

# AZ31B 镁合金轧制过程中的温升效应

丁云鹏, 朱 强, 马庆武, 张志强, 乐启焱, 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:** 采用内镶测温偶原位测量的方法测定了 AZ31B 镁合金在不同轧制工艺条件下的温度变化过程。结果表明: 整个温度变化过程分为变形过程 (0.02~0.08 s) 和温度均匀过程 (0.8~1.2 s)。这 2 个阶段的温升值都与压下量正相关, 而与初轧温度反相关。在 200 °C 下 45% 压下量轧制时两温升值分别达到 80 和 35 °C。在此基础上建立经验公式来预测温升。变形热引起的温升效应显著影响轧板的组织和再结晶行为。

**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)03-0722-06

镁合金作为结构材料具有密度小、比强度高优点而成为近来研究的热点。交通运输行业来自节能和环保方面的压力为镁合金提供了巨大的发展空间<sup>[1]</sup>, 而轧制是其重要的生产方式<sup>[2]</sup>。在金属塑性变形过程中, 随着位错的产生和运动以及晶格扭曲, 只有小部分变形功以缺陷能的形式保存在材料内部, 而大部分 (~90%) 的塑性功不可逆转地转化为热而使材料温度升高<sup>[3]</sup>。镁合金比强度高, 而体积比热和导热系数小 (分别约为铝合金的 70% 和 60%) 使得其变形热引起的温升要大得多。并且, 大道次应变轧制时由于塑性功大, 导致其变形热效应加剧。此外, 与等径角挤压相比, 轧制变形过程中材料局部与低温磨具的接触时间 (<0.1 s) 要少得多, 故与环境的传热量更小。由于轧制过程中温升会反过来影响变形如再结晶<sup>[4]</sup>、位错运动、孪晶和回复等现象<sup>[5]</sup>, 所以为了精确控制轧制过程中的再结晶行为和微观结构改变, 对变形温升进行精确测量是十分有必要的。

考虑到变形热温升效应的巨大影响, 有学者对镁合金轧制引起的温升进行了研究。H. Yu<sup>[6]</sup>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% 压下量轧制时, 中心层温升高达 180 °C。张丁非<sup>[7]</sup>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, 建立了相应的有限元模型, 并进行了实验测量的验证。由于其实验中温度响应时间是 1 s, 故无法实验测定出变形过程 (约 0.1 s) 中的变形热温升效应。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。由于有限元模拟精度受到所使用的软件与轧辊之间的接触换热系数和本构方程等模拟参数准确性的制约, 这些都为镁合金板材轧制过程温度场的模拟带来了难度。镁合金轧制过程中变形热温升和轧后总体温升的具体值及其随工艺参数的变化幅度, 以及轧板中温度梯度对变形组织的影响方面的实验研究很少。而此研究可为镁合金轧制工艺制度的制定和轧制相关设备的选择以及轧制温度场的模拟提供非常重要的基础数据, 具有十分重要的参考意义。

本研究采用了内镶测温偶原位测量法<sup>[8]</sup>并使用高精度温度记录仪来记录温度变化。本研究的目的是测量不同压下量和初轧温度下, AZ31B 镁合金轧制过程中厚度方向的温度分布及其随时间的变化过程, 并重点研究了变形热温升效应及其对组织的影响。

## 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, 下同)。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。本研究采用内镶测温偶原位测量的方法<sup>[8]</sup>。实验设备主要包括辊道加热炉、轧机和 HIOKI 高精度温度记录仪及其抗干扰保护罩等。制备内镶测温偶的 AZ31B 板坯过程为: 首先, 从板坯侧面分别在表面层, 1/4H 和中心层沿横向各钻一个直径 3 mm 深度 1/2 宽度的孔; 随后, 将 3 根直径 3 mm 的

收稿日期: 2016-03-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) (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资助 (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

$\omega$  热电偶分别沿孔插入板坯并固定。电偶线穿过轧机连接到温度记录仪上。实验测定时,先开启炉门并启动辊道,将板坯传送到轧机中进行轧制。轧制时由温度数据记录仪实时检测温度变化。温度数据采集频率为 100 Hz。轧制压下率的范围为 4%~55%。初轧温度分别为: 200, 250, 300, 350 和 400 °C。轧辊直径和转速分别为 475 mm 和 33 r/m。轧制过程中无润滑。

## 2 结果与分析

### 2.1 轧制压下量对温度分布的影响

图 1 为 AZ31B 板坯 200 °C 下不同压下量轧制过程中的温度变化曲线。根据不同厚度金属层温度变化路径的差别,整个温度变化过程主要分为 2 个阶段:阶段 I ( $S_1$ ) 为变形过程,此时金属处于辊缝中(约 0.02~0.08 s),出现了显著的表面激冷效应和内部变形热温升效应:一方面样品表面由于与冷轧辊接触导致温度急剧下降,而另一方面变形中心和 1/4H 层金属由于变形热的影响,温度升高而达到峰值,这使得轧板表层温度梯度明显增大;阶段 II ( $S_2$ ) 为温度均匀过程,此阶段从轧板脱离轧辊到温度基本均匀(约 0.8~1.2 s)。此时,由于内部热传导,样品表面温度回升,而内部温度逐渐下降,直至轧板温度总体基本均匀(表面温度只比中心温度低约 4 °C)。

图 2 为 200 °C 下不同压下量轧制时不同厚度

AZ31B 层的温度变化值(绝对值,通过提取图 2 中的特征数据点而得到)。由图中可以看出:轧制压下量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,随压下量的增大, $S_1$  温升和  $S_2$  后的总体温升都显著增加。对于表面层,变形过程中的温降值与轧制压下量正相关。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<sup>[8]</sup>。而随压下量增大,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接触传热系数,同时接触时间也相应增大。这 2 个因素共同作用使得表面温降值增大。在 200 °C 下 35% 压下量轧制时,表面温降值都达到 89 °C。

### 2.2 轧制压下量对组织的影响

图 3 为 200 °C 下不同压下量轧制后板材的微观组织。可见,轧制温度场的分布对轧件的微观组织有直接影响。与图 2 对比分析可知,压下率为 5% 时,板材表层出现一些孪晶,而 1/4H 和中心层出现少量细小孪晶。压下量为 14%,表面温度降至 135.7 °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,组织中孪晶明显增多。而在轧板的 1/4H 和中心层也出现了大量孪晶,由于变形热量小,其温度仍低于再结晶温度,故无再结晶现象。当压下量 22% 轧制时,表面温度降至 121.3 °C,表层孪生进一步增多,但由于温度较低,未发现再结晶现象。

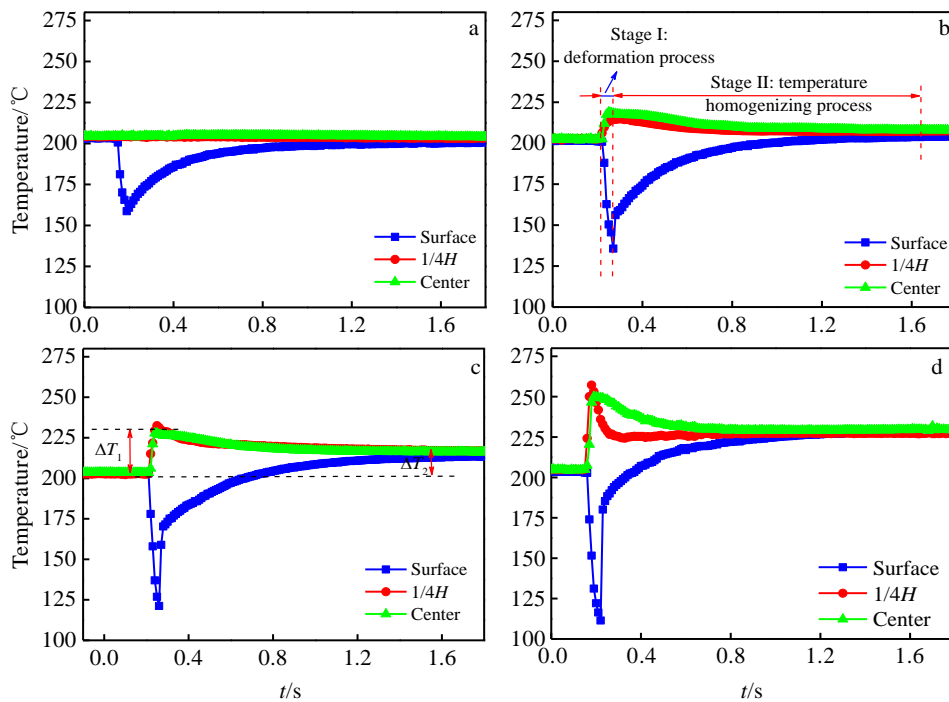


图 1 200 °C 不同压下量轧制的温度变化过程

Fig.1 Temperature change history during rolling with different reductions at 200 °C: (a) 5%, (b) 14%, (c) 22% and (d) 35% ( $\Delta T_1$ - temperature rise during deformation process,  $\Delta T_2$ - temperature rise after temperature homogenizing process)

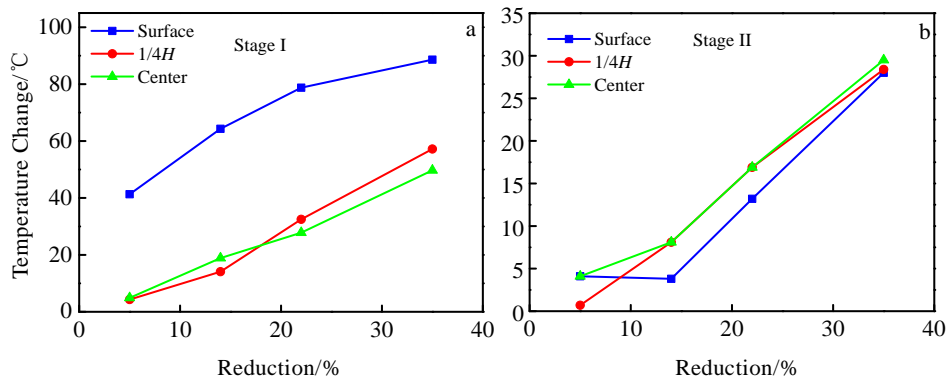


图 2 压下量对不同厚度 AZ31B 层温度变化 (绝对值) 的影响

Fig.2 Effect of reduction on temperature change values (absolute value) of AZ31 layers with different thickness: (a) S<sub>1</sub> and (b) S<sub>2</sub>

而在轧板的 1/4H 和中心层也出现了大量的孪晶, 由于应变量的增加, 变形热使其瞬间温度升至再结晶温度以上 (227~232 °C), 故新晶粒在畸变能较大的孪晶交叉处和孪晶与晶界的交汇处形核而出现了再结晶晶粒, 但再结晶程度有限。压下率继续增大至 35% 时,

表面瞬间温度降低较多, 但之后 (约 0.7 s) 温度很快就回升到再结晶温度以上 227 °C。板材的表面组织中出现了大量的平行孪晶, 且在一些孪晶的内部出现了很少量的再结晶晶粒, 而在板材的次表层由于温度相对表面更高, 出现了一些细小的再结晶晶粒。而

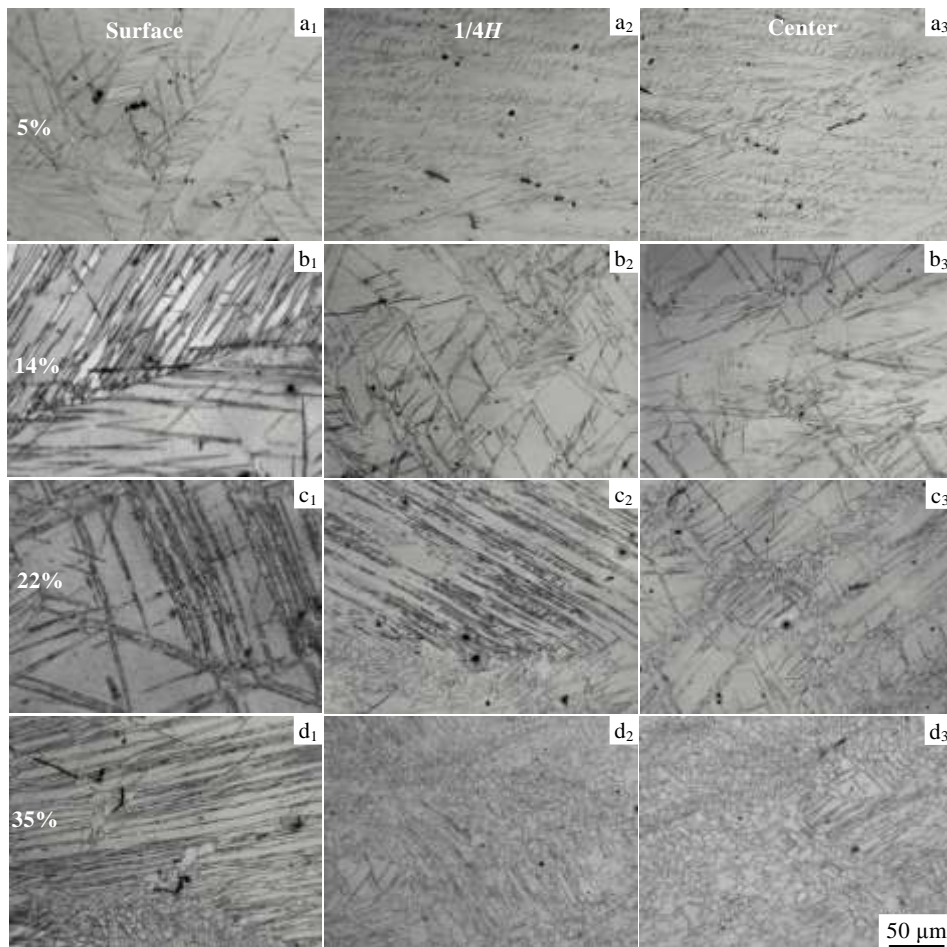


图 3 200 °C 下不同压下量轧制的微观组织

Fig.3 Microstructures during rolling with different reductions at 200 °C: (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, a<sub>3</sub>) 5%, (b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, b<sub>3</sub>) 14%, (c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>, c<sub>3</sub>) 22%, and (d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub>, d<sub>3</sub>) 35%; (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>, d<sub>1</sub>) surface, (a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>, d<sub>2</sub>) 1/4H, and (a<sub>3</sub>, b<sub>3</sub>, c<sub>3</sub>, d<sub>3</sub>) center

1/4H和1/2H处由于轧制瞬间温升至261.6和247.3℃,板材发生了比较充分的再结晶。晶粒明显细化,仅有少量晶粒未完全破碎。总之,变形热对板材组织和再结晶行为具有显著影响,直到变形热温升效应使得轧板局部温度升高到再结晶温度以上,才发生了再结晶,且表层组织的再结晶程度明显低于内部组织。

### 2.3 轧制工艺条件对温升的影响

研究<sup>[9]</sup>表明:由于与轧辊的接触时间短,表面激冷效应仅作用于轧板表面1/40厚度层的范围内,故与表面激冷效应相比,轧制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。而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轧制过程,所以温度均匀后的温升值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4为中心层镁合金轧制变形过程中和温度均匀后的温升值随压下量和初轧温度的变化。显然, $\Delta T_1$ 和 $\Delta T_2$ 都与轧制压下量正相关,而与初轧温度反相关,并且 $\Delta T_2$ 值明显低于 $\Delta T_1$ 值。 $\Delta T_1$ 随初轧温度变化的斜率随压下量的增加而逐渐下降。当压下量从6%升高到46%,其斜率从0下降到约-5。在200℃,压下量45%轧制时, $\Delta T_1$ 和 $\Delta T_2$ 均达到最大值,分别约为80和35℃。在轧制变形过程中,由于局部金属在很短的时

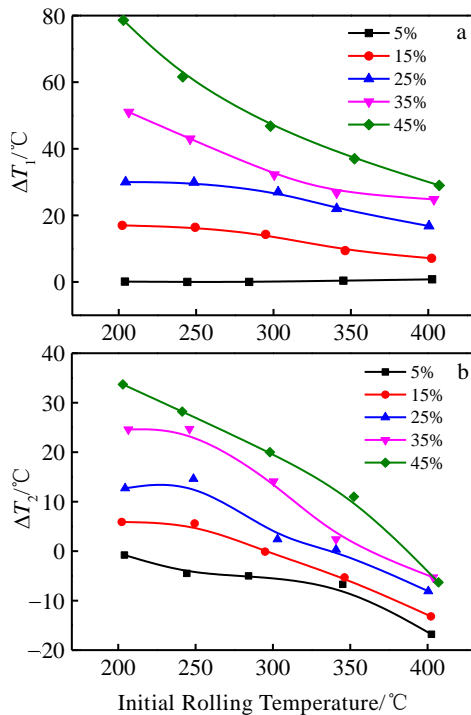


图4 轧板中心层温升随初轧温度和压下量的变化

Fig.4 Change of central temperature rises of rolled sheets with initial rolling temperature and height reduction: (a)  $\Delta T_1$  and (b)  $\Delta T_2$

间内变形,试样中心层金属基本处于绝热条件,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,样品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的对流散热的影响都是不可忽视的,这导致 $S_2$ 后总体温升值的下降。在较低的初轧温度,变形过程中轧板的中心温升也较大。这是由于:在较低的温度,流动应力增加<sup>[10]</sup>而使得变形功增加。同时,在较低温度下,通过传导、对流和辐射传递给轧辊和周围环境产生的热量损失也更少,从而导致轧制中心温升较高。流动应力的增加也导致了对应温升相对初轧温度的斜率随压下量的增大而逐渐降低。另一方面,在各测试温度下轧制压下量越大,对应轧板的中心温升也越大。这是由于应变的增加,导致热变形功增加,因此在变形过程中的温升也增加。

对轧制温升的研究表明:镁合金轧制过程中的变形热引起的温升巨大,不可忽略。这将对轧制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,许多研究者<sup>[11,12]</sup>在轧辊加热和较低开轧温度(<250℃)条件下进行了单道次压下量高达60%以上的大应变轧制。这些条件下温升效应的作用将更加显著,然而其影响却往往被研究者忽视。

在对轧制温升实验测量的基础上,建立了不同轧制工艺条件下温升的经验公式。图5为AZ31B板材轧制不同阶段温升值经验公式与实测值的对比。经验公式如下:

$$\Delta T_1 = (0.04736 - 0.00563R)T + 2.92408R - 21.4528 \quad (1)$$

$$\Delta T_2 = a \exp(T/b) + c \quad (2)$$

其中, $\Delta T_1$ :变形过程中的温升; $\Delta T_2$ :温度均匀后的温升; $T$ :轧制温度; $R$ :轧制压下量。

$$a = 0.49951 - 0.09625R - 0.0051R^2 + 0.000110061R^3 \quad (3)$$

$$b = 31.3387 + 12.0275R - 0.32741R^2 + 0.00273R^3 \quad (4)$$

$$c = -10.22241 + 1.6975R - 0.0093R^2 \quad (5)$$

最近几年,张丁非<sup>[7]</sup>、钱鹏<sup>[13]</sup>和H. Ding<sup>[14]</sup>等采用有限元模拟的方法对镁合金板材轧制过程中的温度场进行了研究。图6为本实验实测温升值与相应模拟结果的对比。从图中可以看出:对于轧制变形过程中的温升,部分参考文献中的模拟值与实测值仍有不小的出入。这主要是由于有限元模拟时温度场的计算受到所使用的软件与轧辊之间的接触换热系数、变形能转换系数和本构方程等相关参数的准确性制约,这些都为镁合金轧制过程中温度场的模拟带来了难度。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,并对镁合金轧制温度场的模拟具有十分重要的参考意义。



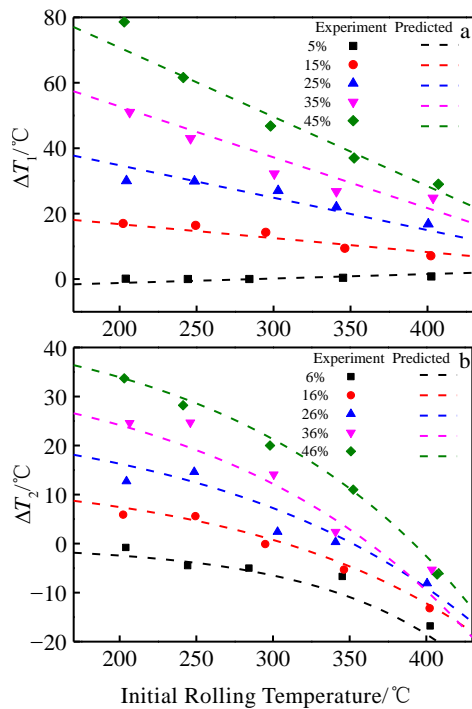


图 5 温升值的经验公式计算值与实测值的对比

Fig.5 Comparisons between the experimental and the calculated temperature rises from empirical formulas: (a)  $\Delta T_1$  and (b)  $\Delta T_2$

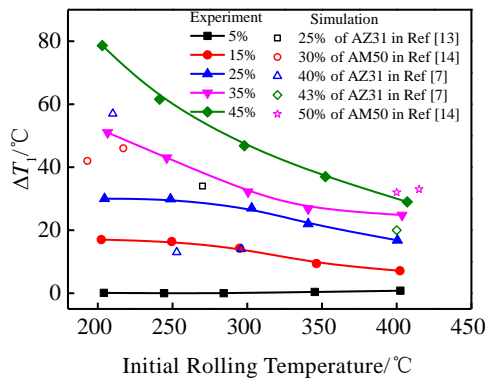


图 6 轧制变形过程的实测温升值与相应模拟结果的对比

Fig.6 Comparisons between the experimental temperature rises and the corresponding simulated result during deformation process<sup>[7,13,14]</sup>

### 3 结 论

- 1) 镁合金轧制中温度变化过程分为：变形过程 (0.02~0.08 s) 和随后的温度均匀过程 (0.8~1.2 s)。
- 2) 变形过程中温升和温度均匀后的温升都随压

下量的增大而增大，同时随初轧温度的升高而减小，并且前者随初轧温度变化的斜率随压下量从 6% 增加到 46% 而从 0 逐渐下降到约 -5。在 200 °C 下 45% 压下量轧制时两温升值都达到峰值，分别为 80 和 35 °C。

3) 在实验的基础上建立了经验公式来预测轧制温升。

4) 变形热对板材组织和再结晶行为具有显著影响，直到变形热温升效应使得轧板局部温度升高到再结晶温度以上才发生再结晶。

### 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] Li Q, Tian B. *Materials Letters*[J], 2012, 67(1): 81

[3] Wang J, Yang R, Jiang L *et al. Applied Physics A*[J], 2013, 113(3): 771

[4] Huang Guangjie(黄光杰), Qian Baohua(钱宝华), Wang Lingyun(汪凌云) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(12): 2080

[5] Valiev R Z, Islamgaliev R K, Alexandrov I V. *Progress in Materials Science*[J], 2000, 45(2): 103

[6] Yu H, Yu Q, Kang J *et al. Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2012, 21(9): 1841

[7] 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

[8] Chen W C, Samarasekera I V, Hawbolt E B. *Metallurgical Transactions A*[J], 1993, 24(6): 1307

[9] Chen W C, Samarasekera I V, Kumar A *et al. Ironmaking and Steelmaking*[J], 1993, 20(2): 113

[10] 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

[11] Kim W J, Lee J B, Kim W Y *et al. Scripta Materialia*[J], 2007, 56(4): 309

[12] Cho J, Jeong S S, Kim H *et al. Materials Science and Engineering: A*[J], 2013, 566: 40

[13] Qian Peng(钱鹏), Hu Liangxi(胡连喜), Miao Qing(苗青) *et al. Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2009, 16(4): 121

[14] Ding H, Wang T, Yang L *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2013, 23(9): 2678

## Temperature Rise Effect of AZ31B Mg Alloy during Rolling

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

(Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Northeastern University, Shenyang 110006, China)

**Abstract:** The temperature change history of AZ31B Mg alloy was measured under different rolling conditions. An in situ measurement method through inlaid thermocouples was used. The results show the whole temperature variation process consists of a deformation process (0.02~0.08 s) and a subsequent temperature homogenizing process (0.8~1.2 s). The temperature rises in these two stages both increase with either increased reduction or decreased initial rolling temperature. These two temperature rises reach 80 and 35 °C, respectively, with 45% rolling at 200 °C. On this basis, two empirical formulas were established to predict temperature rises. The deformation induced temperature rise significantly affects the microstructure and recrystallization behavior of the rolled sheet.

**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