

镁合金热辊轧制温升效应研究

丁云鹏, 朱 强, 乐启焱, 张志强, 崔建忠

(东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 研究了热辊轧制中 AZ31B 镁合金不同工艺条件下厚度方向温度分布及其与组织的关系, 并在此基础上建立了能量守恒的简化方程来预测温升。结果表明: 变形过程中各层金属的温升均与压下率正相关, 而与初轧温度反相关。辊温显著影响轧制时的表面温降和总体温升, 使得热辊轧制表层组织中孪晶明显减小, 轧板中再结晶更加充分。此外, 基于能量守恒的简化方程的计算结果与实测数据吻合较好。

关键词: 镁合金; 变形热; 轧制; 温升; 微观组织

中图分类号: TG335.58

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)09-2481-06

镁合金作为结构材料具有比强度高、减震性好等优点, 在航空、航天和汽车工业中拥有巨大的发展空间^[1]。而镁合金轧制板材是其应用的重要产品。然而, 镁合金的 hcp 结构导致其低温下滑移系少, 变形方式、力学性能和成形性都对温度极其敏感。在轧制过程中, 镁合金板坯和低温轧辊的接触传热使其温度大幅降低。这是导致轧板成形性低并需多次补温的重要原因。这极大地提高了镁合金板材的成本, 并限制了其应用。

金属材料在塑性变形过程中, 位错的产生和运动以及晶格扭曲^[2]导致大约有 90% 的塑性功不可逆转地转化为热而使温度升高。温升值可由如下的简化方程来估算:

$$\Delta T = \frac{0.9}{\rho C_p} \int \sigma d\varepsilon = 0.9 \frac{\sigma}{\rho} \varepsilon \frac{1}{C_p} \quad (1)$$

其中 ρ , C_p , σ 和 ε 分别表示: 材料的密度, 比热容, 应力和应变。根据这个关系, 由于比强度 (σ/ρ) 较高, 镁合金变形热引起的温升比铝合金 (C_p 相似) 的大得多。有研究^[3]表明: 在变形过程中镁合金的温升为铝合金的 1.5 倍。应变 (ε) 较大时镁合金的温升将会更大。此外, 镁合金由于导热系数低 (约为铝合金的 60%), 导致其变形热难以在较短时间内传递出去, 从而加剧了温升效应。

考虑到变形热温升效应的巨大影响, 很多学者对镁合金轧制引起的温升进行了研究。Yu^[4]对 AZ31 镁合金热辊冷轧过程中的反向温度场进行了有限元模拟研究, 表明 20% 压下率轧制时, 中心层温升高达

180 °C, 证明了镁合金轧制的温升效应显著。张丁非^[5]对 AZ31 镁合金板材轧制过程中热量的产生和散失进行了研究并建立了相应的有限元模型, 具有指导意义。总体上, 对镁合金轧制过程中温度场的研究大多是计算机模拟研究而缺少足够的实测数据作为支撑。

如前所述, 镁合金轧制过程中表面温降大是导致轧板成形性低并需多次补温的重要原因。而镁合金的温升效应为其提供了一种可能的温度补偿机制。如果能较好的利用将有利于实现多道次控温轧制, 甚至恒温轧制, 同时大幅降低其加工成本。由于温升可能会反过来影响变形如孪晶、位错运动、空位和回复^[6], 并最终影响板材的组织变化、机械性能、轧制压力以及最终尺寸^[7]。所以准确地预测变形过程各个环节的温度变化是保证轧制过程高效进行的重要前提。

本研究在以前对冷辊热轧的板材温度场研究^[8]的基础上, 采用相同的测量方法对不同压下率和初轧温度下热辊热轧的温度场进行测量并对比分析它与冷辊轧制的差别及其对微观组织的影响。此外, 还提出了一种基于能量守恒的简化模型来预测轧制不同阶段的温升。

1 实 验

实验材料为常用变形镁合金 AZ31B (Mg-2.6%Al-1.2%Zn-0.2%Mn, 质量分数)。均匀化后的铸锭被锯切成 150 mm×80 mm×30 mm 的 AZ31B 板坯, 初始晶粒尺寸为 600 μm。本研究采用了内镶测温偶原位测量的

收稿日期: 2016-09-09

基金项目: 国家“973”计划资助项目 (2013CB632203); 辽宁省自然科学基金资助项目 (2014028027); 中央高校基本科研业务费专项资金 (N120509002, N120309003)

作者简介: 丁云鹏, 男, 1987 年生, 博士, 东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819, E-mail: dapeng1212@126.com

方法。实验设备主要包括辊道加热炉、轧机和温度记录仪及其抗干扰保护罩等，具体设备排布及测量过程详见参考文献[8]。 ω 测温偶穿过板坯分别在表面层，1/4H 和中心层的沿横向的孔与板坯相连。电偶线穿过轧机连接到 HIOKI 高精度温度记录仪上。轧制时由高精度温度数据记录仪实时检测并记录温度变化。温度数据采集频率为 100 Hz。轧制压下率的范围为 4%~65%。初轧温度分别为：250，300，350 和 400 °C。轧辊直径和转速分别为 475 mm 和 33 r/min。热辊轧制时，轧辊通过液化气燃烧加热使其温度保持在 100 °C。轧制过程中无润滑。在测量过程中，由于表面剪切变形大，状况复杂而易出现表面测温偶损坏的状况。

2 结果与分析

2.1 初轧温度对温度分布的影响

图 1 所示为 AZ31B 板坯不同初始温度下轧制过程中的温度变化曲线。可以看出：在整个轧制过程中温度剧烈变化。整个变化过程主要分为两个阶段：变形过程和温度均匀过程。初轧温度对不同厚度镁合金层的温度变化过程具有显著影响。对于轧板内部的中心和 1/4H 层金属，随初轧温度的升高，变形过程中温升 (ΔT_1) 和温度均匀后的总体温升 (ΔT_2) 都逐渐增加。对于表面层，随初轧温度的升高，变形过程中的温降值增大。当 400 °C 以 25% 压下率轧制时此温降最大，达到了 105 °C。这是由于轧辊表面与轧板之间温度梯

度的增加。

2.2 轧制压下率对温度分布的影响

图 2 所示为 AZ31B 板坯 400 °C 下不同压下率轧制过程中的温度变化曲线。由图中可以看出：轧制压下率直接影响不同厚度镁合金层的温度变化过程。对于轧板内部的中心和 1/4H 层金属，随压下率的增大， ΔT_1 和 ΔT_2 都显著增加。对于表面层，随轧制压下率的增大，变形过程中的温降值先增大而后趋于稳定。这是由于轧制过程中，轧辊表面与轧板之间的接触是凸点接触^[9]。而随压下率增大，界面压力增大，轧辊表面与轧板之间接触的凸点增多而增大了接触面，同时接触时间也相应增大。这两个因素共同作用使得表面温降值增大。而压下率增大到一定程度后，轧辊表面温度升高减弱了温度梯度，同时塑性热也相应增大。它们共同作用使得表面温度没有继续降低。

2.3 轧制工艺条件对温升的影响

有研究^[10]表明：轧制过程中，表面激冷效应作用区域有限，故与其相比，轧板内部变形热温升效应对变形过程和微观组织的影响程度更大。在多道次轧制过程中，温度均匀后的总体温度作为后续轧制变形的初始温度会直接影响下道次变形过程，所以温度均匀后的温升值 (ΔT_2) 也是轧制过程中的重要参数。因此，下面重点研究轧板中心层不同阶段的温升。

图 3 为轧板中心层不同阶段的温升值随压下率和初轧温度的变化。显然， ΔT_1 和 ΔT_2 都与轧制压下率

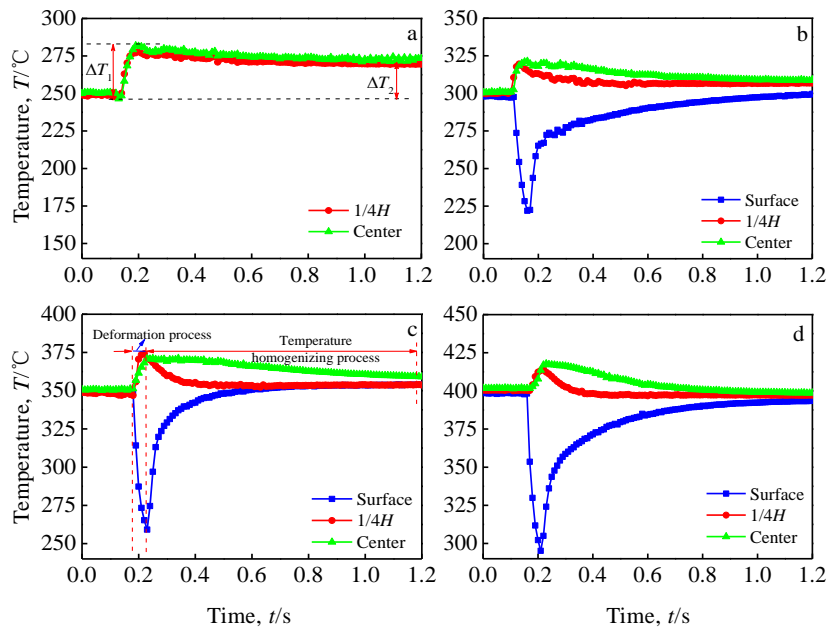


图 1 不同初始温度下(25±3)%压下率轧制的温度变化过程

Fig.1 Temperature change history during rolling for (25±3)% reduction at different temperatures: (a) 250 °C, (b) 300 °C, (c) 350 °C and (d) 400 °C (ΔT_1 -temperature rise during deformation process, ΔT_2 -temperature rise after temperature homogenizing process)

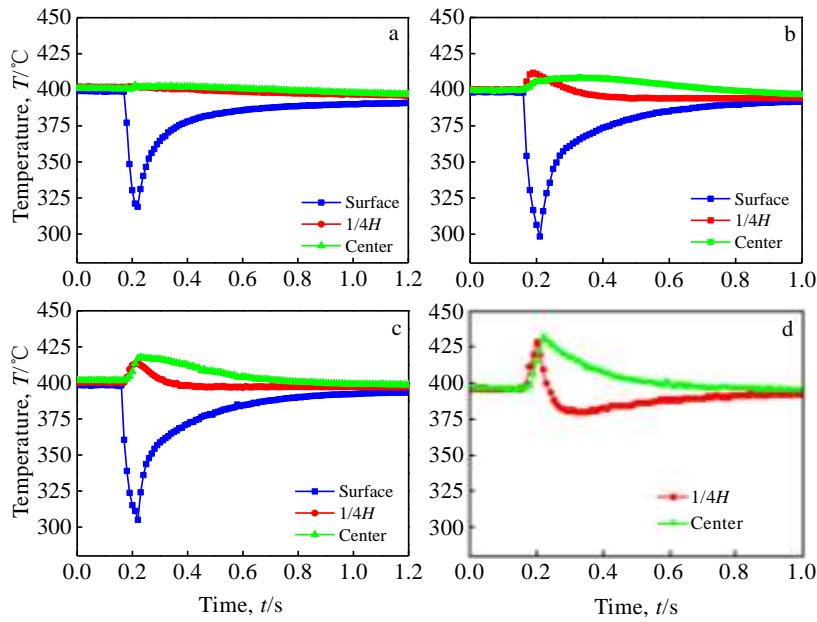


图 2 400 °C 下不同压下率轧制的温度变化过程

Fig.2 Temperature change history during rolling for different reductions at 400 °C: (a) 7%, (b) 18%, (c) 27% and (d) 39%

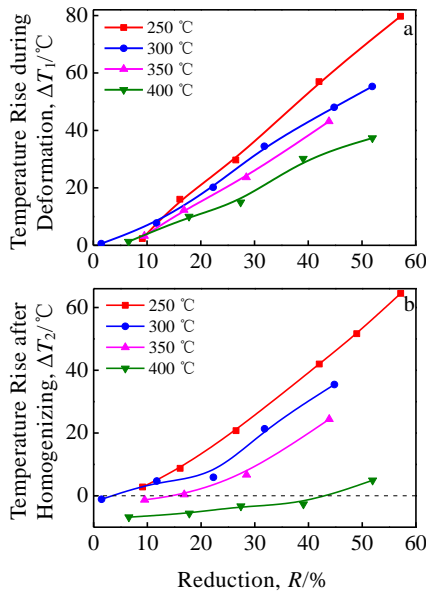


图 3 轧板中心层温升随初轧温度和压下率的变化

Fig.3 Central temperature rises of rolled sheets with respects to initial rolling temperature and height reduction: (a) ΔT_1 and (b) ΔT_2

正相关，而与初轧温度反相关。 ΔT_1 随压下率增大的斜率随初轧温度的增加而逐渐下降。当初轧温度从 250 °C 升高到 400 °C，其斜率从 1.6 下降到约 0.8。在 250 °C 下 57% 压下率轧制时， ΔT_1 和 ΔT_2 均达到最大值，分别约为 80 和 64.5 °C。在变形过程中，由于时间极

短 (<0.1 s)，试样中心层金属基本处于绝热状态，故中心层温升主要对变形热敏感。而在随后的温度均匀过程中，除了变形热，轧板与轧辊之间的传导热和摩擦热的遗传效应以及与周围环境之间对流散热的影响都是不可忽视的。在较低初轧温度下，两个温升值都较大，这与流动应力的增加^[11]以及轧板与轧辊和周围环境之间温度梯度的减少有关。此外，轧制压下率越大，对应轧板中心温升也越大。这是由于应变的增加，导致了变形功的增加而增大了温升。

轧制过程中的温升会导致流动应力减少，即热软化现象。孙朝阳^[12]研究 AZ31 镁合金热压缩行为表明变形温度每升高 50 °C，流动应力将降低 30~50 MPa。在 250 °C 以应变速率 10 s^{-1} 变形时引起的热软化将导致流动应力减小 40 MPa。可见，镁合金轧制温升效应将对其变形行为产生深远的影响。

2.4 轧辊温度对温升的影响

图 4 所示为冷辊 (RT) 和热辊 (100 °C) 轧制过程中板材中心层温升值的对比。从图中可以看出辊温对 ΔT_1 基本无影响，然而却对 ΔT_2 的影响巨大。热辊轧制的 ΔT_2 显著大于冷辊轧制的。这是由于变形过程板材中心层的绝热状态使得变形过程中温升主要对变形热敏感。而在随后的温度均匀过程中，温升受到变形热、轧板与轧辊之间的传导热和摩擦热以及与环境之间的对流散热的共同影响。而辊温提高后，轧板与轧辊之间的温度梯度减少，故传导热减少，从而使得 ΔT_2 显著增大。

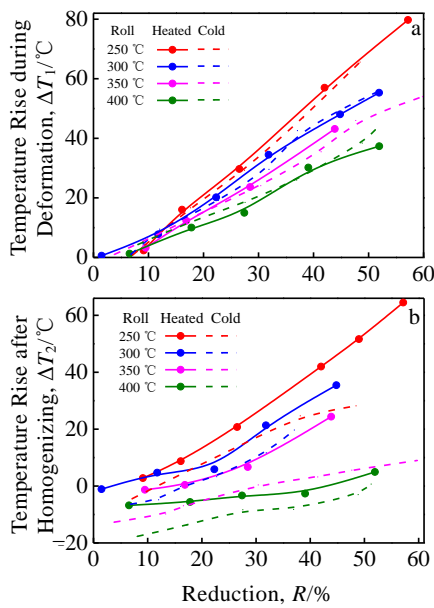


图 4 冷热轧制的中心温升值的对比

Fig.4 Comparisons of temperature rises between cold roll rolling and heated roll rolling: (a) ΔT_1 and (b) ΔT_2

2.5 轧辊温度对组织的影响

图 5 为分别采用冷辊 (RT) 和热辊 (100 °C) 在 250 °C 下进行 17% 压下率轧制的温度变化过程和微观组织。从图中可以看出辊温显著影响温度变化, 尤其是表面温降。冷辊轧制时表面最低温度仅 152 °C。此时仅有基面滑移和孪生可以启动, 并且只有孪生可以协调 c 轴方向的变形, 故组织中孪晶明显增多。而采用热辊轧制后表面的最低温度升高到了 198 °C。相比于冷辊轧制, 热辊轧制过程中表面温降的减小使得表层变形组织中孪晶明显减少。而在次表层由于温度相对表面更高, 在畸变能较大的孪晶交叉处和孪晶与晶界的交汇形核而出现了再结晶晶粒, 但再结晶程度有限。而由于变形时中心层的绝热状态其变形温升几乎未变化, 轧制瞬间温度升高至 269 °C。表面温降效应和中心变形热温升效应共同影响使得热辊轧制温度均匀后总体温度略高于初轧温度。而热辊轧制中间层发生了更加充分的再结晶, 晶粒明显细化, 组织中孪晶也相应减少。

2.6 能量守恒的简化方程

为方便预测轧制过程中的温升, 本研究基于能量守恒原理对轧板中心层的变形温升和温度均匀后的温升进行了理论计算。如前所述, 在轧制变形过程中, 中心层的绝热条件导致其 ΔT_1 主要由变形热引起。然而在温度均匀过程中, 中心层 ΔT_2 除受变形热影响外, 还受与轧辊之间的传导热、摩擦热以及与周围环境之

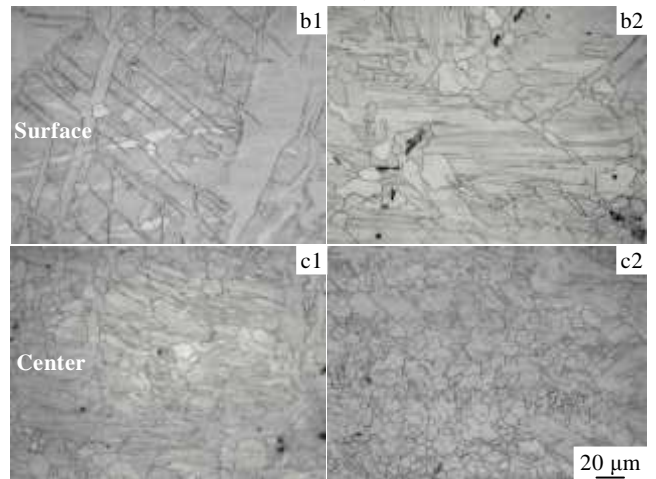
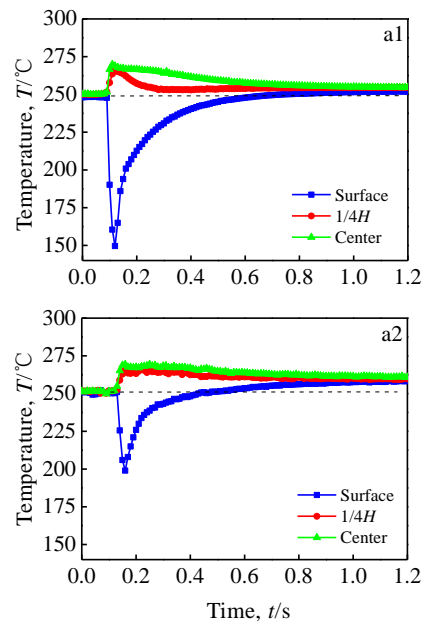


图 5 250 °C 下 17% 压下率轧制时辊温对板材温度变化和微观组织的影响

Fig.5 Effects of roll temperature on temperature change history and microstructures of plates rolled for 17% reduction at 250 °C (1) cold roll (RT) and (2) heated roll (100 °C): (a) temperature change history, (b) surface microstructure, and (c) center microstructure

间对流散热的影响。因此, 轧制两个阶段的能量守恒方程分别为:

$$Q_1 = Q_{pls} \quad (2)$$

$$Q_2 = Q_{pls} + Q_{fri} - Q_{con} - Q_{los} \quad (3)$$

各符号的含义详见表 1。其中, 变形过程中变形功和摩擦功中约 90% 转换成热, 而摩擦热中约 50% 分配到轧板中^[10]。轧制过程中的总热量、温度均匀后的总热量、变形热、摩擦热、与轧辊之间的传导热和与周围环境之间的散热可分别表示为:

表 1 所用符号及其含义

Table 1 Used symbol parameters and their meanings

Symbol	Meaning	Symbol	Meaning
A	Contacting area at the roll gap region	S	Total surface area
C _p	Heat capacity of plate	Δt ₁	Deformation time
h	Final thickness of plate	Δt ₂	Total time
h ₁	The roll/plate interface heat-transfer coefficient (30 kW m ⁻² K ⁻¹ ^[13])	ΔT	Initial temperature difference between roll and plate
h ₂	Convective coefficient to environments (19 W m ⁻² K ⁻¹)	ΔT ₁	Temperature rise during deformation
H	Initial thickness of plate	ΔT ₂	Temperature rise after temperature homogenizing
L	Contacting length at the roll gap region	ΔT ₃	Temperature difference between plate and environment
m	Friction coefficient (0.3)	v	Relative velocity between roll and plate
Q ₁	Total heat during deformation	v ₁	Line speed of roll
Q ₂	Total heat after temperature homogenizing	V	Deformation volume
Q _{pls}	Deformation heat	w	Plate width
Q _{fri}	Heat generation due to friction	ρ	Density
Q _{con}	Conduction heat to roll	σ	Flow stress ^[14]
Q _{ios}	Convection and radiation to the environment	ε	Strain
R	Roll radius		

$$Q_1 = \rho C_p V \Delta T_1 \quad (4)$$

$$Q_2 = \rho C_p V \Delta T_2 \quad (5)$$

$$Q_{pls} = 0.9 \sigma \varepsilon V \quad (6)$$

$$Q_{fri} = 0.5 \times 0.9 m (\sigma / \sqrt{3}) v \times 2 A \Delta t_1 \quad (7)$$

$$Q_{con} = 2 A h_1 (\Delta T + 0.5 \Delta T_1) \Delta t_1 \quad (8)$$

$$Q_{ios} = S h_2 \Delta T_3 \Delta t_2 \quad (9)$$

结合式 (2) ~ (9) 可得能量守恒方程的另一种表示方式:

$$\rho C_p V \Delta T_1 = 0.9 \sigma \varepsilon V \quad (10)$$

$$\rho C_p V \Delta T_2 = 0.9 \sigma \varepsilon V + 0.9 m (\sigma / \sqrt{3}) v A \Delta t_1 - 2 A h_1 (\Delta T + 0.5 \Delta T_1) \Delta t_1 - S h_2 \Delta T_3 \Delta t_2 \quad (11)$$

对于轧制成型, 应变 (ε)、接触弧长度 (L)、轧板与轧辊的接触面积 (A) 和变形体积 (V) 可以简写为:

$$\varepsilon = \ln(H/h) \quad (12)$$

$$L = \sqrt{R(H-h)} \quad (13)$$

$$A = Lw \quad (14)$$

$$V = 0.5 A(H+h) \quad (15)$$

此外, 变形时间 (Δt) 可表示为:

$$\Delta t_1 = L/v_1 \quad (16)$$

因此, 在轧制变形过程中的温升可以表示为:

$$\Delta T_1 = \frac{0.9 \sigma}{\rho C_p} \ln \frac{H}{h} \quad (17)$$

温度均匀后的温升可以表示为公式 (18)。

$$\Delta T_2 = \Delta T_1 + \frac{2\sqrt{R(H-h)}}{\rho C_p} \left[\frac{0.9 m \sigma v - 2\sqrt{3} h_1 (\Delta T + 0.5 \Delta T_1)}{\sqrt{3} v_1 (H+h)} - \frac{S h_2 \Delta T_3 \Delta t_2}{w R (H^2 - h^2)} \right] \quad (18)$$

轧制变形过程中和温度均匀后的中心层温升都可以通过公式 (17) 和 (18) 来预测。图 6 所示为轧制过程中两温升值的计算值和实测值之间的比较。从图中可以看出轧制变形过程中和温度均匀后的温升的预测值与实测值之间吻合较好, 误差率低于 15%。故该模型可较准确地预测镁合金轧制过程中的温升。

本实验所测得的温升数据为镁合金轧制工艺制度的制定和轧制及加热设备的选择提供了非常重要的基础数据, 并且对镁合金轧制温度场模拟结果的校正具有十分重要的参考意义。研究表明: 镁合金轧制过程中的变形热引起的温升巨大, 不可忽略。这将对变形过程中的变形机制和再结晶行为产生巨大影响。近年来为获得超细晶组织和高力学性能, 许多学者^[15]在轧辊加热和较低开轧温度 (<250 °C) 条件下进行了单道次压下率高达 60% 以上的大应变轧制。这些条件下温升效应的作用将不可估量, 然而其影响却往往被研究者忽视。大应变轧制过程中温升效应对变形机制和再

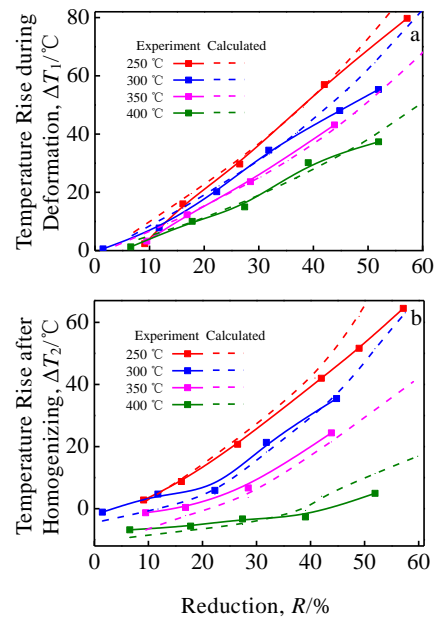


图 6 轧制温升值的计算值与实测值的对比

Fig.6 Comparisons between the calculated and experimental temperature rises during rolling: (a) ΔT₁ and (b) ΔT₂

结晶行为的影响值得深入研究。

3 结 论

1) 变形过程中的温升和温度均匀后的温升都与轧制压下率正相关, 而与初轧温度反相关, 其最大值分别为 80 和 64.5 °C。

2) 变形过程中的表面温降随初轧温度的升高而增大, 随轧制压下率的增大先增大而后趋于稳定。

3) 辊温显著影响轧制时的表面温降和温度均匀后的温升, 使得热辊轧制表层组织中孪晶明显减小, 轧板中的再结晶更加充分。

4) 建立了基于能量守恒的简化模型来预测轧制温升。其计算结果与实测结果的吻合性较好。

参考文献 References

- [1] Wu Juying(吴菊英), Wu Lu(吴 璐), Pan Fusheng(潘复生) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(7): 1638
- [2] Pereira P H R, Figueiredo R B, Huang Y *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 593(0): 185
- [3] Nishida Y, Ando T, Nagase M *et al. Scripta Materialia*[J], 2002, 46(3): 211
- [4] Yu H, Yu Q, Kang J *et al. Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2012, 21(9): 1841
- [5] Zhang Dingfei(张丁非), Dai Qingwei(戴庆伟), Fang Lin(方霖) *et al. Sciencepaper Online*(中国科技论文在线)[J], 2009, 4(11): 813
- [6] Valiev R Z, Islamgaliev R K, Alexandrov I V. *Progress in Materials Science*[J], 2000, 45(2): 103
- [7] Galantucci L M, Tricarico L. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 1999, 92: 494
- [8] Ding Yunpeng(丁云鹏), Zhu Qiang(朱 强), Ma Qingwu(马庆武) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(3): 722
- [9] Chen W C, Samarasekera I V, Hawbolt E B. *Metallurgical Transactions A*[J], 1993, 24(6): 1307
- [10] Chen W C, Samarasekera I V, Kumar A *et al. Ironmaking and Steelmaking*[J], 1993, 20(2): 113
- [11] Liu Zuyan(刘祖岩), Liu Gang(刘 刚), Liang Shujin(梁书锦). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(S3): 304
- [12] Sun Zhaoyang(孙朝阳), Luan Jingdong(栾京东), Liu Geng(刘 赓) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2012, 48(07): 853
- [13] Zhang D, Dai Q, Fang L *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2011, 21(5): 1112
- [14] Yu Kun(余 琨), Cai Zhiyong(蔡志勇), Wang Xiaoyan(王晓艳) *et al. Journal of Central South University, Science and Technology*(中南大学学报, 自然科学版)[J], 2010, 41(05): 1749
- [15] Cho J, Jeong S S, Kim H *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 566: 40

Temperature Rise Effect of AZ31B Mg Alloy during Rolling with Heated Rolls

Ding Yunpeng, Zhu Qiang, Le Qichi, Zhang Zhiqiang, Cui Jianzhong

(Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The temperature distribution along the thickness direction of AZ31B Mg alloy was measured during rolling with heated rolls, based on the previous study of temperature rise effect during rolling with cold (RT) rolls. The effects of different rolling conditions on temperature distribution and its relation with microstructure were investigated. On this basis, simplified energy-based state equations were established to predict temperature rises. The results show that the two temperature rises of metal layers in different thickness both increase with either increased reduction or decreased initial rolling temperature. The roll temperature has obvious effects on surface temperature and overall temperature rise. As a result, the amount of twin in surface layer decreases sharply and the overall recrystallization zone increases during rolling with heated roll, compared with those with cold rolls. The calculated results by energy-based state equations are in good agreement with the experimental ones.

Key words: magnesium alloy; deformation heat; rolling; temperature rise; microstructure

Corresponding author: Le Qichi, Ph. D., Professor, Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Northeastern University, Shenyang 110819, P. R. China, Tel: 0086-24-83683312, E-mail: qichil@mail.neu.edu.cn