

AZ31 镁合金中厚板轧制温度场的数值模拟与实验验证

李 洋¹, 马立峰¹, 姜正义², 黄志权¹, 林金宝¹, 姬亚峰¹

(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. 澳大利亚伍伦贡大学, 伍伦贡 NSW 2522 澳大利亚)

摘 要: 通过数值模拟分析了 AZ31 镁合金中厚板在轧制变形区的温度分布, 建立了轧后镁板平均温度关于轧辊温度、轧制速度、轧制压下量、板材厚度的经验公式, 并辅以相应的实验验证。结果表明: 当镁板较薄、轧制速度较小时, 镁板中心层的塑性变形热在轧制变形区向表层传递, 中心层的温升不能代表镁板塑性变形产生的温升; 轧后镁板的平均温度与轧辊温度、轧制速度、轧制压下量正相关, 与板材厚度反相关; 轧后镁板平均温度的计算值与实验值的最大相对误差为 8.34%, 平均相对误差为 7.4%, 经验公式能很好的预测轧后镁板的平均温度。经验公式的提出, 利于实现“AZ31 镁合金板材的等温轧制”控制; 对镁合金轧制工艺制度的合理制定以及后续轧制设备的选择有重要指导意义。

关键词: AZ31 镁合金; 塑性变形热; 等温轧制; 轧制工艺

中图分类号: TG146.22

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)07-2185-08

镁合金作为工程应用中最轻的金属结构材料, 具有密度小、比强度高、体积比热容小、散热性好等优点^[1-4], 广泛应用于航空、航天、电子产品等领域, 成为当今时代最有发展前景的有色金属材料^[5]。镁合金在室温时的塑性成形能力差, 热加工温度范围窄, 通常采用热轧、温轧生产镁合金板带。镁合金在轧制过程中温度将发生较大变化, 而温度又是影响变形抗力的重要参数。因此, 合理制定镁合金的轧制温度具有十分重要的意义^[6]。

汪凌云^[7]、陈维平^[8]等研究了 AZ31 镁合金板材在不同轧制温度下的组织和状态。张丁非^[9]等建立了镁合金板材轧制过程的热量变化方程, 并进行了相应的实验验证。管仁国^[10]等通过数值模拟研究了 AZ31 镁合金连续强流变轧制成型过程的温度场。Zhao^[11]等通过数值模拟研究了铸轧区的温度分布。Elsayed^[12]基于 ABAQUS 建立了有限元模型用以预测镁合金热轧时的温度分布。贾伟涛^[13]等利用数学解析的方法建立了不同工艺条件下镁板变形区的温度场模型。邓小虎^[14]、Yu Hailiang^[15]等研究了不同轧制工艺条件对镁合金薄板轧制过程温度场的影响。由于镁合金板材的热轧制特性, 对镁合金轧制温度的研究主要集中在轧后板材组织性能的分析、单纯有限元模拟以及复杂的理论模型, 严重制约了镁合金轧制工艺制度的制定以及轧制相关设

备的选择。本研究通过数值模拟分析了 AZ31 镁合金中厚板在轧制变形区的温度分布, 建立了轧后镁板平均温度关于轧辊温度、轧制速度、轧制压下量、板材厚度的经验公式, 并通过实验进行了验证。

1 实 验

实验材料为洛铜生产的宽幅 AZ31 镁合金铸轧板 (Mg-3.37%Al-0.86%Zn-0.29%Mn, 质量分数, 下同)。实验用镁板的尺寸为 150 mm×100 mm×H mm (H=3.5, 4.2, 4.9, 5.6, 6.3, 7)。实验设备主要包括油温控制机 (通过调节导热油的流量以及温度来改变轧辊温度)、加热炉 (加热镁板到轧制温度-350 °C)、二辊轧机、红外线扫描仪 (频率为 126 Hz); 衬板 (为了避免镁板在轧前的接触温降, 衬板的温度保持在 350 °C); 12 通道温度数据记录仪 (频率为 1 Hz, 测量轧后镁板表面 12 个不同位置温度, 取算术平均值作为轧后镁板平均温度)、红外线扫描仪数据终端 (实时反映轧辊表面温度)。综合考虑不同轧辊初始温度 (110、130、150、170、190 °C)、压下率 (10%、20%、30%、40%、50%)、轧制速度 (0.1、0.3、0.5、0.7、0.9 m/s)、板材厚度 (3.5、4.2、4.9、5.6、6.3、7 mm) 对轧后镁板平均温度的影响制定实验方案。

收稿日期: 2018-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1610253, 51604181); 山西省重点研发计划 (201603D111004, 201603D121010); 山西省自然科学基金 (201601D011012); 山西省“1331”工程重点学科建设计划经费资助项目

作者简介: 李 洋, 男, 1993 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: liyang930914@163.com

2 数值模拟分析

镁合金板材轧制属于弹塑性非线性大变形，在轧制变形区边界条件极其复杂，因此合理建立有限元模型和确定边界条件对模拟精度至关重要^[16]。

2.1 数学模型的建立

根据傅里叶定律推导镁板三维非稳态导热微分方程^[17]，如下：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \phi = \rho c_p(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1)$$

式中， ρ 为镁板的密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)， $c_p(T)$ 为镁板随温度变化的定压比热容 $[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}]$ ， $\lambda(T)$ 为镁板随温度变化的热传导系数 $[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}]$ ， ϕ 为镁板塑性变形热 $(\text{J}\cdot\text{m}^{-3})$ 。

$$\phi = \eta \overline{\sigma \dot{\epsilon}} \quad (2)$$

式中， η 为功热转化的效率 (0.7~0.9, 取 0.9)， $\overline{\sigma}$ 为镁板等效应力(Pa)， $\overline{\dot{\epsilon}}$ 为镁板等效应变 (s^{-1})。

轧制变形区镁板辐射热 Q_r ^[17]:

$$Q_r = \varepsilon_r \sigma_b [(T + 273.15)^4 - (T_r + 273.15)^4] \quad (3)$$

轧制变形区镁板接触散热 Q_j ^[17]:

$$Q_j = h(T - T_r) \quad (4)$$

式中， ε_r 为镁板的辐射率， σ_b 为黑体辐射系数 $[5.67, \text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}^2)^{-1}]$ ， T, T_r 为镁板温度、轧辊温度 ($^\circ\text{C}$)， h 为接触换热系数 $[\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}^2)^{-1}]$ 。

对称边界条件上的热通量为 0，即：

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (5)$$

轧制变形区的摩擦为库伦摩擦建模^[18]，即：

$$\tau = \mu F \quad (6)$$

式中， τ 为切应力 (Pa)， μ 为摩擦系数 (0.3~0.5)， F 为法向力 (N)。

2.2 有限元模型的建立

依托于 ABAQUS/Explicit 有限元分析软件，综合考虑各种热传导因素，采用热力耦合的手段对镁板温度场进行分析，建立 1/4 有限元模型，如图 1。模型主要由刚性轧辊（可传热）和弹塑性镁板 2 部分组成，其中轧辊尺寸为 $\Phi 320/48 \text{ mm} \times 175 \text{ mm}$ ($\Phi 320 \text{ mm}$ 为轧辊外径， $\Phi 48 \text{ mm}$ 为轧辊油孔外径)。

研究表明^[19,20]，轧辊和板材接触表面温度变化剧烈，为了提高模拟精度以及节省计算时间，对轧辊外径层、镁板上表面层网格进行细化。数值模拟采用六面体结构化网格 C3D8RT^[21]，轧辊划分为 60 000 个单元，镁板划分为 7500 个单元。



图 1 ABAQUS 轧制模型

Fig.1 Rolling model in ABAQUS

2.2.1 材料模型的选择

镁合金的密度 1780 kg/m^3 ，其热传导系数、定压比热容随温度的变化见图 2，其应力-应变曲线见图 3。轧辊的物性参数见表 1。

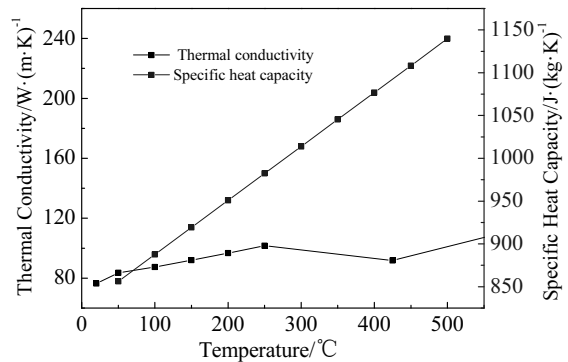


图 2 不同温度下镁合金的比热容和热传导系数

Fig.2 Specific heat capacity and thermal conductivity of magnesium alloy at different temperatures

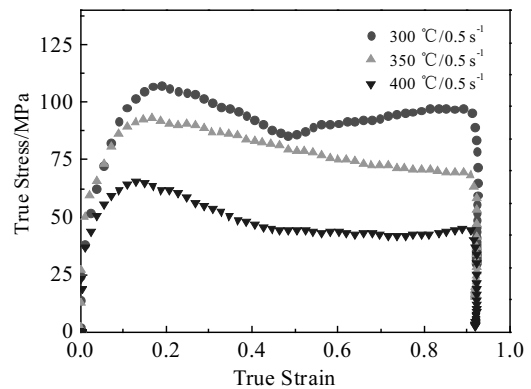


图 3 不同温度下镁合金的应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of magnesium alloys at different temperatures

表 1 轧辊的热物性参数

Table 1 Physical parameters of roll

Alloy	Density/ kg·m ⁻³	Specific heat/ J·(kg·°C) ⁻¹	Thermal conductivity/ W·(m·°C) ⁻¹
9Cr2Mo	7800	860	49.8

2.2.2 工艺参数的选择

依据轧制实验方案分别进行相应的有限元模拟, 主要的模拟参数见表 2^[22-24]。

3 结果与分析

3.1 模拟结果

本工作主要研究镁板在经过轧制变形后的平均温度, 为此, 分析了不同工艺参数下轧制变形区的温度分布以及部分测量点的时间历程曲线。为了更加准确的确定镁板的平均温度, 在镁板宽度-厚度方向取 15 个点, 位置分布见图 4。T_a 为 T₁~T₁₅ 的算术平均值, 即:

$$T_a = \sum_{i=1}^{n=15} T_{pi} / 15 \quad (7)$$

镁板厚度方向各层温度变化主要分为 3 个阶段: 阶段 I (轧前镁板未进入轧制变形区), 阶段 II (轧中镁板处于轧制变形区), 阶段 III (轧后镁板远离轧制变形区)。

处于阶段 I 的镁板主要受热辐射和对流换热的影响, 但短时间内对镁板温度影响不大; 阶段 II 的镁板处于轧制变形区 (停留时间 Δt), 发生了明显的表面激冷效应 (P₁) 和内部热温升效应 (P₅), 镁板厚度方向温差逐渐增大; 阶段 III 为轧后镁板温度均匀过程, 各层金属 (P₁~P₅) 在热传导的作用下逐渐稳定在某一温度范围。镁板停留辊缝的时间 Δt 由下式计算:

$$\Delta t = \frac{\pi R}{180v} \arccos(1 - \frac{\varepsilon H}{2R}) \quad (8)$$

式中: R 为轧辊半径 (m), v 为轧制速度 (m/s), ε 为轧制压下量, H 为镁板初始厚度 (m)。

表 2 模拟参数

Table 2 Simulation parameters

Parameter	Value
Environment temperature/°C	20
Initial temperature of sheet/°C	350
Friction coefficient	0.5
Convective heat transfer coefficient between plate and environment/W·(m ² ·°C) ⁻¹	170
Convective heat transfer coefficient between roll and environment/W·(m ² ·°C) ⁻¹	70
Heat transfer coefficient between roll and sheet/W·(m ² ·°C) ⁻¹	16000
ε _r	0.12

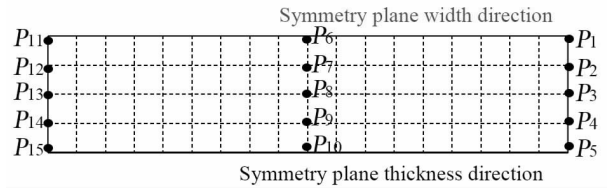


图 4 镁板宽度-厚度方向数据记录点的位置分布
Fig.4 Position distribution of data recording points in width thickness direction of magnesium sheet

3.1.1 轧辊温度的影响

图 5 为不同轧辊温度 (110~190 °C) 下镁板轧制变形区的温度场。图 6 为不同轧辊温度不同位置温度的时间历程曲线。图 7 为不同轧辊温度下轧后镁板的平均温度。其中, 镁板初始温度 350 °C、初始厚度 7 mm, 轧制速度为 0.5 m/s, 轧制压下量为 30%。

由图 5 表明, 随着轧辊温度的升高, 板材表面的温降减少, 轧制变形区的高温区域增加、温度分布均匀。图 6 表明, 轧辊温度对镁板中心层 (P₅) 的塑性变形热基本无影响, 轧辊温度通过影响镁板表面的温度来改变轧后镁板的平均温度。镁合金板材轧制时, 轧辊温度对实际轧制温度以及轧后镁板的平均温度起决定作用。图 7 表明, 轧后镁板的平均温度随着轧辊温度的升高而线性增加。通过拟合分析, T_a 与 T_R 的关系式为 (相关系数为 0.999 93):

$$T_a = 325.965 + 0.1165T_R \quad (9)$$

3.1.2 轧制速度的影响

图 8 为不同轧制速度 (0.1~0.9 m/s) 下镁板轧制变形区的温度场。图 9 为不同轧制速度不同位置温度的时间历程曲线。图 10 为不同轧制速度下轧后镁板的平均温度。其中, 镁板初始温度 350 °C、初始厚度 7 mm, 轧辊初始温度 150 °C, 轧制压下量为 30%。

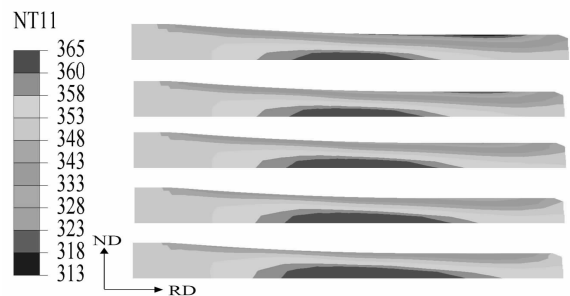


图 5 不同轧辊温度下镁板轧制变形区温度场
Fig.5 Temperature field in deformation zone of magnesium sheet at various roll temperatures

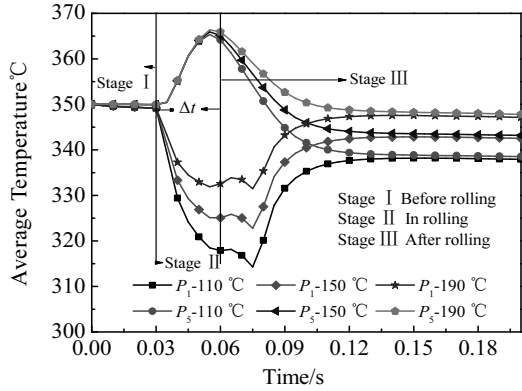


图 6 不同轧辊温度不同位置温度的时间历程曲线

Fig.6 Time history curves of the temperature at different positions and different roll temperatures

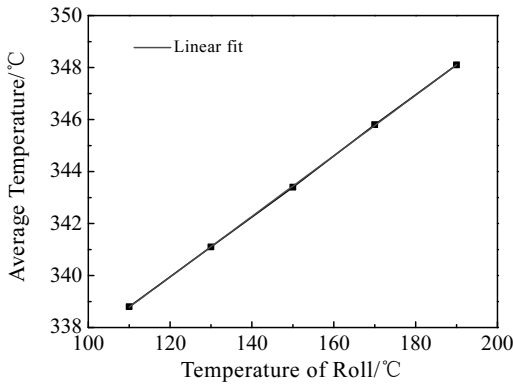


图 7 不同轧辊温度下轧后镁板的平均温度

Fig.7 Average temperature of magnesium plate after rolling at different roll temperatures

由图 8 表明，随着轧制速度的增加，镁板表面与轧辊的接触散热逐渐减弱，轧制变形区的高温区域增加。图 9 表明轧制速度对镁板表面 (P_1) 以及中心层 (P_5) 的温度均有较大影响，轧制速度分别为 0.3、0.5、0.7、0.9 m/s 时，轧制变形区的最高温度分别为 360.2、366.1、370.1、370.2 °C。当 $v > 0.7$ m/s 时，中心层的金属只发生塑性变形产热且变形热不向表层传递；当 $v < 0.7$ m/s 时，镁板在轧制变形区停留的时间变长，导致镁板表层的接触温降增大且中心层的温度向表层扩散。图 10 表明轧后镁板的平均温度随着轧制速度的升高而增加。通过拟合分析， T_a 与 v 的关系式为（相关系数为 0.994 28）：

$$T_a = 352.91365 - 143.46791e^{-\frac{v}{0.17198}} \quad (10)$$

3.1.3 轧制压下量的影响

图 11 为不同轧制压下量（10%~50%）下镁板轧制变形区的温度场。图 12 为不同轧制压下量的不同位置

温度的时间历程曲线。图 13 为不同轧制压下量下轧后镁板的平均温度。其中，镁板初始温度 350 °C、初始厚度 7 mm，轧制速度 0.5 m/s，轧辊初始温度 150 °C。

图 11 表明随着轧制压下量的增加，镁板在中心层的塑性变形热增加（应变增加导致塑性变形功增加），轧制变形区的高温区域增加。图 12 表明轧制压下量越大镁板表层 (P_1)、中心层 (P_5) 的温度越高；中心层温度升高的原因是随着轧制压下量的增加，镁板的塑性变形热增加；表层温度升高的原因主要是随着轧制压下量的增加，镁板变薄，中心层的温度易于向表层传递。图 13 表明轧后镁板的平均温度随着轧制压下量的升高而增加。通过拟合分析， T_a 与 ϵ 的关系式为（相关系数为 0.997 04）：

$$T_a = 333.8 + 41.72857\epsilon - 30.71429\epsilon^2 \quad (11)$$

3.1.4 板材厚度的影响

图 14 为不同镁板厚度（3.5~7 mm）下镁板轧制变形区的温度场。图 15 为不同镁板厚度不同位置温度的时间历程曲线。图 16 为不同镁板厚度下轧后镁板的平均温度。其中，镁板初始温度 350 °C、轧辊初始温度 150 °C，轧制速度为 0.5 m/s，轧制压下量为 30%。

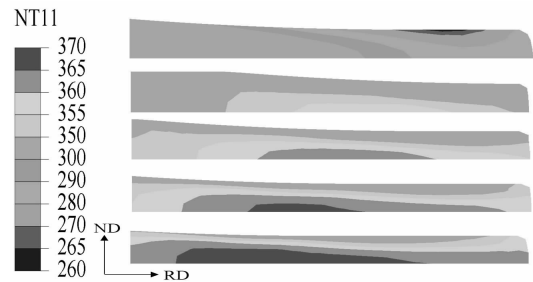


图 8 不同轧制速度下镁板轧制变形区温度场

Fig.8 Temperature field in deformation zone of magnesium sheet at various rolling velocities

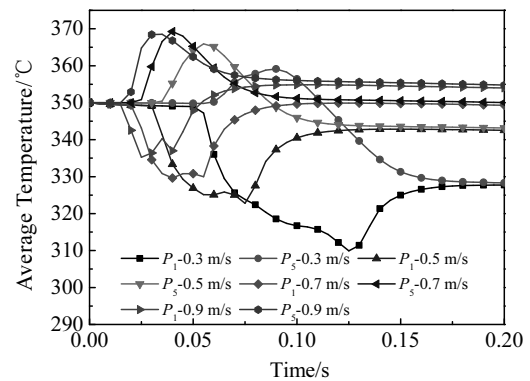


图 9 不同轧制速度不同位置温度的时间历程曲线

Fig.9 Time history curves of the temperature at different positions and different rolling velocities

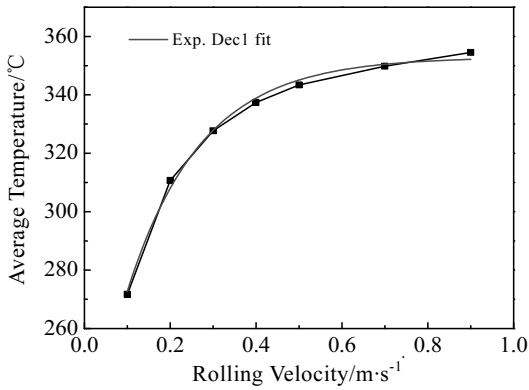


图 10 不同轧制速度下轧后镁板的平均温度

Fig.10 Average temperature of magnesium plate after rolling at different rolling velocities

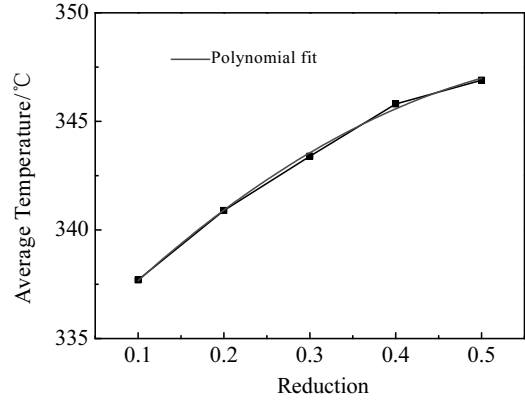


图 13 不同轧制压下量下轧后镁板的平均温度

Fig.13 Average temperature of magnesium plate after rolling at different rolling reduction rates

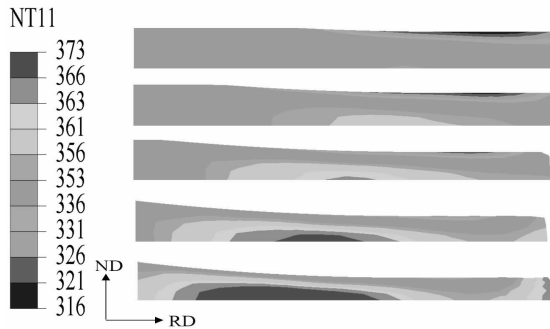


图 11 不同轧制压下量下镁板轧制变形区温度场

Fig.11 Temperature field in deformation zone of magnesium sheet at various rolling reduction rates

图 14 表明, 镁板越薄, 轧制变形区的温度场越均匀。图 15 表明镁板越薄, 中心层 (P_5) 温度越低, 但表层 (P_1) 温度越高, 原因是随着镁板厚度的减小, 中心层的温度及时向表层传递; 中心层 (P_5) 温度的时间历程曲线不能准确的表示塑性变形产生的升温曲线; 镁板越薄, 轧制后平均温度越低 (相同工艺参数下镁板单位体积产生的塑性变形热一定, 体积越小, 整体温度越低)。图 16 表明轧后镁板的平均温度随着镁板厚度的升高而增加。通过拟合分析, T_a 与 h 的关系式为 (相关系数为 0.999 75):

$$T_a = 292.44286 + 13.11327h - 0.76531h^2 \quad (12)$$

3.1.5 工艺参数对平均温度的影响

式(9)~(12)分别给出了平均温度与轧辊温度、轧制速度、轧制压下量以及板材厚度的关系。根据对镁合金薄板温度场的研究^[15,25], 得到以下表达式:

$$T_a = f(A)f(T_R)f(v)f(\epsilon)f(h) = f(A)f(B) \quad (13)$$

式中, $f(B)$ 表示为:

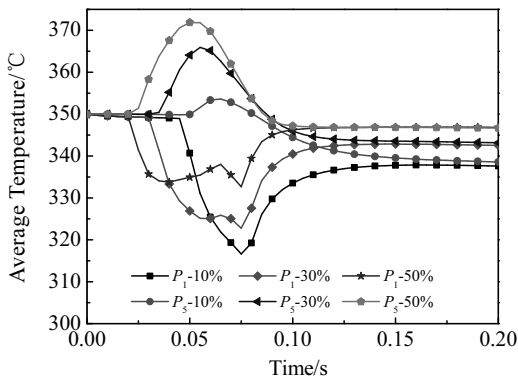


图 12 不同轧制压下量不同位置温度的时间历程曲线

Fig.12 Time history curves of the temperature at different positions and different rolling reduction rates

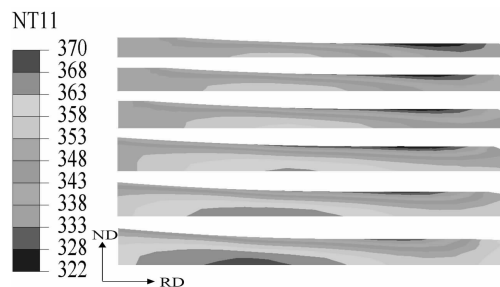


图 14 不同镁板厚度下镁板轧制变形区温度场

Fig.14 Temperature field in deformation zone of magnesium sheet with various thicknesses

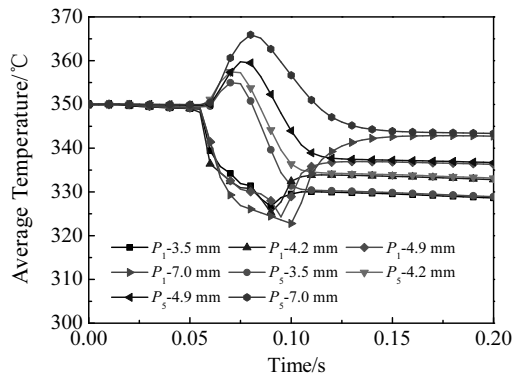


图 15 不同镁板厚度不同位置温度的时间历程曲线

Fig.15 Time history curves of the temperature for different thicknesses magnesium plate at different positions

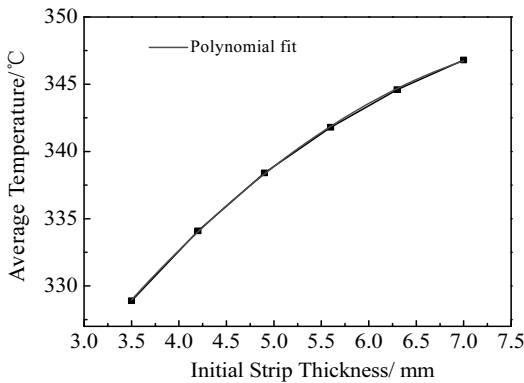


图 16 不同镁板厚度下轧后镁板的平均温度

Fig.16 Average temperature of magnesium plate after rolling for different thicknesses magnesium plate

$$f(B) = (1 + 3.574 \times 10^{-4} T_R) (1 - 0.4065e^{-\frac{v}{0.17198}})(1 + 0.125\varepsilon - 0.0920\varepsilon^2) (1 + 0.0448h - 2.617 \times 10^{-3}h^2) \quad (14)$$

式 (13) 可以变为以下等效形式:

$$f(A) = \frac{T_a}{f(B)} \quad (15)$$

为了求得 $f(A)$, 对各种工艺参数下的 $T_a/f(B)$ 进行统计分析, 得出:

$$f(A) \approx 281.4335 \quad (16)$$

此时, 轧后 AZ31 镁合金板材平均温度的经验公式为:

$$T_a = 281.4335(1 + 3.574 \times 10^{-4} T_R) (1 - 0.4065e^{-\frac{v}{0.17198}})(1 + 0.125\varepsilon - 0.0920\varepsilon^2) (1 + 0.0448h - 2.617 \times 10^{-3}h^2) \quad (17)$$

3.2 实验验证

图 17 给出了不同实验轧后镁板平均温度。表 3 为轧后镁板平均温度计算值与实际测量值的对比。经统计, 经验公式计算的轧后镁板平均温度的最大相对误差为 8.34%, 平均相对误差为 7.4%。测量值明显低于计算值, 主要原因是: 镁板从出炉到进入辊缝前始终与周围环境发生热交换, 导致实际轧制温度低于 350 °C; 温度数据记录仪记录数据的时间间隔为 1 s, 这期间轧后镁板也会和周围环境发生热交换, 从而导致测量到的数据偏低。

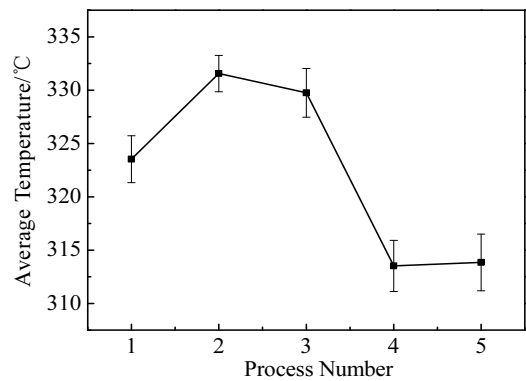


图 17 不同实验轧后镁板平均温度

Fig.17 Average temperature of magnesium plate after different experimental rollings

表 3 计算值与测量值的对比

Table 3 Comparison between calculated value and measured value

Process number	Rolling process	Calculated value/°C	Measured value/°C	Relative error/%
1	110 °C-0.5 m/s -30%-7 mm	348.9	323.5	7.85
2	150 °C-0.5 m/s -30%-7 mm	353.7	331.6	6.66
3	150 °C-0.5 m/s -50%-7 mm	357.3	329.8	8.34
4	150 °C-0.3 m/s -30%-7 mm	336.1	313.5	7.21
5	150 °C-0.5 m/s -30%-3.5 mm	335.6	313.8	6.95

4 结论

1) 当 AZ31 镁合金板材较薄、轧制速度较小时, 镁板中心层的塑性变形热在轧制变形区向表层传递, 中心层的温升不能代表镁板塑性变形产生的温升。

2) 基于数值模拟建立了轧后 AZ31 镁合金中厚板平均温度与轧辊温度、轧制速度、轧制压下量以及板

材厚度的经验公式, 在已知其中 4 个参数的情况下可以预测另 1 个参数。经验公式预测的轧后镁板平均温度的最大相对误差为 8.34%, 平均相对误差为 7.4%。经验公式的建立对 AZ31 镁合金中厚板轧前不同工艺条件下合理轧制制度的制定以及后续轧制设备的选择有重要指导意义, 利于实现“镁合金板材的等温轧制”控制。

参考文献 References

- [1] Mordike B L, Ebert T. *Materials Science and Engineering A*[J], 2001, 302(1): 37
- [2] Jia Weitao, Le Qichi. *Materials and Design*[J], 2017, 121: 288
- [3] Tang Yan, Jia Weitao, Liu Xuan *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2017, 689: 332
- [4] Liu Jianli, Yu Huijun, Chen Chuanzhong *et al. Optics and Lasers in Engineering*[J], 2017, 93: 195
- [5] Jia Weitao, Tang Yan, Le Qichi *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 695: 1838
- [6] Chen Zhenhua(陈振华). *Wrought Magnesium Alloys(变形镁合金)*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 239
- [7] 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
- [8] Chen Weiping(陈维平), Chen Wandu(陈宛德), Zhan Meiyun(詹美燕) *et al. Special Casting and Nonferrous Alloys(特种铸造及有色合金)*[J], 2007, 27(5): 338
- [9] Zhang Dingfei(张丁非), Dai Qingwei(戴庆伟), Fang Lin(方霖) *et al. China Sciencepaper Online(中国科技论文在线)*[J], 2009, 4(11): 813
- [10] Guan Renguo(管仁国), Zhang Qiusheng(张秋生), Dai Chunguang(戴春光) *et al. Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2011, 47(9): 1167
- [11] Zhao Hu, Li Peijie, He Liangju. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2011, 211(6): 1197
- [12] Elsayed F R, Ahmed H, Wells M A *et al. The Minerals, Metals and Materials Society*[J], 2008
- [13] 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
- [14] Deng Xiaohu(邓小虎), Li Liyun(李立云), Qu Zhoude(曲周德). *Journal of Tianjin University of Technology and Education(天津职业技术学院学报)*[J], 2016, 26(2): 1
- [15] Yu Hailiang, Yu Qingbo, Kang Jinwu *et al. Journal of Materials and Performance*[J], 2012, 21(9): 1841
- [16] Liu Guirong(刘桂荣). *Thesis for Master(硕士论文)*[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2007
- [17] Yang Shiming(杨世铭), Tao Wenquan(陶文铨). *Heat Transfer(传热学)*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006
- [18] Lv Lihua(吕立华). *Deformation and Rolling Principle of Metal Molding(金属塑性变形与轧制原理)*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007
- [19] Qian Xiaolei(钱小磊). *Thesis for Doctorate(博士论文)*[D]. Changchun: Jilin University, 2014
- [20] Li Weigang(李维刚), Liu Xianghua(刘相华), Guo Chaohui(郭朝辉). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报)*[J], 2012, 22(11): 3176
- [21] Liu Di, Liu Zuyan, Wang Lumeng. *Procedia Engineering*[J], 2014, 81: 173
- [22] Wei Jianchun(韦建春), Huang Qingxue(黄庆学), Huang Zhiquan(黄志权) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2018, 47(2): 652
- [23] Wang Lumeng(王露萌). *Thesis for Master(硕士论文)*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008
- [24] Liu Ruifen(刘瑞芬). *Thesis for Master(硕士论文)*[D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2015
- [25] Cai Ban, Li Changsheng, Zhang Jian *et al. Procedia Engineering*[J], 2014, 81: 209

Numerical Simulation and Experimental Verification of Temperature Field in Medium Plate Rolling of AZ31 Magnesium Alloy

Li Yang¹, Ma Lifeng¹, Jiang Zhengyi², Huang Zhiquan¹, Lin Jinbao¹, Ji Yafeng¹

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

(2. University of Wollongong, Wollongong, NSW 2522, Australia)

Abstract: The temperature distribution of the AZ31 magnesium alloy in the rolling deformation zone was analyzed by numerical simulation. The empirical formula of the average temperature of the magnesium plate after rolling with respect to the roll temperature, the rolling velocities, the rolling reduction rate, and the thickness of the plate were established and supplemented with corresponding experimental verification. The results show that when the magnesium plate is thin and the rolling velocity is small, the plastic deformation heat of the center layer of the magnesium plate is transferred to the surface in the rolling deformation zone. The temperature rise of the center layer cannot represent the temperature rise caused by the deformation of the magnesium plate. The average temperature of the magnesium plate after rolling is positively related to the roll temperature, rolling velocity and rolling reduction rate, and is inversely related to the sheet thickness. The maximum relative error between the calculated and experimental values of the formula is 8.34%, and the average relative error is 7.4%. The formula can well predict the average temperature of the magnesium plate after rolling. The proposed empirical formula for magnesium plate temperature prediction is conducive to the realization of “isothermal rolling” control of AZ31 magnesium alloy sheet; it has important guiding significance for the reasonable formulation of magnesium alloy rolling process system and the selection of subsequent rolling equipment.

Key words: AZ31 magnesium alloy; plastic deformation heat; isothermal rolling; rolling process

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@163.com