

# 镁合金双道次热变形静态软化及残余应变

范沁红, 马立峰, 蒋亚平, 贾伟涛

(太原科技大学 重型机械教育部工程研究中心, 山西 太原 030024)

**摘要:** 在变形温度 250~450 °C、应变速率 0.005~5 s<sup>-1</sup> 和道次间隔时间 15~240 s 下对 AZ31B 镁合金进行了双道次等温压缩试验, 研究不同变形工艺条件对 AZ31B 镁合金道次间软化规律的影响, 建立了 AZ31B 镁合金道次间软化率预测模型。根据轧制残余应变产生的原因提出了多道次轧制过程中残余应变率的计算方法。研究表明: 随着变形温度和应变速率的提高, 材料的静态软化率逐渐增大, 道次间间隔时间越长, 材料软化程度越大。建立的道次间静态软化率计算模型能够很好地表征 AZ31B 镁合金道次间软化规律, 平均相对误差为 12.58%。进一步对残余应变率的精确计算能够为 AZ31B 镁合金多道次轧制过程中轧制力的求解提供理论支持。

**关键词:** 间隔时间; 软化率; 残余应变率

中图分类号: TG146.2<sup>2</sup>

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)06-1590-06

镁合金在室温下仅有 3 个滑移系, 不满足多晶体塑性变形协调性原则, 塑性成型困难, 故通常采用热成型。薄板卷式往复轧制工艺是一种生产流程短、成材率高、能耗低的生产技术, 在镁合金薄板制备方面具有明显优势和广阔应用前景。每道次轧制后, 镁合金卷材处于卷曲炉的保温阶段, 此时上一道次遗留下来的形变储能将促使静态回复和再结晶的发生, 金属内部发生部分软化行为, 对材料的加工性能具有重大影响<sup>[1,2]</sup>。此外, 在往复轧制过程中, 为了使轧后镁板拥有较好的强度指标(强度极限、屈服强度和硬度等), 往往会选择较低的轧制温度, 此时应变残留将使后续道次的实际应变增大, 对于后续道次变形抗力的准确计算影响很大<sup>[3,4]</sup>。郭强<sup>[5]</sup>利用热模拟试验机对 ZK60 镁合金进行了等温双道次压缩实验, 分析镁合金动态软化与静态软化特性, 建立了 ZK60 镁合金亚动态再结晶动力学模型, 并且得出其道次间软化机制主要为亚动态再结晶的结论。朱松鹤<sup>[6]</sup>对含 Nb-Ti 低碳微合金钢进行双道次等温压缩实验, 研究了工艺参数对奥氏体晶粒尺寸的影响, 建立了该钢种软化行为的动力学方程。胡贤磊<sup>[7]</sup>针对目前中厚板多道次轧制过程中残余应变对轧制力的影响较大的问题, 分别研究了变形温度和道次间隔时间对轧制残余应变率的影响并结合实际轧制生产数据建立了适用于中厚板多道次轧制残余应变率的计算模型, 并将其应用于实际轧制生产,

结果轧制力预测误差大大减小。目前针对钢铁的道次间软化行为及轧制应变残留已有大量的研究, 然而对于镁合金的研究却很少<sup>[8-12]</sup>。本研究在 Gleeble3500 热/力模拟试验机上对挤压态 AZ31B 镁合金进行了等温双道次平面应变压缩实验, 研究不同变形参数对 AZ31B 镁合金双道次变形过程中静态软化和应变残留的影响, 可为 AZ31B 镁合金多道次轧制过程中轧制力的求解提供理论支撑。

## 1 实验

与圆柱体的单轴压缩相比, 平面应变压缩的受力状态更接近于传统的轧制成型, 因此本研究依托于 Gleeble3500 热/力模拟试验机对材料进行平面应变压缩。实验材料为挤压态 AZ31B 镁合金材料, 元素组成如表 1。

用线切割机将原料加工成 10mm×15mm×20mm 的长方体, 压头与试样间利用润滑剂(石墨+机油)进行处理, 温度控制策略如图 1。

表 1 AZ31B 镁合金化学元素含量

Table 1 Chemical element contents of AZ31B magnesium alloy (ω/%)

Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Ni	Mg
3.37	0.86	0.29	0.04	0.1	0.0015	0.0047	Bal.

收稿日期: 2016-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(51105264, U1510131); 山西省重点研发计划(201603D121010); 江苏省“双创团队”领军人才项目; 晋城市科技计划项目(20155010)

作者简介: 范沁红, 女, 1976 年生, 博士生, 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: fanqinhong130@sohu.com

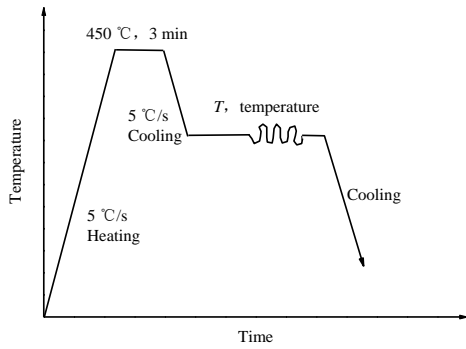


图 1 热压缩实验加工示意图

Fig.1 Schematic of hot deformation

变形温度 250~450 °C，应变速率 0.005~5 s<sup>-1</sup>，道次间隔时间 15~240 s。第 1 道次压缩率为 25%，总压缩率为 50%。

## 2 结果与讨论

### 2.1 静态软化特性

本研究采用力学软化法来定量研究不同变形参数对等温双道次压缩道次间静态软化率的影响规律<sup>[13]</sup>，定义软化率：

$$S = \frac{\sigma_m - \sigma_2}{\sigma_m - \sigma_1} \quad (1)$$

式中， $\sigma_m$  为第 1 道次应变达到最大时对应的应力值， $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  分别为第 1 道次和第 2 道次对应的屈服应

力。其中屈服应力采用应变偏移 0.02 处的流变应力。当  $S=0$  时表示道次间隔之间金属内部无任何软化行为发生； $S=1$  时表示道次间隔之间发生了完全的回覆和再结晶，应变残留得以完全消除； $0 < S < 1$  时表示道次间隔之间发生了部分软化，应变残留未完全消除。

#### 2.1.1 不同道次间隔时间下的静态软化特性

不同道次间隔时间下的热压缩真应力-应变曲线如图 2，按照式 (1) 计算不同道次间隔时间下 AZ31B 镁合金材料的软化率关系如图 3。由图 3 可知，道次间软化率随着间隔时间的增加而增大。在道次间隔初期，由于上一道次遗留下大量的形变储能，静态回复和再结晶很容易发生，静态软化率随着间隔时间的延长而迅速增大。间隔时间为 15 s 时，软化率达到 50.57%。随着形变储能的大量消耗，金属内部无法为静态回复和再结晶提供足够的能量，静态软化率开始随着时间的延长而缓慢增大。间隔时间为 30 s 时，软化率达到 60.14%，较间隔 15 s 仅增加 9.57%。之后随着间隔时间的延长，软化率增大更为缓慢。多道次热轧变形过程是金属内部加工硬化与再结晶软化互相竞争互相影响的结果，由于动态再结晶过程无法将畸变形变储能完全消除，造成材料内部组织的不稳定。在道次间隔期间残留的形变储能将促使静态回复和再结晶的发生，材料发生静态软化，且时间越长，软化程度越大<sup>[14,15]</sup>。

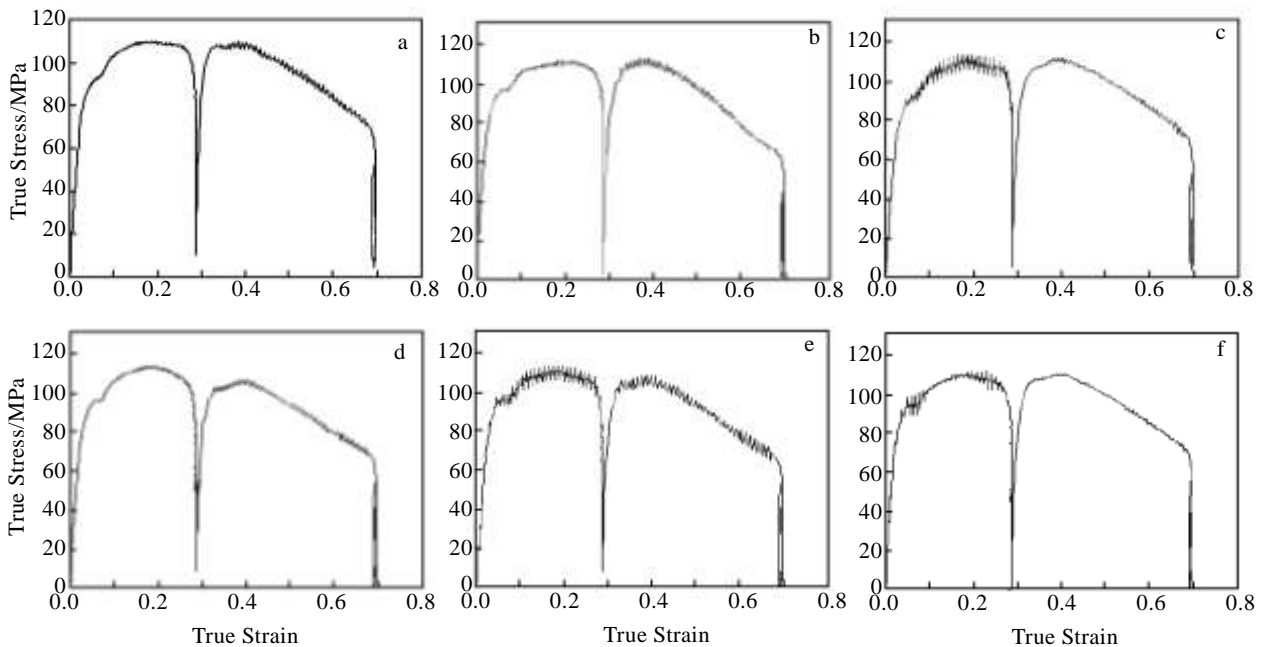


图 2 变形温度 350 °C、应变速率 0.5 s<sup>-1</sup>，不同道次间隔时间条件下的真应力-应变曲线

Fig.2 True stress-strain curves at the deformation temperature of 350 °C and strain rate of 0.5 s<sup>-1</sup> under different interval time:

(a) 15 s, (b) 30 s, (c) 60 s, (d) 120 s, (e) 180 s, and (f) 240 s

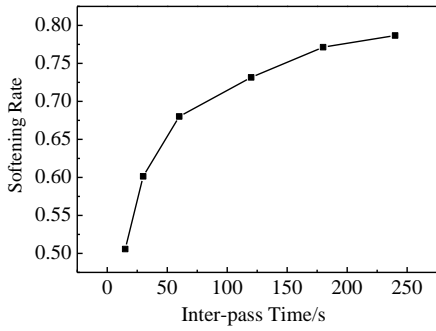


图 3 不同道次间隔时间下的软化率

Fig.3 Softening rate at different interval time

### 2.1.2 不同变形温度下的静态软化特性

应变速率为  $0.5\text{ s}^{-1}$ 、道次间隔时间为  $30\text{ s}$ ，不同变形温度下的真应力-应变曲线如图 4。按照式 (1) 计算不同温度下材料的软化率如图 5。第 2 道次应力相对第 1 道次均出现了不同程度的降低。由图 5 可以看出，随着变形温度的升高，AZ31B 镁合金材料道次间软化率呈上升趋势。这是由于随着温度的升高，材料内部原子活动能力增强，导致了再结晶驱动力的增加。综合晶界扩散和晶界迁移能力增加的作用有效缩短了形核孕育期过程，大大提高了再结晶速度，使得回复和再结晶等静态软化行为更易进行<sup>[16]</sup>。因此在较高温度下材料能够在较短的时间内得到足够高的软化率。

### 2.1.3 不同应变速率下的静态软化特性

变形温度为  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，道次间隔时间为  $30\text{ s}$ ，不同应变速率下的真应力-应变曲线如图 6。按照式 (1) 计算不同应变速率下材料的软化率如图 7。由图 7 可知，静态软化率随着首道次应变速率的增大而增大。

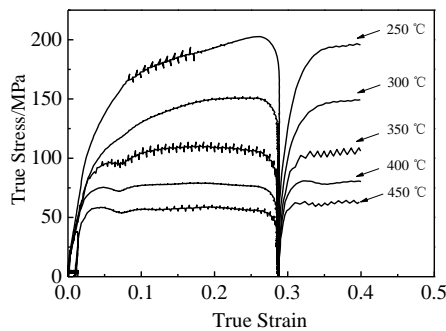


图 4 应变速率为  $0.5\text{ s}^{-1}$ 、道次间隔时间为  $30\text{ s}$ ，不同变形温度下的真应力-应变曲线

Fig.4 True stress-strain curves at the interval time of  $30\text{ s}$  and strain rate of  $0.5\text{ s}^{-1}$  at different deformation temperatures

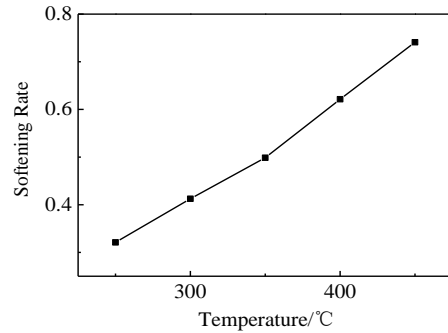


图 5 不同变形温度下的软化率

Fig.5 Softening rate at different deformation temperatures

这是由于第 1 道次应变速率越大，材料内部晶格扭曲和畸变越严重，储存的能量越多，越有利于道次间隔期间回复和再结晶的发生。另一方面，首道次应变速率越快，其变形需要的时间越短，动态再结晶作用越不充分，试样的形变储能便越大，当形变结束后回复仅释放其中的一部分储能，剩余的储能会促使形变组织的再结晶，导致宏观力学性能方面静态软化更容易发生。

### 2.2 静态软化率数学模型

多道次变形道次间隔之间的软化率  $S$  一般满足以下表达式<sup>[17]</sup>：

$$S = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{t_m}\right)^n\right) \tag{2}$$

式中， $S$  为软化率， $t$  为道次间隔时间， $t_m$  为时间常数。

考虑到变形温度和应变速率对时间常数的影响较大， $t_m$  满足的表达式为：

$$t_m = a\dot{\epsilon}^{-b} \exp\left(\frac{c}{T}\right) \tag{3}$$

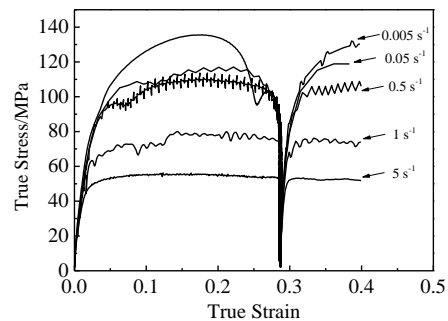


图 6 变形温度为  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、间隔时间为  $30\text{ s}$ ，不同应变速率下的真应力-应变曲线

Fig.6 True stress-strain curves at the interval time of 30 s and deformation temperature of 350 °C under different strain rates

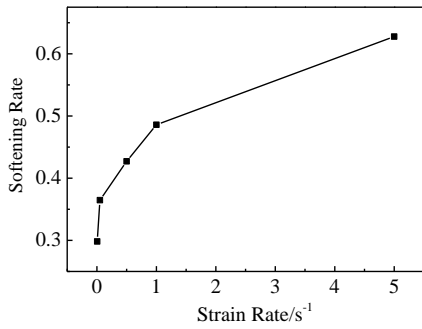


图 7 不同应变速率下的软化率

Fig.7 Softening rate under different strain rates

式中,  $\dot{\epsilon}$  为应变速率,  $T$  为变形温度,  $a, b, c$  为常数。

对相同温度, 相同应变速率, 不同道次间隔时间的软化率按照式 (2) 进行非线性拟合, 拟合图形如图 8 所示, 得到:

$$S = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{44.67786}\right)^{0.2798}\right) \quad (4)$$

可知温度为 350 °C, 应变速率为 0.5 s<sup>-1</sup> 时的时间常数  $t_m = 44.67786$ ,  $n = 0.2798$ 。

通过式 (4) 计算道次间隔时间为 30 s, 不同应变速率下的时间常数如表 2。

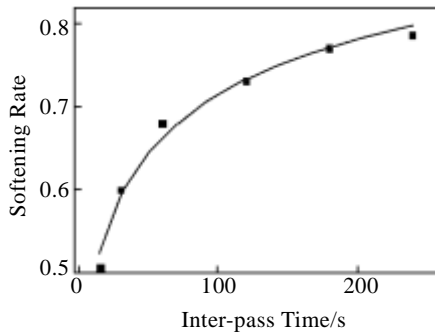


图 8 软化率与道次间隔时间的拟合曲线

Fig.8 Fitting curve of the softening rate with the interval time

表 2 道次间隔时间 30 s, 不同应变速率下的时间常数

Table 2 Time constant at the interval time of 30 s under different strain rates

Strain rate/s <sup>-1</sup>	Inter-pass time/s	Softening rate	Time constant
0.005	30	0.2982	1225.8886
0.05	30	0.3647	506.0692
0.5	30	0.4271	242.8691

1	30	0.4860	128.6092
5	30	0.6277	31.3128

对式 (3) 两边取对数:

$$\ln t_m = -b \ln \dot{\epsilon} + \frac{c}{T} + \ln a \quad (5)$$

可知,  $\ln t_m$  与  $\ln \dot{\epsilon}$  成线性关系, 对其按照式 (5) 进行线性拟合, 拟合图形如图 9 所示, 得到  $b = 0.4982$ 。

由式 (5) 可知,  $\ln t_m$  与  $1/T$  成线性关系, 对其数据按照式 (5) 进行线性拟合, 拟合曲线见图 10, 得到  $c = 2440.3550$ ,  $a = 0.1022$ 。

至此, 求出了 AZ31B 镁合金软化数学模型的全部参数:

$$n = 0.2798; a = 0.1022, b = 0.4982, c = 2440.3550$$

得到 AZ31B 镁合金道次间软化率数学模型:

$$S = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{t_m}\right)^{0.2798}\right) \quad (6)$$

$$t_m = 0.1022 \dot{\epsilon}^{-0.4982} \exp\left(\frac{2440.3550}{T}\right) \quad (7)$$

### 2.3 双道次残余应变率数学模型

在多道次热轧生产过程中, 经首道次变形后金属内部晶格畸变并不能被变形过程中金属内部的回复和再结晶等软化行为完全消除, 这部分应变残留将在道次间隔期间随着静态回复和再结晶等软化行为被逐渐

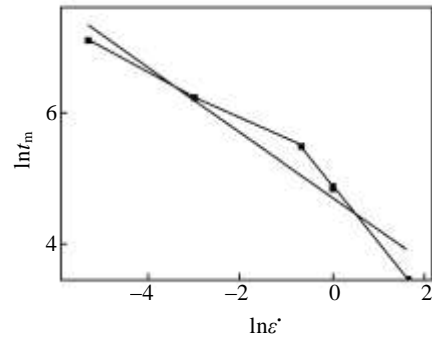


图 9  $\ln t_m - \ln \dot{\epsilon}$  拟合曲线

Fig.9 Fitting curve of  $\ln t_m$  and  $\ln \dot{\epsilon}$

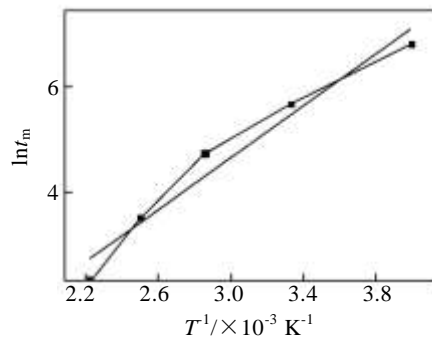


图 10  $\ln t_m - 1/T$  拟合曲线

Fig.10 Fitting curve of  $\ln t_m$  and  $1/T$

消除。而往往由于道次间隔时间所限，这一部分应变残留并未得到完全消除，将遗留到下一道次。根据残余应变产生的原因，提出残余应变率的计算方法如下：

$$\lambda = 1 - S \tag{8}$$

由此可得残余应变率数学模型为：

$$\lambda = \exp\left(-\left(\frac{t}{t_m}\right)^{0.2798}\right) \tag{9}$$

其中  $t_m$  可由式 (7) 求得。

### 2.4 实验数据及理论计算数据对比分析

不同变形条件下静态软化率的模型计算值与实验值对比如图 11。平均拟合相对误差为 12.58%，可见模型计算值与实验值较吻合，证明了所建立的静态软化率计算模型能够很好地表征 AZ31B 镁合金道次间软化规律。

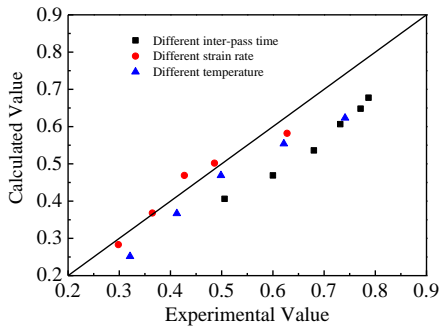


图 11 静态软化率预测值与实验值对比

Fig.11 Comparison between calculated and experimental values of the static softening rate

## 3 结 论

1) AZ31B 镁合金在热压缩道次间呈现明显的力学软化现象，道次间隔期间材料的静态软化率关于道次间隔时间、变形温度以及变形速率呈现很强的正相关性。

2) 建立的 AZ31B 镁合金道次间软化率计算模型能够很好地预测不同变形条件下材料的软化率，模型预测的平均相对误差为 12.58%。

3) 根据道次间隔期间上一道次的应变残留无法完全消除并遗留到下一道次的残余应变的实质，提出了 AZ31B 镁合金两道次轧制过程中残余应变率的计算公式。可为镁合金往复多道次轧制过程中变形抗力

的求解提供技术支持。

### 参考文献 References

[1] Zhang Yanshu(张艳姝). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology, 2005

[2] Jia Weitao(贾伟涛), Ma Lifeng(马立峰), Ma Ziyong(马自勇). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(1): 152

[3] Edalati K, Horita Z, Furuta T. *Materials Science and Engineering*[J], 2013, 559: 506

[4] Ma Lifeng(马立峰), Pang Zhining(庞志宁), Huang Qingxue(黄庆学) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(S1): 387

[5] Guo Qiang(郭强). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Changsha: Hunan University, 2007

[6] Zhu Songhe(朱松鹤), Dai Bing(戴兵), Zhang Mei(张梅). *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2010, 31(10): 53

[7] Hu Xianlei(胡贤磊), Zhao Zhongqiu(赵忠邱), Qiu Honglei(邱红雷). *Journal of Northeastern University*(东北大学学报)[J], 2005, 26(5): 456

[8] Yan L M, Shen J, Li J P *et al. Rare Metals*[J], 2013, 32(3): 241

[9] Aretxabala Z, Pereda B, López B. *Metallurgical and Materials Transactions*[J], 2014, 45(2): 934

[10] Liu Y G, Liu J, Li M Q. *Computational Materials Science*[J], 2014, 84(3): 115

[11] Jiang F, Zhang H, Li L. *Materials Science and Engineering* [J], 2012, 552(3): 269

[12] Yan Liangming, Shen Jian, Li Junpeng. *Rare Metals*[J], 2013, 32(3): 241

[13] Chen F, Cui Z. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*[J], 2012, 20(4): 45 008

[14] Zhao Meng(赵蒙), Li Ping(李萍), Xue Kemin(薛克敏). *Rare Metals and Cemented Carbides*(稀有金属与硬质合金) [J], 2013, 41(3): 32

[15] Fang Bin(方彬), Ji Zhen(纪箴), Tian Gaofeng(田高峰). *Chinese Journal of Engineering*(工程科学学报)[J], 2015, 37(3): 336

[16] Llanos L, Pereda B, Lopez B *et al. Materials Science and Engineering*[J], 2016, 651(10): 358

[17] Jiang Fulin(蒋福林), Zhang Hui(张辉), Meng Chunbiao(蒙春标). *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2011, 32(3): 52

## Static Softening and Residual Strain of Magnesium Alloy in the Two-Pass Thermal Deformation

Fan Qinhong, Ma Lifeng, Jiang Yaping, Jia Weitao

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

**Abstract:** Static softening behavior in the two-pass isothermal compression of AZ31B magnesium alloy was investigated at the deformation temperatures from 250 °C to 450 °C, strain rates from 0.005 s<sup>-1</sup> to 5 s<sup>-1</sup> and the inter-pass time from 15 s to 240 s after the first pass isothermal compression. A prediction model of softening rate was established. According to the essence of rolling residual strain, the calculation method of residual strain rate in multi pass rolling process was proposed. The results show that the static softening fraction increases with the increasing of deformation temperature, strain rate and the inter-pass time. The softening rate calculation model can be used to characterize the softening rule of AZ31B magnesium alloy, and the average relative error is 12.58%. The calculation model of residual strain rate can provide theoretical support for solving the deformation resistance of AZ31B magnesium alloy during multi pass deformation process.

**Key words:** interval time; softening rate; residual strain rate

---

Corresponding author: Ma Lifeng, Ph. D., 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