

# 脉冲电流下 AZ31 镁合金拉伸行为 及其显微组织演变

王 杰, 王 磊, 刘 杨, 安金岚, 宋 秀

(东北大学 材料各向异性与织构工程教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 为改善镁合金塑性变形能力, 在 AZ31 镁合金的拉伸变形中引入高密度脉冲电流, 研究了脉冲电流对合金拉伸行为及其显微组织的影响规律, 并探讨了其机理。结果表明, 与未加脉冲电流拉伸相比, 施加脉冲电流的 AZ31 镁合金的变形抗力显著降低, 并且随脉冲电流密度的增加, 其变形抗力下降的幅度增大。施加脉冲电流的合金在拉伸过程中发生了明显的动态再结晶, 再结晶晶粒细小均匀, 从而降低了合金的变形抗力。原因在于脉冲电流的纯电效应不仅能够降低塑性变形过程中位错运动阻力, 同时可以加快小角度亚晶向大角度亚晶转变, 促进了合金的动态再结晶, 提高了合金塑性变形能力。

**关键词:** 脉冲电流; AZ31 镁合金; 电效应; 动态再结晶

**中图分类号:** TG146.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2018)06-1906-05

镁合金具有密度低、比强度和比刚度高、电磁屏蔽能力较强以及易于再生利用等一系列独特的优点, 成为未来最具应用潜力的轻质材料之一。其结构件在汽车、飞机、计算机、通讯等领域获得了日益广泛的应用。然而, 由于镁合金具有密排六方(hcp)的金属结构, 在室温下塑性成形能力较差<sup>[1,2]</sup>。传统热加工工艺如拉拔、轧制等耗费时间、能量, 且对镁合金而言, 存在热加工困难、易产生裂纹等问题, 成材率较低, 这限制了镁合金的广泛应用。

相对于传统加工工艺, 电致塑性加工高效节能。诸多研究<sup>[3-6]</sup>结果表明, 脉冲电流作为一种瞬时输入的能量形式, 其产生的电致塑性效应 (electro-plastic effect) 能降低材料的变形抗力, 提高材料塑性变形能力, 从而受到广泛关注。以往的研究多集中于变形抗力下降的工艺研究, 而脉冲电流对镁合金塑性变形行为的微观作用机制还不甚清楚。基于此, 本工作在施加脉冲电流条件下对 AZ31 镁合金进行 180 °C 单向拉伸试验, 研究脉冲电流参数对合金拉伸性能、断口形貌以及显微组织的影响规律及作用机理, 以期揭示脉冲电流处理影响镁合金塑性变形行为的本质, 为电脉冲作用下镁合金的热加工应用提供理论依据。

研究用材料为厚度 2 mm 的轧制态 AZ31 镁合金薄板, 合金的化学成分(质量分数, %)为: Al 3.19, Mn 0.334, Zn 0.81, Fe 0.005, Si 0.02, Be 0.01, Cu 0.005, Mg 余量。试样尺寸根据 ASTM.E8M-2013a 金属拉伸试验标准设计。利用线切割将板材加工成如图 1 所示试样, 试样长度方向平行于轧向。

拉伸试验在 MTS 810 试验机上进行, 利用其辅助的加热系统进行温度补偿, 使试样温度维持在 180±0.5 °C。施加的脉冲电流由 HPC-5 脉冲电流发生器提供, 脉冲电流密度分别为 0, 1, 2, 3, 4 kA/mm<sup>2</sup>, 电流频率为 40 Hz, 脉宽为 30 s。利用 OLYMPUS GX71 型倒置式光学显微镜 (optical microscope, OM) 及 JSM-6510 型扫描电子显微镜观察合金变形前后的显微组织及断口形貌。利用 JEOL JSM-7001F 场发射扫描电子显微镜的电子背散射衍射 (EBSD) 分析系统对样品

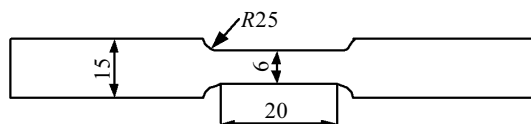


图 1 AZ31 镁合金拉伸试样尺寸示意图

Fig.1 Schematic illustration of specimen size of AZ31 magnesium alloy for tensile test

## 1 实 验

收稿日期: 2017-06-17

基金项目: 国家自然科学基金 (51371044)

作者简介: 王 杰, 女, 1992 年生, 硕士生, 东北大学材料各向异性与织构工程教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819, 电话: 024-83681685, Email:wangj0920@foxmail.com

进行 EBSD 分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 脉冲电流密度对合金拉伸变形行为的影响

不同脉冲电流密度下 AZ31 镁合金拉伸应力-应变曲线及相应的拉伸性能变化如图 2 所示。可以看出, 与相同温度下的常规拉伸试样 ( $0 \text{ kA/mm}^2$ ) 相比, 施加脉冲电流后, 合金在弹性变形阶段性能变化不大。合金的屈服强度有所下降, 塑性变形区域内的流变抗力显著降低, 加工硬化下降。随着脉冲电流密度的增加, 合金抗拉强度降低幅度增大。当电流密度为  $4 \text{ kA/mm}^2$  时, 抗拉强度下降幅度达 27.3%。1~3  $\text{kA/mm}^2$  脉冲电流处理后试样的断裂延伸率变化不显著, 当电流密度增至  $4 \text{ kA/mm}^2$  时, 断裂延伸率明显提高, 增幅为 7.6%。

### 2.2 脉冲电流密度对合金拉伸显微组织的影响

不同脉冲电流密度下 AZ31 镁合金拉伸断口附近显微组织如图 3 所示。由图可见, 常规拉伸试样的晶粒被明显拉长, 晶界弓出、粗化, 呈锯齿状, 这是镁合金动态再结晶发生前的一个典型特征。施加  $1 \text{ kA/mm}^2$  脉冲电流时, 细小的新晶粒围绕原始晶粒的锯齿状晶界环状分布, 形成了典型的“项链结构”, 合金发生了明显的动态再结晶。随电流密度增加, 动态再结晶进行愈趋充分。在电流密度增至  $4 \text{ kA/mm}^2$  时, 镁合金的动态再结晶全部完成, 形成了平均晶粒尺寸约为  $2 \mu\text{m}$  的细密组织结构, 并且部分再结晶晶粒发生长大。

### 2.3 脉冲电流密度对合金拉伸断口形貌的影响

不同脉冲电流密度下 AZ31 镁合金的拉伸断口 SEM 形貌如图 4 所示。常规拉伸和电脉冲拉伸断口均显示了以韧窝为主的微孔聚集型断裂特征。随脉冲电流密度增加, 韧窝变大、变深, 由等轴状变为椭圆形, 均匀程度逐渐降低。当电流密度增至  $4 \text{ kA/mm}^2$  时, 部分韧窝被明显拉长, 并且孔洞数目增多, 说明随电流密度

增加, 合金塑性变形能力提高。由 2.2 可知, 施加脉冲电流后, 合金发生了不同程度的动态再结晶, 原始组织与细小的新晶粒共存, 使得组织均匀性下降。但随着再结晶程度增加, 新晶粒增多, 组织被细化, 在一定程度上增强了合金的塑性变形能力。

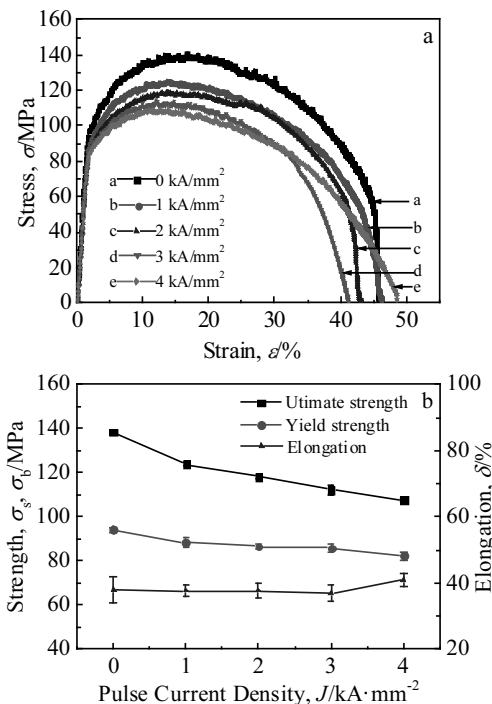


图2 不同脉冲电流密度下 AZ31 镁合金拉伸应力-应变曲线及相应的拉伸性能

Fig.2 Tensile stress-strain curves (a) and tensile properties (b) of AZ31 magnesium alloy at different pulse current densities

### 2.4 脉冲电流密度对 AZ31 镁合金拉伸变形行为的作用机理

不同变形量条件下脉冲电流密度对试样平行段显微组织的影响如图 5 所示。当拉伸变形量均为 5% 时,

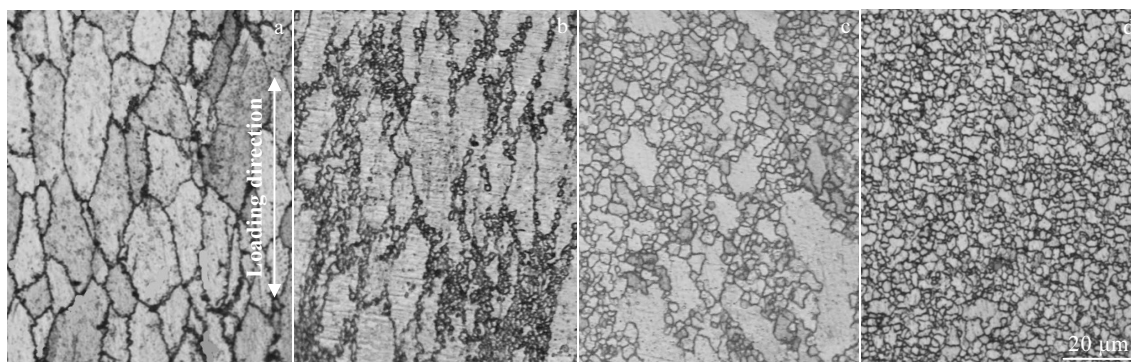


图3 不同脉冲电流密度下 AZ31 镁合金拉伸断口附近组织形貌

Fig.3 Optical microstructures near tensile fracture surface of AZ31 magnesium alloy at different pulse current densities: (a)  $0 \text{ kA/mm}^2$ , (b)  $1 \text{ kA/mm}^2$ , (c)  $3 \text{ kA/mm}^2$ , and (d)  $4 \text{ kA/mm}^2$

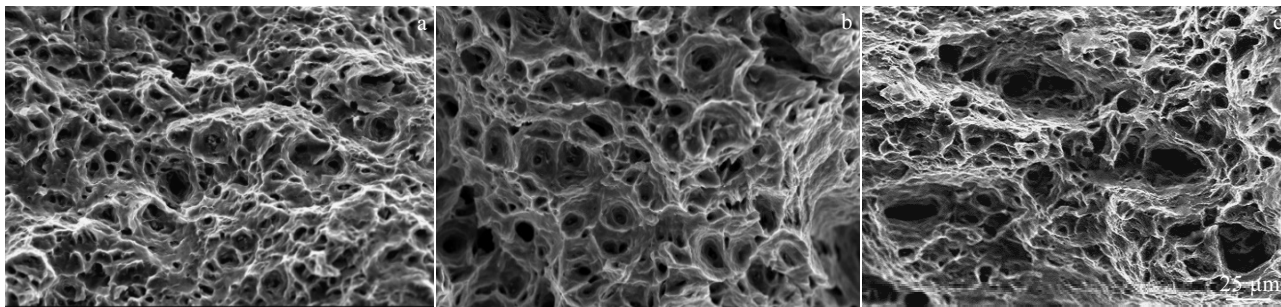


图 4 不同脉冲电流密度下 AZ31 镁合金拉伸断口 SEM 形貌

Fig.4 Fracture morphologies of AZ31 magnesium alloy after tensile test at different pulse current densities:

(a) 0 kA/mm<sup>2</sup>, (b) 2 kA/mm<sup>2</sup>, and (c) 4 kA/mm<sup>2</sup>

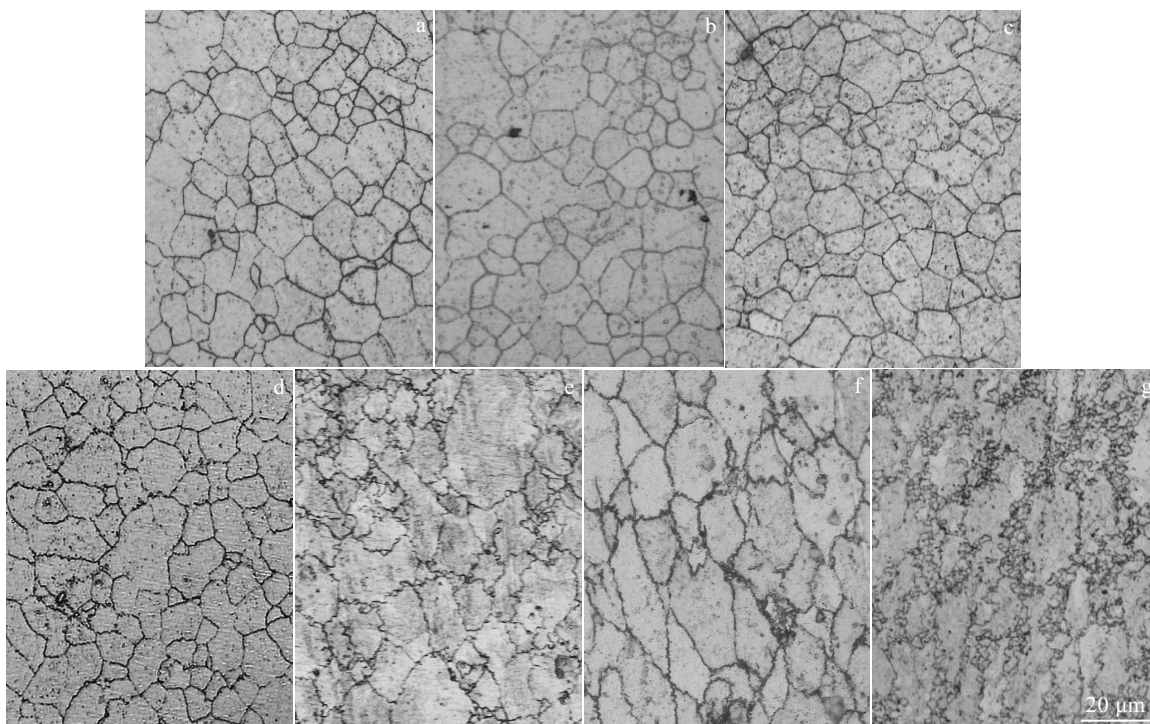


图 5 不同变形量下脉冲电流密度对 AZ31 镁合金拉伸显微组织的影响

Fig.5 Microstructures of tensile test of AZ31 magnesium alloy under different pulse current densities and deformation levels:

(a) 0 kA/mm<sup>2</sup>, 5%; (b) 1 kA/mm<sup>2</sup>, 5%; (c) 4 kA/mm<sup>2</sup>, 5%; (d) 2 kA/mm<sup>2</sup>, 13%; (e) 4 kA/mm<sup>2</sup>, 13%; (f) 2 kA/mm<sup>2</sup>, 30%; (g) 4 kA/mm<sup>2</sup>, 30%

不同脉冲电流密度下 (0、1、4 kA/mm<sup>2</sup>) 镁合金组织晶粒的尺寸、形貌等均无明显变化, 仍为原始晶粒 (分别对应于图 5a、5b、5c)。表明在此变形条件下施加脉冲电流的合金并没有出现明显的动态再结晶。图 6 为变形量 5% 时对应的拉伸应力-应变曲线。可以看出, 5% 变形量下, 合金的变形抗力仍随电流密度的增加大幅降低。由此说明, 5% 变形量条件下, 合金变形抗力的降低与动态再结晶无关, 而与纯电效应, 即脉冲电流对位错运动的促进作用有关<sup>[7]</sup>。金属塑性变形的微观机理表

明<sup>[8]</sup>, 晶体内部存在大量缺陷, 塑性变形的实质是位错的增值和运动。由经典“电子风力”的理论模型<sup>[9]</sup>可知, 单位长度位错受到的阻力相同时, 脉冲电流密度愈高, 电流对位错施加的电子风力愈大, 对位错运动的促进作用愈强; 同时, 位错为了摆脱钉扎作用, 需要具备大于位错与障碍结合能的能量。高密度脉冲电流的引入可使材料内部原子运动的能量升高, 改变位错的激活能, 使钉扎的影响降低, 促进位错开动, 从而提高金属塑性。

将 2、4 kA/mm<sup>2</sup> 脉冲电流处理下的试样分别拉伸

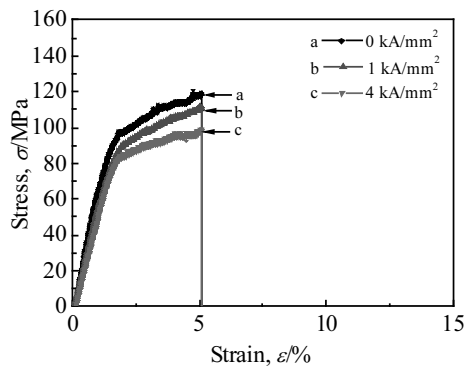


图6 不同脉冲电流密度下 AZ31 镁合金拉伸变形量为 5% 的应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of tensile test for 5% deformation for AZ31 magnesium alloy at different pulse current densities

变形至 13%、30%，进行显微组织形貌对比分析（见图 5d~5g）可知：当拉伸变形量为 13% 时，前者晶界轻微弓出（图 5d），后者晶界弓出现象明显（图 5e），可观察到少量再结晶晶粒。表明镁合金的拉伸过程中的动态再结晶以弓弯机制进行。变形量增至 30%，2 kA/mm<sup>2</sup> 脉冲电流处理下的粗化锯齿状晶界特征趋明显，原始晶粒变形程度增大（图 5f）。4 kA/mm<sup>2</sup> 条件下出现大量细小的再结晶晶粒，原始组织已经完全变形（图 5g）。这表明动态再结晶需要达到一定的变形量才能发生，脉冲电流能有效促进合金的动态再结晶。随电流密度的增加，合金动态再结晶程度愈大，其软化作用愈明显，从而导致合金的变形抗力下降。

图 7 为不同脉冲电流参数处理下 AZ31 镁合金的不同拉伸变形量样品取向差角分布图。可以看出，所有样品晶界取向差均集中在 2°~5°。其中拉伸变形量为 13%，2 kA/mm<sup>2</sup> 脉冲电流处理下（图 7a）还有少量

晶粒取向差在 80°~90°。此条件下，合金拉伸变形后的晶界轻微弓出，已经存在较多的小角度晶界（小于 15°），而仍有部分原始大角度晶界。施加 4 kA/mm<sup>2</sup> 脉冲电流后（图 7b），取向差为 2°~3° 的小角度晶界明显增多，且高角度峰消失，说明动态再结晶的发生使得大角度晶界明显减少。变形量增至 30% 时（图 7c），合金再结晶程度增大，取向差为 2° 的小角度晶界减少，取向差为 4°~15° 的小角度晶界所占比例增大，大角度晶界变化不明显。以上现象说明镁合金在电脉冲拉伸塑性变形过程中再结晶产生的晶界以 2°~3° 小角度晶界为主，随变形量的增大，新产生的小角度晶界逐渐向取向差较大的 4°~15° 小角度晶界转变，而增大脉冲电流密度将能促进这种晶界转变，从而促进了合金的动态再结晶。

研究表明<sup>[10]</sup>，金属材料的再结晶过程主要是通过位错的交滑移和攀移来实现的，这与材料内部原子的扩散息息相关。脉冲电流可通过热效应和非热效应的耦合，使得原子扩散速率大幅增加，从而促进位错交滑移和攀移进入亚晶界来加快镁合金的再结晶过程。该过程表示如下<sup>[11]</sup>：

$$J^T = J_t^T + J_a^T = \frac{\pi G b D_1}{(1-\nu) k T} + \frac{2 N D_1 Z^* e \rho f_m \tau_p}{\pi k T} \quad (1)$$

式中， $J^T$  表示脉冲电流下原子总通量； $J_t^T$  为脉冲电流的热效应产生的原子通量； $J_a^T$  表示脉冲电流非热效应产生的原子通量。 $G$  为剪切模量； $b$  为柏氏矢量； $\nu$  为泊松比； $N$  为原子密度； $Z^*$  表示有效镁离子的原子价； $e$  为电荷数； $\rho$  为电阻率； $k$  为玻尔兹曼常数； $T$  为绝对温度； $D_1$  为晶格扩散系数； $j_m$ 、 $f$  和  $\tau_p$  分别表示峰值电流密度，电流频率和电脉冲持续时间。

由式(1)可以看出，引入脉冲电流产生的非热效应能较大幅度提高原子通量，即促进材料内的原子扩散，

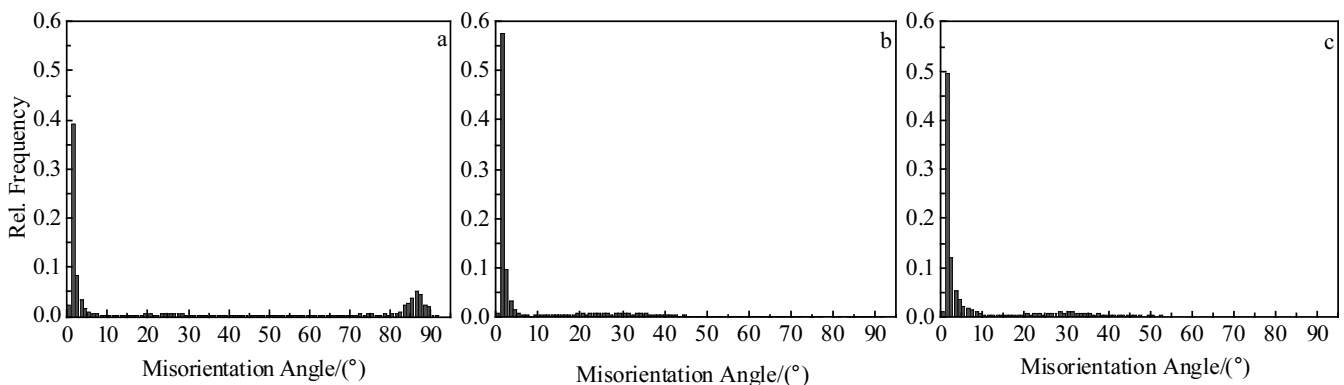


图7 脉冲电流处理下 AZ31 镁合金不同拉伸阶段取向差角分布图

Fig.7 Misorientation angle distribution of AZ31 magnesium alloy at different pulse current densities and tensile stages:

(a) 2 kA/mm<sup>2</sup>, 13%; (b) 4 kA/mm<sup>2</sup>, 13%; (c) 4 kA/mm<sup>2</sup>, 30%

从而诱发动态再结晶。当电流密度愈大时,原子通量增加幅度愈大。随着合金塑性变形的进行,位错在晶界处堆积产生小角度晶界,并在脉冲电流影响下快速发生攀移,加快了小角度亚晶向大角度亚晶转变过程。当尺寸达到再结晶临界值时就可作为核心形核,再结晶开始。脉冲电流处理能有效促进动态再结晶这一金属软化及晶粒细化机制,对控制镁合金组织,改善其塑性变形能力具有重要的意义。

### 3 结 论

1) 与未加脉冲电流拉伸相比,脉冲电流作用下 AZ31 镁合金拉伸变形抗力显著降低,下降幅度随脉冲电流密度的提高而增大。断裂延伸率只在较高电流参数下有明显提高,当电流密度增至  $4 \text{ kA/mm}^2$  时,断裂延伸率增幅为 7.6%。

2) 随脉冲电流密度增加, AZ31 镁合金动态再结晶进行程度愈加充分。脉冲电流产生的电效应能够加快小角度亚晶向大角度亚晶转变,从而促进镁合金的动态再结晶。动态再结晶的软化作用可在一定程度上降低合金的变形抗力,增加合金塑性变形能力。

#### 参考文献 References

[1] Liu Qing(刘 庆). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J],

2010, 46(11): 1458

[2] Wen Lihua(文丽华), Ji Zesheng(吉泽升), Ning Huiyan(宁慧燕) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(9): 2305

[3] Xu Q, Tang G Y. *Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528(13): 4431

[4] Zhu R F, Tang G Y, Shi S Q *et al. Materials and Design*[J], 2013, 44: 606

[5] Li X F, Wang S, Zhao S J *et al. Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2015, 24(12): 5065

[6] Cao F R, Xia F, Hou H L *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2015, 637: 89

[7] Liu Y, Wang L, Liu H H *et al. Materials Transactions*[J], 2012, 53(8): 1400

[8] Yu Kun(余 琨), Li Wenxian(黎文献), Wang Richu(王日初). *Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2005, 15(7): 1081

[9] Troitskii O A, Moiseenko M M. *Russian Metallurgy*[J], 1987, 11(25): 159

[10] Xu Q, Tang G Y, Jiang Y B *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528: 3249

[11] Jiang Y B, Guan L, Tang G Y *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528: 5627

## Tensile Deformation Behavior and Microstructure Evolution of AZ31 Magnesium Alloy Under Pulse Current

Wang Jie, Wang Lei, Liu Yang, An Jinlan, Song Xiu

(Key Laboratory for Anisotropy and Texture of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** In order to improve the plastic deformation ability of magnesium alloys, tensile tests with high density pulse current were performed on AZ31 magnesium alloy. The effect of pulse current on the microstructure and tensile deformation behavior of the alloy was investigated and the mechanism was also discussed. The results show that the deformation resistance of AZ31 magnesium alloy with pulse current is greatly reduced compared with that without pulse current, and the decreasing amplitude increases with the increase of current density. During the tensile test, dynamic recrystallization (DRX) occurs in the alloy with pulse current, which reduces the deformation resistance. The increase in the plastic deforming ability of the alloy is attributed to the electrical effect of the pulse current, which can reduce the dislocation movement resistance in the plastic deformation process and accelerate the transition of the grain boundary from a small angle to a large angle.

**Key words:** pulse current; AZ31 magnesium alloy; electrical effect; dynamic recrystallization

Corresponding author: Wang Lei, Professor, Key Laboratory for Anisotropy and Texture of Materials (Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang 110819, P. R. China, Tel: 0086-24-83681685, E-mail: wanglei@mail.neu.edu.cn