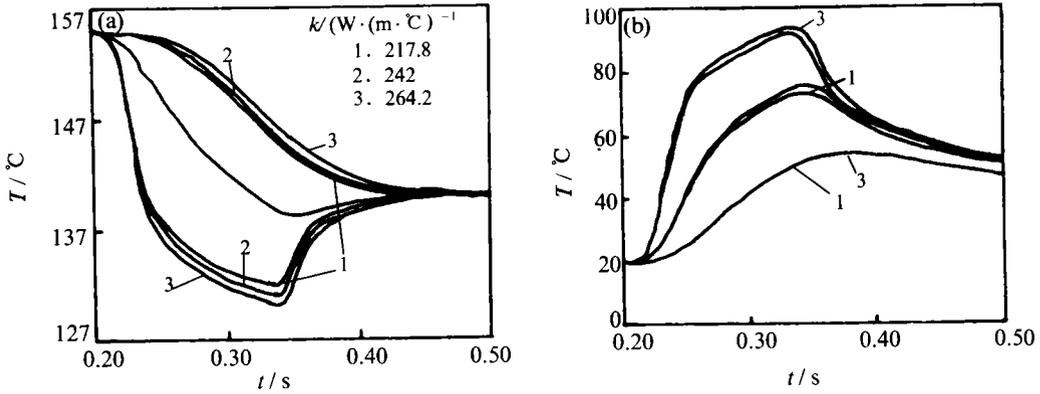


图 4 导热系数对轧件(a)和轧辊(b)温度变化历史的影响

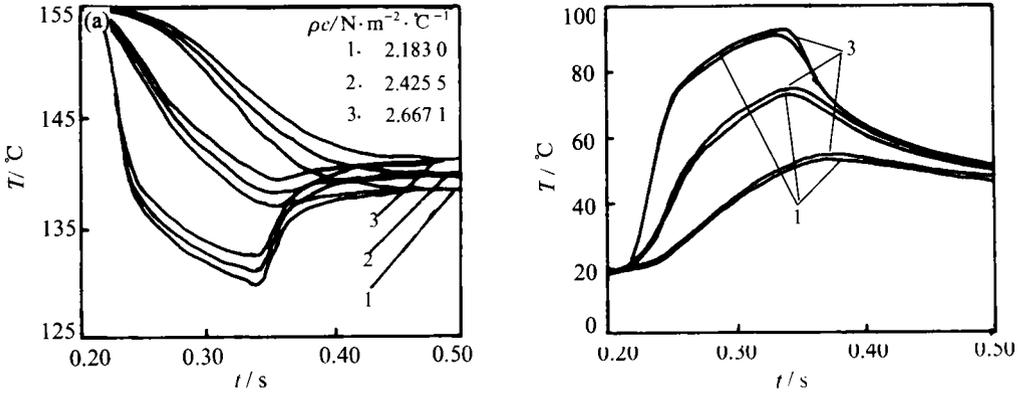


图 5 轧件密度和比热容对轧件(a)和轧辊(b)温度变化历史的影响

4 结论

- (1) 模拟了铝板温轧过程中轧辊和轧件温度变化, 模拟结果与实测结果相吻合.
- (2) 轧件与轧辊接触热传导系数的偏差同时引起轧件和轧辊计算温度的偏差, 其范围不会超过接触热传导系数的偏差范围.
- (3) 热物性参数 k, ρ, c 的偏差主要引起轧件计算温度的偏差, 但相对偏差在热物性参数的偏差值附近.

参 考 文 献

- 1 Yoshida H, Yorifuji A, Kosekj S, et al. An Integrated Mathematical Simulation of Temperatures, Rolling Loads and Metallurgical Properties in Hot Strip Mills. *ISIJ Int*, 1991, 31(6): 571
- 2 Lenard J G, Pietrzyk M. The Predictive Capabilities of a Thermal Model of Flat Rolling. *Steel Research*, 1989, 60: 403
- 3 Pietrzyk M, Lenard J G. The Effect of the Temperature Rise of the Roll on the Simulation of the Flat Rolling Process. *J Mater Proc Tech*, 1990, 22: 177
- 4 刘相华, 白光润. 复杂断面型钢轧制温度场的有限元分析. *固体力学学报*, 1987, 12(4): 362
- 5 Karagiozis A N, Lenard J G. Temperature Distribution in a Slab During Hot Rolling. *J Eng Mater Tech*, 1988, 110: 17
- 6 Tseng A A. A Numerical Heat Transfer Analysis of Strip Rolling. *Journal of Heat Transfer*, 1984, 106: 512
- 7 Thomas B G, Samarasekera I V, Brimacombe J K. Comparison Numerical Modeling Techniques for Complex, Two-Dimensional, Transient Heat-Conduction Problems. *Metall Trans*, 1984, 15B: 307
- 8 Wertheimer T B. Thermal Mechanically Coupled Analysis in Metal Forming Processes. In: Pittman J F T, Wood R D, Alexander J M, et al, eds. *Numerical Methods in Industrial Forming Processes*. Swansea: Pineridge Press Ltd, 1982. 425

Prediction of Temperature Distribution during the Hot Rolling of Strip by FEM (I)

Zhang Peng Lu Shouli Gao Yongsheng Zhao Hei Zhao Junping Cao Hei

Material Science and Engineering School, UST Beijing, Beijing 100083, China

ABSTRACT The warm rolling of aluminum plate was studied with the aid of elastic-plastic and thermal-mechanical coupled FEM, particular attention was paid to predict the temperature distribution through the thickness of rolled plate. The influences of contact heat transfer, coefficient heat material data (thermal conductivity, heat capability, density) on calculated result were analyzed. Comparison of the calculated results with those from experiment show good agreement.

KEY WORDS FEM, contact heat transfer coefficient, heat material data, strip rolling