

Effect of Electric Current Parameters on the Microstructural Evolution in a AZ31B Magnesium Alloy

Xiyong Wu¹, Nan Wu², Xinli Wang^{3*}, Wenbin Dai⁴

¹Tianjin Dongyi Magnesium products, Co., Ltd., Tianjin

²Key Laboratory for Anisotropy and Texture of Materials (Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang Liaoning

³Research Institute, Northeastern University, Shenyang Liaoning

⁴School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang Liaoning

Email: *wangxl@mail.neu.edu.cn

Received: Feb. 15th, 2016; accepted: Mar. 7th, 2016; published: Mar. 10th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The effect of electric current parameters, including the pulsed voltage intensity and the electric pulse repeating times on the microstructural evolution of AZ31B magnesium alloy was investigated by optical microscope method. The results showed that the grains become coarser with increasing either the pulsed voltage intensity or the repeating times. In addition, the application of electric current was beneficial to the formation of tensile twins, which could be ascribed to the thermal compressive stress formed due to the nonsynchronous between the temperature increment and the thermal expansion inter the grains during current passing.

Keywords

Electric Current Pulses Treatment, AZ31B Magnesium Alloy, Microstructure

脉冲电流处理工艺参数对AZ31B镁合金的微观形貌的影响

吴稀勇¹, 吴楠², 王新丽^{3*}, 戴文斌⁴

*通行作者。

¹天津东义镁制品股份有限公司, 天津
²东北大学各向异性与织构重点实验室, 辽宁 沈阳
³东北大学研究院, 辽宁 沈阳
⁴东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳
Email: *wangxl@mail.neu.edu.cn

收稿日期: 2016年2月15日; 录用日期: 2016年3月7日; 发布日期: 2016年3月10日

摘要

通过改变脉冲电压强度和脉冲作用次数, 借助金相分析系统研究了脉冲电流处理工艺参数对AZ31B镁合金的微观形貌的演变规律。研究发现随着脉冲电压强度或脉冲作用次数的增加, 平均晶粒尺寸均会呈现长大趋势, 尤其电压强度的影响更明显。且脉冲电流处理后样品中生成大量的拉伸孪晶, 这主要是由于脉冲电流作用瞬间晶粒内部热膨胀和升温不同引起的热压应力所致。

关键词

脉冲电流处理, AZ31B镁合金, 微观形貌

1. 引言

从 20 世纪 40 年代开始, 变形镁合金已经开始应用于汽车、航空航天、国防军工等领域, 到 90 年代后期, 变形镁合金产品开始用于车辆、3C 产品以及其它民用产品领域。然而, 我国变形镁合金的研制和开发仍处于起步阶段, 尤其由于受其性能的影响[1], 商业化的变形镁合金产品很少。为了提高镁合金力学性能, 尽管通过固溶强化、时效强化、弥散强化、细化晶粒等方法得到改善, 其中整体效果最好的是细晶强化。因此, 研究镁合金塑性加工及晶粒细化工艺, 仍然是当今的热点课题之一。

电场、电流及磁场等外场处理手段作为一种新型的物理场[2]-[5], 能够通过影响物质中电子的运动而将能量作用到材料的原子尺度, 从而对材料的微观组织和性能产生显著影响。其中, 高密度脉冲电流处理由于其作用时间短、快速加热和快速冷却等优点, 近年来的研究发现, 利用脉冲电流处理方法制备出的样品致密、无污染和无缺陷, 尤其周亦青等人的研究结果提出 X60 低碳微合金钢经脉冲电流处理后, 样品晶粒细化, 其拉伸强度较电流处理前的样品提高 79%, 延伸率提高 13%, 硬度提高 82% [6] [7]。

因此, 本论文拟通过改变脉冲电压强度和脉冲电流作用次数, 系统研究高密度脉冲电流处理工艺参数对 AZ31B 镁合金的微观结构演变的影响规律, 并探讨相关机制, 以获得更加细小的再结晶晶粒, 从而提高镁合金的综合力学性能。

2. 实验过程

本实验采用热轧的 AZ31B 镁合金为研究对象。材料成分如表 1 所示。

实验首先将该板在 400℃退火保温 4 h, 空冷到室温。然后用电火花切割机切割成工字型试样, 有效部分的尺寸为: 4 mm 长, 3 mm 宽, 1 mm 厚。图 1 为脉冲电流设备示意图, 试样的两端部完全夹持在铜电极中, 当脉冲电流处理时, 两端部的温度升高非常小, 可以认为是室温。脉冲电流处理后试样均在空气中冷却, 但由于试样两个冷端的冷却作用, 试样有效部分的冷却速度将高于一般空冷的冷却速度。另外, 大的端部也便于夹持。从图可见试样两端部的尺寸不同于有效部分的尺寸, 前者远大于后者。这意

味着脉冲电流处理时，两端部的电流密度远低于有效部分的电流密度。脉冲电流的波形和基本参数由 TDS3012 型示波器测定，施加到试样上的脉冲电流波形图，其中 4.5 kv 的脉冲电流的放电周期 $t_p \approx 700 \mu s$ ，脉冲的持续时间约为 110 μs ；4.8 kv 的脉冲电流的放电周期 $t_p \approx 650 \mu s$ ，脉冲的持续时间约为 110 μs 。

3. 实验结果

借助光学显微镜观察分析了不同脉冲电流处理条件下的样品微观形貌，如图 2~6 所示(放大倍数均为

Table 1. Chemical composition of AZ31B magnesium alloy (mass%)

表 1. AZ31B 镁合金化学成分表(质量分数%)

Al	Zn	Mn
2.8-3.3	0.8-1.1	0.5

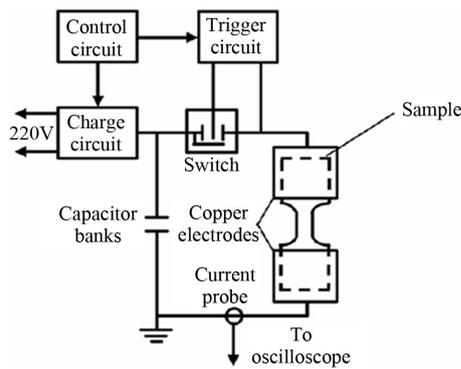


Figure 1. Schematic of ECP equipment

图 1. 脉冲电流设备示意图

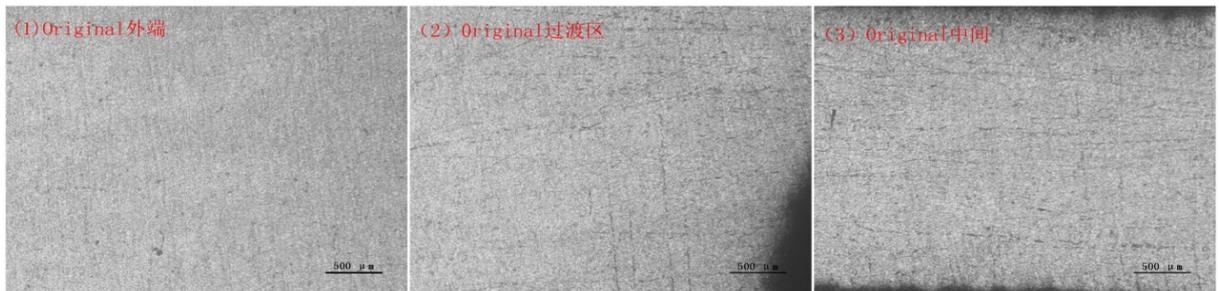


Figure 2. Optical microstructures of the original sample ($\times 25$)

图 2. 脉冲电流处理前样品的金相组织($\times 25$)

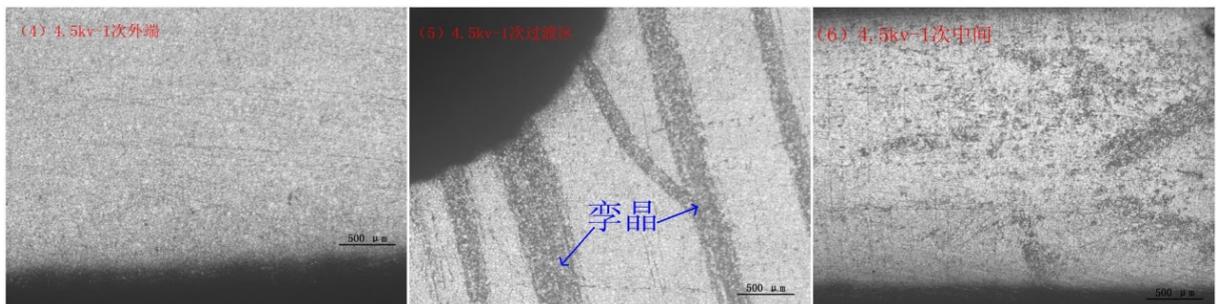


Figure 3. Optical microstructures of the samples treated by ECP at 4.5 kv with one time ($\times 25$)

图 3. 4.5 kv 作用一次后样品的金相组织($\times 25$)

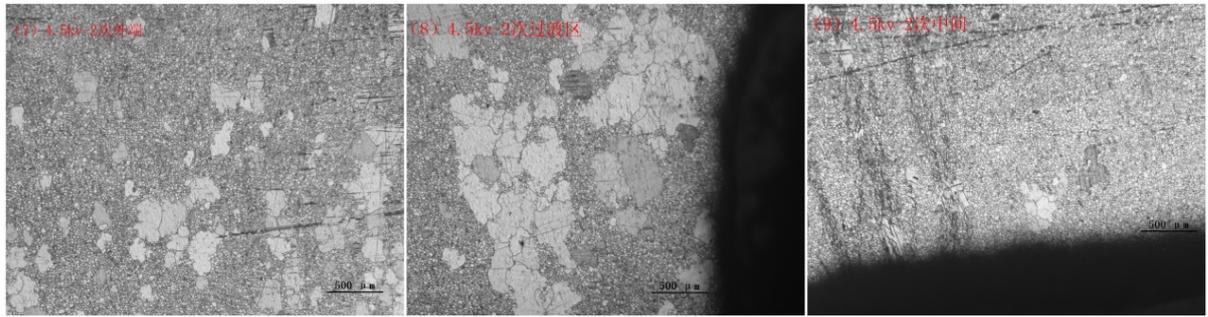


Figure 4. Optical microstructures of the samples treated by ECP at 4.5 kv with two times ($\times 25$)
图 4. 4.5 kv 作用两次后样品的金相组织($\times 25$)

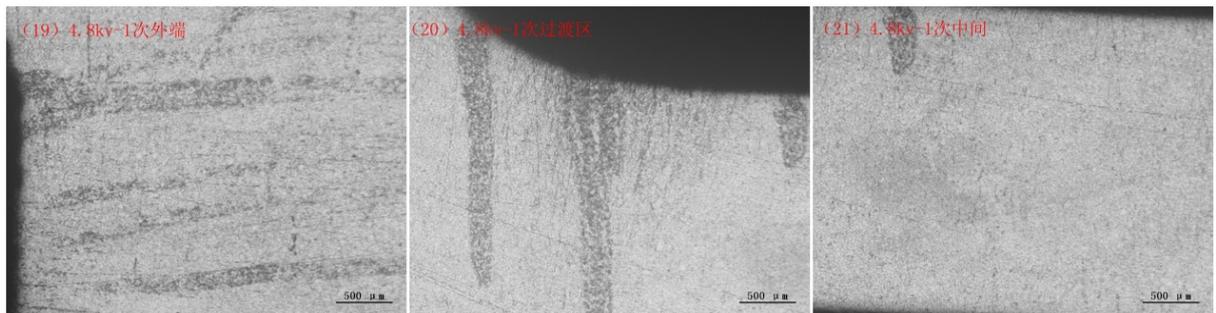


Figure 5. Optical microstructures of the samples treated by ECP at 4.8 kv with one time ($\times 25$)
图 5. 4.8 kv 作用一次后样品的金相组织($\times 25$)

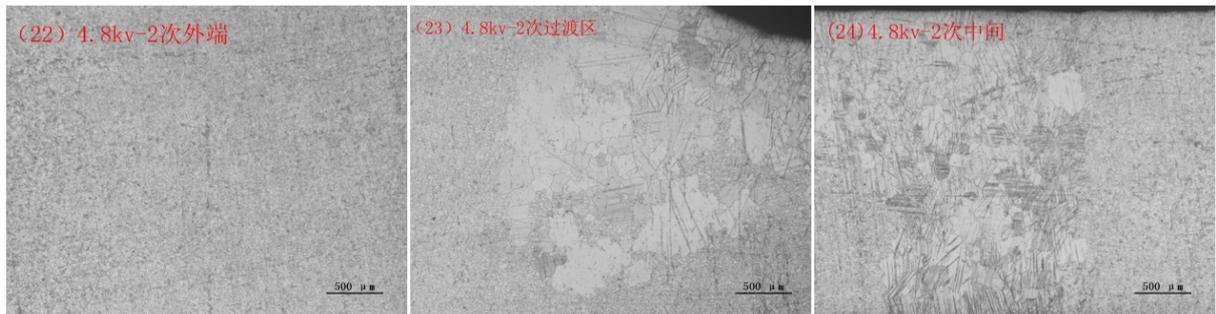


Figure 6. Optical microstructures of the samples treated by ECP at 4.8 kv with two times ($\times 25$)
图 6. 4.8 kv 作用两次后样品的金相组织($\times 25$)

25 倍)。其中图 2 为脉冲电流处理前样品不同区域的微观形貌，图 3、图 4 所示分别为 4.5 kV 脉冲电流处理作用一次、作用二次后样品微观形貌的演变。比较电压强度为 4.5 kv 时脉冲电流处理一次(图 3)与脉冲电流处理前(图 2)样品的晶粒尺寸变化，结果发现，脉冲电流处理前后晶粒尺寸没有明显变化，但是电流处理样品在过渡区出现大量孪晶。比较 4.5 kv 作用下电流处理两次(图 4)与处理一次(图 3)样品微观组织的演变，可以发现，电流处理两次的样品中孪晶量有所减少，但是试样外端和过渡区晶粒长大。

图 5、图 6 是 4.8 kv 作用下脉冲电流处理一次(图 5)与脉冲处理前(图 2)样品金相组织比较发现，只在样品外端和过渡区处出现了孪晶，中间无孪晶。而比较电流处理一次时，不通电流密度下图 5 和图 3 的微观组织，结果发现随着电流密度的增大，孪晶含量减少。在相同电压强度下，比较电流处理两次(图 6)与处理一次(图 5)后样品的微观形貌，观察发现，电流处理两次后，样品中间和过渡区处中晶粒明显长大，且大晶粒中存在大量孪晶。

4. 结果分析与讨论

比较相同电压强度处理条件下,不同电流处理次数对样品有效区微观形貌的影响可知,4.5 kv 下平均晶粒尺寸在电流作用两次时晶粒明显减小,但随着作用次数的增加,晶粒分布变得均匀,但晶粒尺寸没有明显变化。同理,4.8 kv 时,电流作用一次时平均晶粒尺寸减小,当作用次数增加后,晶粒明显长大。

比较不同电压强度对样品微观形貌的影响可知,电流强度增大,晶粒尺寸明显长大,且 4.8 kv 作用下长大的晶粒中观察到大量孪晶。

另外,金相形貌观察可知,电压强度为 4.5 kv 时,电流处理作用两次时长大的晶粒多出现在两端和过渡区,而 4.8 kv 下作用两次的大晶粒出现在中心有效区和过渡区,且后者的平均晶粒尺寸比前者大。

利用金相显微镜在 25 倍下观察电流处理前后微观结构的变化可知,脉冲电流处理前试样中没观察到孪晶,而经过脉冲电流处理的所有试样中都或多或少的出现了孪晶。这可能是由于,试样在被快速加热的条件下,其膨胀过程与温升过程不同步,表现为膨胀滞后于温升,即存在一个弛豫过程,也就是在脉冲电流通过瞬间,材料内部组织受到热压应力的作用。

图 7 是 Al 箔的动态热膨胀与温升曲线[8]。图中, $\Theta(t)$ 是任一时刻 t 的无因次温升, $\Theta(t) = \Delta T(t)/l(t)$, 其中 $\Delta T(t)$ 是瞬时的温度变化, ΔT_{\max} 是最大温度变化; $l(t) = \Delta L(t)/\Delta L_{\max}$, 其中 $\Delta L(t)$ 是瞬时长度变化, ΔL_{\max} 是最大长度变化。

$$\Delta L_{\max} = \alpha \Delta T_{\max} L_0 \quad (1)$$

其中 α 是样品的热膨胀系数, L_0 是试样的原始长度。

由式(1)推倒可知,热压应力为:

$$\sigma'_x(t) = -\sigma_x(t) = E\alpha\Delta T_{\max} [\Theta(t) - l(t)] \quad (2)$$

由式(2)可看出,当处在稳态膨胀时,温升过程与膨胀过程同步,此时 $\Theta(t) - l(t) = 0$, 试样内无应力存在。而快速加热时,由于膨胀过程与温升过程不同步,此时 $\Theta(t) - l(t) \neq 0$, 这样即便是在自由边界条件下也会在试样中产生瞬时热压应力,而且试样温升速度愈快,内部瞬态热压应力愈大。最大可能热压应力可由下式求得:

$$\sigma_{\max} = E\alpha\Delta T_{\max} \quad (3)$$

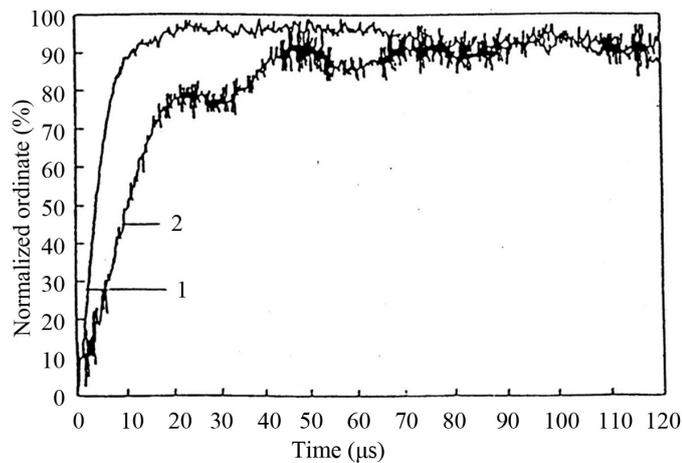


Figure 7. Plot of temperature rise and thermal expansion of Al film; 1: dimensionless temperature rise, 2: dimensionless thermal expansion [8]

图 7. Al 箔的动态热膨胀与温升曲线; 1: 无量纲温升, 2: 无量纲热膨胀[8]

众所周知, 镁合金中的拉伸孪晶在形变前期或较小的形变量下容易形成, 呈粗大的透镜状, 其界面易于滑移。当镁合金在脉冲电流作用下, 尤其脉冲电流作用次数增加的情况下, 材料内部组织连续承受由于热膨胀和升温不同不引起热压应力作用, 因此, 可能在材料内部再结晶过程中生成大量的拉伸孪晶。

5. 结论

(1) 相同电压强度条件下, 不同脉冲电流作用次数对微观形貌的影响研究表明, 随着脉冲电流作用次数的增加, 平均晶粒尺寸按照先减小后增大到最大值再减小的趋势变化。

(2) 不同电压强度条件下, 随着电压强度的增大, 晶粒尺寸明显增大。

(3) 脉冲电流处理后样品中生成大量的拉伸孪晶。这主要是由于脉冲电流作用瞬间晶粒内部热膨胀和升温不同引起的热压应力所致。

基金项目

国家自然科学基金(No. 50901018, No. 51304039)资助项目。

参考文献 (References)

- [1] Avedesian, M.M. and Baker, H., Eds. (1999) Magnesium and Magnesium Alloys, ASM Speciality Handbook. ASM International, Metals Park, OH.
- [2] Conrad, H., Guo, Z. and Sprecher, A.F. (1989) Effect of an Electric Field on the Recovery and Recrystallization of Al and Cu. *Scripta Metallurgica*, **23**, 821-824. [http://dx.doi.org/10.1016/0036-9748\(89\)90252-4](http://dx.doi.org/10.1016/0036-9748(89)90252-4)
- [3] Yang, D. and Conrad, H. (1997) Influence of an Electric Field on the Superplastic Deformation of 3Y-TZP. *Scripta Materialia*, **36**, 1431-1435. [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-6462\(97\)00045-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-6462(97)00045-6)
- [4] Lai, Z.H., Conrad, H., Chao, Y.S., Wang, S.Q. and Sun, J. (1989) Effect of Electropulsing on the Microstructure and Properties of Iron-Based Amorphous Alloys. *Scripta Metallurgica*, **23**, 305-310. [http://dx.doi.org/10.1016/0036-9748\(89\)90372-4](http://dx.doi.org/10.1016/0036-9748(89)90372-4)
- [5] Ohtsuka, H., Xu, Y., Sakka, Y. and Wada, H. (2000) Structural Control of Ceramics and Metals by High Magnetic Field. *The Ceramic Society of Japan*, **7**, 512-516.
- [6] Zhou, Y.Z., Zhang, W., Wang, B.Q., He, G.H. and Guo, J.D. (2002) Grain Refinement and Formation of Ultrafine-Grained Microstructure in a Low-Carbon Steel Under Electropulsing. *Journal of Materials Research*, **17**, 2105-2111. <http://dx.doi.org/10.1557/JMR.2002.0311>
- [7] Zhou, Y.Z., Zhang, W., Sui, M.L., Li, D.X., He, G.H. and Guo, J.D. (2002) Formation of a Nanostructure in a Low-Carbon Steel under High Current Density Electropulsing. *Journal of Materials Research*, **17**, 921-924. <http://dx.doi.org/10.1557/JMR.2002.0134>
- [8] Tang, D.W., Zhou, B.L., Cao, H. and He, G.H. (1993) Thermal Stress Relaxation Behavior in Thin Films under Transient Laser-Pulse Heating. *Journal of Applied Physics*, **73**, 3749-3752. <http://dx.doi.org/10.1063/1.352907>