

不锈钢-碳钢复合板多道次小变形轧制温度场的数值模拟

庞玉华¹ 吴成¹ 严平²

(1 西安建筑科技大学冶金学院, 西安 710055; 2 宝鸡有色金属加工厂(集团), 宝鸡 721014)

摘 要 基于弹塑性热力耦合有限元法研究了 72 mm Q235 钢基板和 14 mm 304 不锈钢复板 11 道次变形至 12 mm 复合板的热轧过程, 并应用有限元 MARC 软件二次开发技术建立了温度场模型。模拟结果表明, 变形区内, 复合板表面温度持续下降, 界面温度略有升高; 变形区外, 表面温度有所回升; 随轧制过程进行, 轧件高度方向温度梯度逐渐减小; 界面处温度呈“S”形, 变形区温度变化显著, 且随轧制速度提高, 升温明显。

关键词 不锈钢-碳钢复合板 热轧 温度分布 热力耦合 有限元模拟

Numerical Simulation of Temperature Field of Stainless Steel-Carbon Steel Clad Sheet during Multipass-Small Reduction Hot Rolling

Pang Yuhua¹, Wu Cheng¹ and Yan Ping²

(1 School of Metallurgy, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055;
2 Baoji Nonferrous Metals Works (Group), Baoji 721014)

Abstract Based on elastic-plastic and thermal-mechanical couple finite element method (FEM), the hot rolling process for 72 mm Q235 steel base plate and 14 mm 304 stainless steel clad plate deforming with 11 pass and small reduction to 12 mm clad steel plate was studied and the model of temperature field has been established by developed finite element MARC software. The results showed that in deformed zone, the surface temperature of clad plate continuously dropped and the temperature at interface of clad plate slightly went up; outside deformed zone, the surface temperature somewhat went up; with next passes rolling, the temperature gradient in the direction of height of block gradually decreased; and the temperature at interface of clad plate showed “S” shape, the change of temperature was obvious and with rolling speed increasing the temperature went up obviously.

Material Index Stainless Steel-Carbon Steel Clad Sheet, Hot Rolling, Temperature Distribution, Thermal-Mechanical Couple, FEM

不锈钢复合板实现冶金结合需要 50% 以上的单道次压下率, 我国现有的热轧生产设备大多无法满足此要求。如果用小的单道次变形率、大的累计变形率, 在宽板轧机上能生产不锈钢复合板, 必将能大幅扩大我国不锈钢复合板生产能力, 减少进口量, 带来显著的经济效益。本实验应用大型有限元分析软件 MARC 的二次开发技术, 对不锈钢复合板多道次轧制温度场进行了数值模拟, 探索了轧制条件变化对温度场的影响。

1 模型的建立

1.1 轧件温度场的计算模型

采用更新拉格朗日法研究不锈钢复合板的热轧过程。体积为 V , 质量密度为 ρ 的连续介质, 根据虚功原理, 忽略惯性影响, 可用弱耦合的增量非线性有限元处理热-力耦合问题。假设材料遵守 Fourier 热传导法则, 用加权余量的 Galerkin 法可得热力耦合的能量守恒方程的等效弱形式:

$$\int_V g \rho \bar{Q} - \int_S g H dS = \int_V g \rho \frac{DcT}{Dt} dV + \int_V \frac{\partial g}{\partial X_i} K_{ij} \frac{\partial T}{\partial X_j} dV \quad (1)$$

式中: \bar{Q} -给定体积热流; H -边界 S 上的单位面积上的热流强度; g -Galerkin 权函数; c -材料热容; T -温度; t -时间; X -位置坐标; K_{ij} -刚度矩阵。

1.2 边界条件

(1) 传热边界

轧制过程的传热是一个具有内热源的不稳定传热问题, 轧制时轧件的自由表面存在热传导、热对流和热辐射 3 类边界条件。由于轧制过程中对流所产生的热损失在整个热损失中所占比例较小, 可将其与辐射边界条件统一作为一个边界条件处理, 即:

$$q = h(T - T_\infty) \quad (2)$$

式中: q -热流密度; h -等效热传导系数, $h = h_0 +$

$h_c; h_0$ -对流换热系数; h_r -辐射换热系数; $h_c = ER(T + T_\infty)(T_2 + T_{2\infty})$; E -黑度; R -波尔兹曼常数; T, T_∞ -分别为轧件表面和环境温度。

$$\text{接触传热描述为: } q_r = h_r(T - T_d) \quad (3)$$

式中: q_r -接触热流量; h_r -接触换热系数; T_d -轧件与轧辊表面接触温度。

(2) 接触摩擦边界

采用修正的库仑摩擦模型:

$$\sigma_f \leq -\mu\sigma_n \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{v_r}{r_{v \text{ cns}}}\right) \cdot t \quad (4)$$

式中: σ_f -摩擦应力; σ_n -接触节点的法向应力; μ -库仑摩擦系数; v_r -相对滑动速度; t -相对滑动速度方向上的切向速度矢量; $r_{v \text{ cns}}$ -发生滑动时接触体之间的临界相对速度, 是一个较小的正数。

1.3 模拟主要参数及单元划分

根据轧制复合基本原理, 采用对称叠轧方法。本实验模拟参数: 基板: 材质 Q235 碳钢, 厚 72 mm, 宽 2 200 mm; 复板: 材质 304 不锈钢, 厚 14 mm, 宽 2 000 mm; 边条: 材质 Q235 碳钢, 厚 60 mm, 宽 2 200 mm; 材料的化学成分见表 1。初轧温度为 1 200 °C。

表 1 304 不锈钢和 Q235 碳钢的化学成分/%

Table 1 Chemical compositions of stainless steel 304 and carbon steel Q235 /%

钢号	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P
304	≤ 0.07	≤ 2.00	≤ 1.00	17.00 ~ 19.00	8.00 ~ 11.00	≤ 0.025	≤ 0.035
Q235	0.14 ~ 0.22	0.40 ~ 0.65	0.12 ~ 0.30	-	-	≤ 0.055	≤ 0.045

根据实验轧机条件和塑性加工理论, 所制定模拟轧制规程中的各道次轧件的厚度(mm)为: 86 → 83 → 77 → 64.5 → 53.5 → 43.5 → 34.5 → 26.5 → 20 → 17 → 14 → 12。实验轧机轧辊直径为 800 mm, 辊身长度为 3 330 mm, 前 4 道次的轧辊转速为 3.14 r/s, 以后为 5.23 r/s。

采用单板轧制时的一些假设条件, 建立 2D 有限单元模型。取样长度基板为 400 mm, 复板为 340 mm, 边条为 20 mm。以四边形等参单元划分, 上层基板 1 120 个单元, 下层复板 272 个单元, 两个边条 96 个单元, 总共为 1 488 个单元。据相关文献 [1~4], 界面情况如下处理: 对于 2D 模型, 上下层

金属共用一条边界, 边界上划分相同单元数, 以保证相对应节点上的应力、应变一一对应, 上下层单元相对距离为一极小值, 并将其设定为接触。单元的划分如图 1 所示。

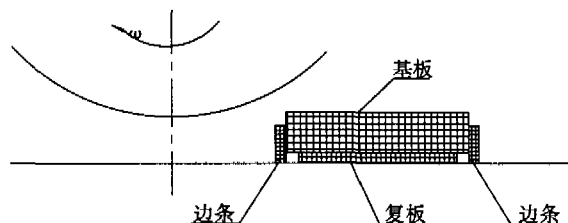


图 1 复合板单元划分
Fig. 1 Unit demarcation for clad plate

2 结果及分析

2.1 温度场分布

第 1 道次轧后复合板的温度分布见图 2。计算结果表明: 对于每一道次而言, 当轧件进入轧制区后, 由于轧件与轧辊接触, 轧件表面温度持续下降, 界面处温度略有提升; 轧件出轧制区后, 表面温度由于中心热量向表面传递有所回升。另外, 随着轧制过程的进行, 轧件厚度方向温度梯度逐渐减小。

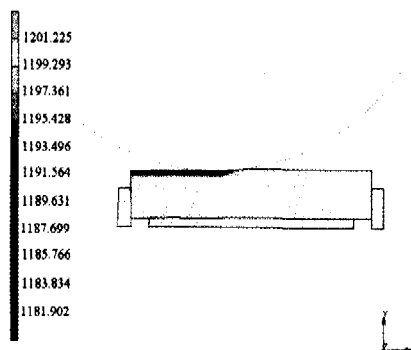


图 2 第 1 道次复合板温度场分布
Fig. 2 Distribution of temperature of clad plate in first pass

轧件表面温度在第 1 道次轧后从 1 200 °C 下降到 1 181.1 °C, 由于温升, 第 2 次进入变形区前, 升到 1 181.29 °C; 第 2 道次表面温度持续下降, 最低点温度为 1 162.9 °C, 到第 3 次进入变形区前, 上升为 1 163.74 °C; 第 3 道次表面温度下降到 1 135.62 °C, 进入第 4 道次前, 温度上升为

1 137.78 ℃; 第 4 道次, 表面温度下降到 1 106.93 ℃ 并逐步上升为 1 112.45 ℃。在第 5 道次, 由于轧制速度的提高, 轧辊转速从前 4 道次的 3.14 r/s 提高到 5.23 r/s, 表面温度的下降趋势减缓, 最低温度为 1 099.81 ℃; 第 6 道次末表面温度为 1 090.56 ℃; 第 7 道次末表面温度为 1 095.8 ℃; 在随后的几个道次中, 轧件越来越薄, 轧制压力的不断提高使轧件与轧辊的摩擦力增大, 再加上轧件中心温度不断升高使传递到表面的热量不断增大, 补偿了轧件表面向环境传递的热量使得轧件表面的温度提高, 第 8 道次表面温度为 1 110.2 ℃; 第 9 道次表面温度为 1 129.3 ℃; 第 10 道次表面温度为 1 134.5 ℃; 最后, 终轧温度为 1 145.3 ℃。

2.2 轧件温度影响因素分析

2.2.1 压下率

由图 3 可知, 随着压下率量的增大, 轧件的温度变化越激烈。原因是由于压下率的增大, 使接触压力增大, 改变了轧件与轧辊的接触状态, 接触热阻减小, 有利于热量的传递; 由于压下率的增加, 由塑性功生成的热量增加, 导致轧件温度发生变化。压下率为 3.4% 时, 轧件表面的温度在进入轧制区后, 温度持续下降, 最低点温度为 1 180.93 ℃, 而当压下率为 6.9% 时, 最低点温度

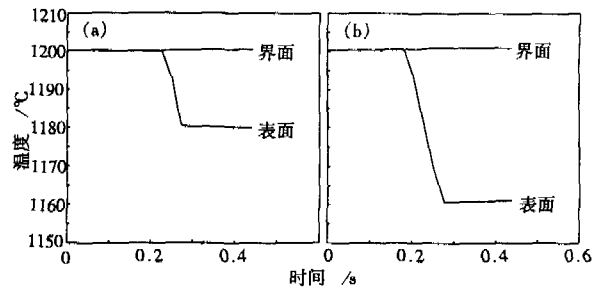


图 3 不同压下率时复合板的温度曲线: 压下率 3.4% (a); 6.9% (b)

Fig.3 Curves of temperature of clad plate with different reduction ratio: reduction ratio 3.4% (a) and 6.9% (b)

降为 1 160.87 ℃, 出了轧制区以后, 表面温度稍有上升, 但前者的温升不大于 0.25 ℃, 达到 1 181.18 ℃; 而后者温升较大, 为 2.41 ℃, 达到 1 163.28 ℃。两者的界面温度都是持续上升的, 前者的升幅为 0.14 ℃ 而后者升幅为 1.12 ℃。

2.2.2 轧制速度

图 4 分别是轧制速度 0.400, 1.236, 1.600 m/s 时轧件中心和表面的温度曲线。可以看出, 随着轧制速度的增加, 轧件温度升高。这是由于轧制速度提高, 使轧件与轧辊的接触时间缩短, 从而使得轧件表面流向轧辊的热量减少, 使轧件温度升高; 轧制速度提高, 使单位时间内的塑性功增加,

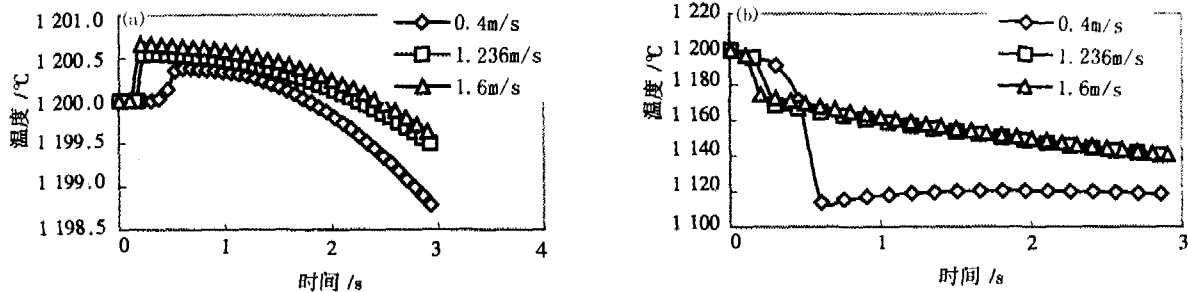


图 4 复合板不同速度轧制时温度变化图 (a) 中部; (b) 表面

Fig.4 Curves of temperature of clad plate with different rolling speed at midst (a) and surface of plate (b)

轧件温度上升。

2.2.3 材料相变

在热轧过程中, 随着轧制温度的变化, 金属的显微组织将发生变化, 从而影响到轧件的温度。从图 5(a) 中可以看出, 在奥氏体区轧制时, 最高点的温度为 1 109.99 ℃, 当轧件出轧制区后, 温度一直不断下降。图 5(b) 温度曲线轧件在轧制区达到顶点温度 910.87 ℃, 出轧制区后, 温度下降

比较平缓, 这是由于在此温度区域, 金属组织发生相变产生相变热所致, 由于金属在相变过程中, 释放相变热的同时, 组织也发生了变化。在热力耦合有限元分析中应予以充分考虑。

2.3 界面温度的变化趋势

在双金属固相复合中, 界面温度是影响粘合的重要因素之一。因此, 了解在往复轧制中界面处温度的变化规律非常重要。图界面处的温度呈

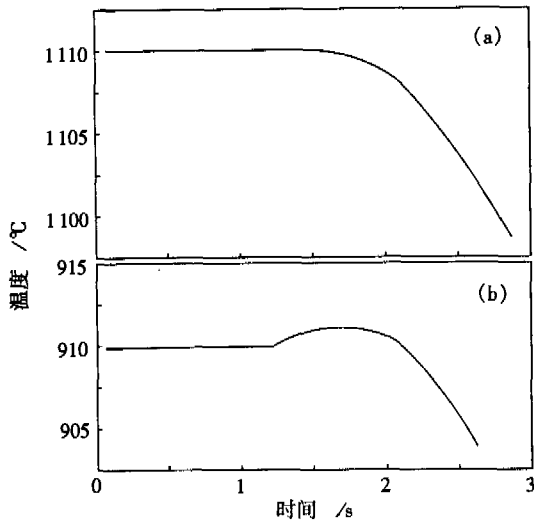


图 5 不同初轧温度时复合板中部温度变化:(a) 1 110 °C; (b) 910 °C

Fig.5 Change of temperature at midst of clad plate with different blooming temperature: (a) 1 110 °C; (b) 910 °C

“S”形(图 6),分为 3 个阶段,进轧制区之前,温度基本保持不变,进入轧制区后温度变化比较剧烈,温度在轧制过程中不但不降低反而有所升高。这是由于界面处只发生热传导,没有对流作用。随着轧制速度的提高,这种温升现象比较明显。出

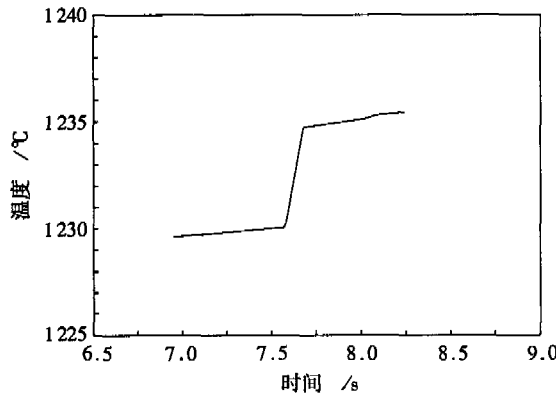


图 6 第 11 道次复合板界面温度变化趋势

Fig.6 Changing tendency of interface temperature of clad plate in 11 pass

轧制区之后,温度基本保持不变。

第 1 道次界面温度比开轧温度升高 0.14 °C, 为 1 200.14 °C;第 2 道次界面温度则持续升高,上升为 1 200.57 °C;第 3 道次界面温度上升为 1 202.85 °C;在第 4 道次,界面温度上升为 1 205.13 °C;在第 5 道次界面温度上升到 1 208.9 °C。第 6 道次界面温度为 1 211.81 °C;第 7 道次界面温度为 1 217.9 °C。第 8 道次界面温度为 1 220.4 °C;第 9 道次界面温度为 1 225 °C;第 10 道次界面温度为 1 230 °C;最后一道次界面温度为 1 235 °C(图 6)。

3 结论

通过应用有限元 MARC 软件建立的温度模型及计算结果表明:变形金属在变形区内表面温度持续下降,界面温度略有升高。变形区外,表面温度有所回升。随着轧制道次的增加,轧件内部高度方向温度梯度逐渐减小;随着压下率的增加,温度变化剧烈;随着轧制速度的提高,温度升高;金属显微组织变化会影响轧件温度;界面处的温度呈“S”形,变形区温度变化剧烈,且随着轧制速度的提高,温升现象比较明显。

本课题为西安市工业攻关项目(ZZ05059)

参考文献

- 1 李世芸,张曙红,张代明.双金属复合带材轧制过程有限元模拟.中国有色金属学报,2001,11(6):1075
- 2 Hwang Y M, Hsu H H, Hwang Y L. Analytical and Experimental Study on Bonding Behavior at the Roll Gap during Complex Rolling of Sandwich Sheets. Int J Mech Sci, 2000, 42(12):2417
- 3 Tzou G Y. Theoretical Study on the Cold Sandwich Rolling Considering Coulomb Friction. J M at Proc Tech, 2001, 114(1):41
- 4 Lukaschkin N D, Borissow A P. Interface Surface Behaviour in the Upsetting of Sandwich Metal Sheets, J of M Tech, 1996(61):292

庞玉华(1965-),女,副教授,主要研究方向为层状复合板制备技术。

收稿日期:2005-10-19

下 期 要 目

- 废钢-电弧炉炼钢流程和循环经济 李士琦等
- Φ200 mm H11 芯棒钢热连轧过程张力影响因素的有限元分析 洪慧平等
- 石灰基铁水预脱硫剂最佳配方和用量的试验研究 张美夫等
- X80 级管线钢的组织 and 力学性能 张小立等
- 304 不锈钢 2 mm 连铸薄带中的裂纹分布和形成分析 王振敏等