

# 瞬时脉冲电流对冷轧 AZ31 镁合金组织与力学性能的影响

魏陈阳 周 全 陈乐平 李志伟 毛训聪  
(南昌航空大学航空制造工程学院)

**摘 要** 利用 OM、SEM 及拉伸试验机等手段,研究了不同的工艺和脉冲电流对多次道轧制 AZ31 镁合金板材显微组织及力学性能的影响。结果表明,工频、瞬时脉冲电流处理工艺可以促进 AZ31 镁合金的再结晶过程,替代再结晶退火过程,改善合金的抗拉强度和伸长率。在 50~200 A/mm<sup>2</sup> 范围内,随着电流密度增大,合金的再结晶晶粒数量逐渐增多,抗拉强度先增大后下降,当电流密度为 100 A/mm<sup>2</sup> 时抗拉强度最大,而其伸长率持续增加。当电流处理时间为 120~240 ms 或循环次数为 1~4 次,随着电流处理时间或电流循环次数的增加,再结晶晶粒数量逐渐增多,其抗拉强度不断降低,而伸长率不断提高。

**关键词** AZ31 镁合金;脉冲电流;再结晶;冷轧;力学性能

**中图分类号** TG146.22;TG335.1<sup>+</sup>2      **文献标志码** A

**DOI**:10.15980/j.tzzz.2022.10.020      **开放科学(资源服务)标识码(OSID):** 

## Effects of Instantaneous Pulse Current on Microstructure and Mechanical Properties of Cold Rolled AZ31 Magnesium Alloy

Wei Chenyang, Zhou Quan, Chen Leping, Li Zhiwei, Mao Xuncong  
(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University)

**Abstract:** Effects of different processes and pulse current on microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy plate rolled in multiple passes were investigated by OM, SEM and tensile testing machine. The results show that recrystallization of AZ31 alloy can be achieved by power frequency and instantaneous pulse current, which can replace recrystallization annealing process to adjust tensile strength and elongation of the alloy. In the range of 50~200 A/mm<sup>2</sup>, as the current density increases, the number of recrystallized grains in the alloy is increased gradually. Tensile strength of the alloy is increased at first and then decreased, where the maximum value can be obtained at 100 A/mm<sup>2</sup>, and elongation of the alloy is increased gradually. When the current processing time is 120~240 ms or the number of current cycles is 1~4 cycles, as the current processing time or the number of current cycles increases, the number of recrystallized grains in the alloy is increased gradually, resulting in decrease of tensile strength and increase of elongation.

**Key Words:** AZ31 Magnesium Alloy, Pulse Current, Recrystallization, Cold Rolled, Mechanical Properties

镁合金具有比强度高、比刚度好、比弹性模量高和阻尼性能好等特点,广泛应用于航空工业和汽车制造等领域<sup>[1,2]</sup>。变形镁合金具有更高的力学性能,能适应更复杂的工程结构需求,因此日益受到重视<sup>[3]</sup>。

显微组织控制对镁合金力学性能的改善起着重要的作用。脉冲电流处理具有加热速率快、处理时间短等特点,广泛用于镁合金的组织处理和性能改善,具有广阔的应用前景<sup>[4,5]</sup>。ZHAO G 等<sup>[6]</sup>研究了等径角挤压+轧制+脉冲电流处理相结合的工艺,在输出脉宽为 50 μs、电流强度为 4.55×10<sup>9</sup> A/m<sup>2</sup> 的脉冲电流处理 5

min 后, AZ31 镁合金的屈服强度和抗拉强度分别为 316 MPa 和 425 MPa,伸长率为 12.9%。李贝贝等<sup>[7]</sup>通过对轧制量为 20% 的 AZ31 镁合金板材进行电流强度为 4.16×10<sup>9</sup> A/m<sup>2</sup>、脉宽为 30 μs、频率为 100 Hz 的脉冲电流处理 10 min 后,合金的抗拉强度为 265 MPa,伸长率可达 19.7%。靳伟<sup>[8]</sup>用脉宽为 22 μs、电流强度为 4.5×10<sup>9</sup> A/m<sup>2</sup> 的脉冲电流处理轧制变形态 ZK60 合金,使变形组织在较短时间内发生完全再结晶,其抗拉强度可达 310 MPa,伸长率达 30.7%。曾勋等<sup>[9]</sup>采用频率为 100 Hz、峰值电流强度为 4.44×10<sup>9</sup> A/m<sup>2</sup> 的直流

收稿日期:2022-01-13;修改稿收到日期:2022-02-21  
基金项目:上海航天科技创新基金资助项目(SAST2019-130)  
第一作者简介:魏陈阳,男,1996 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:1398937802@qq.com  
通信作者:周全,男,1976 年出生,教授,南昌(330063),E-mail:lgclzq@sina.com  
引用格式:魏陈阳,周全,陈乐平,等. 瞬时脉冲电流对冷轧 AZ31 镁合金组织与力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(10):1 296-1 300.  
WEI C Y, ZHOU Q, CHEN L P, et al. Effects of instantaneous pulse current on microstructure and mechanical properties of cold rolled AZ31 magnesium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(10):1 296-1 300.

电脉冲对冷轧 ZK60 镁合金进行 30 min 处理,发现脉冲电流能提高位错移动能力,促进再结晶过程的进行,实现细晶强化,使其抗拉强度从 182 MPa 提高至 265 MPa,伸长率从 7.6% 提高到 18.1%。此外,脉冲电流对钢、铝、铜等材料的固态组织和力学性能也有改善作用<sup>[10~12]</sup>。高频、长时间脉冲电流作为变形镁合金晶粒细化的处理工艺研究较多,而对于工频、瞬时脉冲电流处理变形镁合金的研究报道较少。由于工频、瞬时脉冲电流易于操作和实现,处理时间短、效率高,故本课题以冷轧 AZ31 镁合金为对象,研究了工频、瞬时脉冲电流对合金组织及力学性能的影响,旨在为其应用提供参考。

1 试验材料及方法

试验材料为 2 mm 厚的 AZ31 镁合金板材,主要成分(质量分数)为 3.19% 的 Al、0.81% 的 Zn,余量为 Mg。先对 AZ31 镁合金进行均匀化退火,退火温度为 345 ℃,保温时间为 1 h,随炉冷却。将均匀化退火后的合金进行 5 道次轧制,单道次轧制变形量约为 5%,每次轧制之间进行 300 ℃×30 min 的中间退火。将轧制后的合金加工成 7 mm×85 mm×2.16 mm 的长条状试样,在电脉冲处理前,将试样表面进行打磨,去除表面氧化皮,以保证良好的导电性。研究不同的工艺和电流参数对 AZ31 镁合金组织和力学性能的影响,工艺参数见表 1。

表 1 试验工艺参数

Tab.1 Experimental process parameters

| 序号 | 状态    | 电流时间/ms | 电流密度/(A·mm <sup>-2</sup> ) | 循环次数 | 变形量/% |
|----|-------|---------|----------------------------|------|-------|
| 1  | 原始态   | 0       | 0                          | 0    | 0     |
| 2  | 退火态   | 0       | 0                          | 0    | 0     |
| 3  | 变形态   | 0       | 0                          | 0    | 20    |
| 4  | 变形+退火 | 0       | 0                          | 0    | 20    |
| 5  | 处理态   | 240     | 50                         | 1    | 20    |
| 6  | 处理态   | 240     | 100                        | 1    | 20    |
| 7  | 处理态   | 240     | 150                        | 1    | 20    |
| 8  | 处理态   | 240     | 200                        | 1    | 20    |
| 9  | 处理态   | 120     | 200                        | 1    | 20    |
| 10 | 处理态   | 160     | 200                        | 1    | 20    |
| 11 | 处理态   | 200     | 200                        | 1    | 20    |
| 12 | 处理态   | 240     | 100                        | 2    | 20    |
| 13 | 处理态   | 240     | 100                        | 3    | 20    |
| 14 | 处理态   | 240     | 100                        | 4    | 20    |

脉冲电流处理装置见图 1。该装置主要由调压器、时间控制开关、变压器、铜电极和试样组成。调压器的电压范围为 0~300 V,可以通过调节电压来改变通过试样的脉冲电流大小。时控开关由时间控制器和固态继电器组成,用于调节电流的通断时间。时间控制器频

率的可调范围为 1 Hz~150 kHz,占空比可调范围为 0~100%。变压器的输入电压为 220 V,输出电压为 5 V,功率为 5 kW。铜电极材质为镀银纯铜电极。试验时,将试样夹在两个铜电极之间。

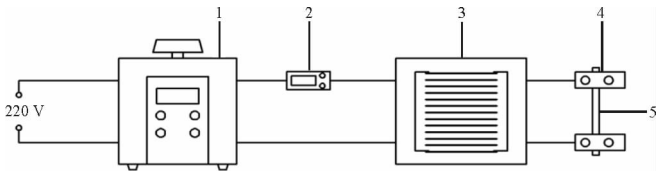


图 1 脉冲电流处理装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of pulse current processing device

1.调压器 2.时控开关 3.变压器 4.铜电极 5.试样

电流处理后,对试样分别进行组织表征与性能测试。利用 XJP-6A 金相显微镜观察合金的金相组织,FEI-Quanta200 型扫描电镜(SEM)观察合金的第二相和断口形貌;所用的腐蚀剂为 2% 的草酸+2% 的硝酸水溶液。力学性能测试在 WDW-50 微机控制电子万能试验机上完成,拉伸试样尺寸见图 2。

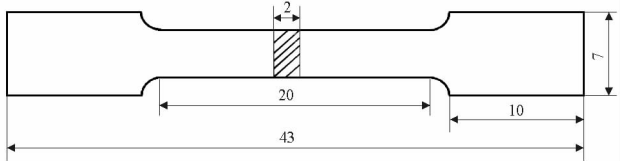


图 2 拉伸试样尺寸示意图

Fig.2 Dimensional drawing of tensile sample

2 试验结果与分析

2.1 微观组织

图 3 为不同工艺处理后 AZ31 镁合金的显微组织。可以看出,原始态试样的微观组织为细小的等轴晶,见图 3a;试样经过均匀化退火处理后,部分等轴晶晶粒周围出现了细小的再晶晶粒,见图 3b;经过 5 道次轧制处理后,晶粒被拉长,可以观察到大量细线状孪晶、少量呈现透镜状孪晶以及剪切带,见图 3c;变形+退火处理后,试样的微观组织中仍然存在少量变形晶粒、孪晶和剪切带,但再结晶体积分数明显增加,孪晶和再晶晶粒分布不均匀,在形变晶粒周围产生了更多细小的再晶晶粒,见图 3d。

图 4 为电流处理前后 AZ31 镁合金第二相的形貌。可以看出,未处理和电流处理后试样组织中均存在少量第二相,经过电流处理后,第二相大小、形态、分布及数量无明显变化,即脉冲电流没有造成明显的第二相溶解与析出。由此可以判断,对该合金而言,第二相对该合金力学性能无明显影响,合金的力学性能主要受晶粒大小和形貌变化的影响。

图 5 为轧制后 AZ31 镁合金经不同强度电流处理

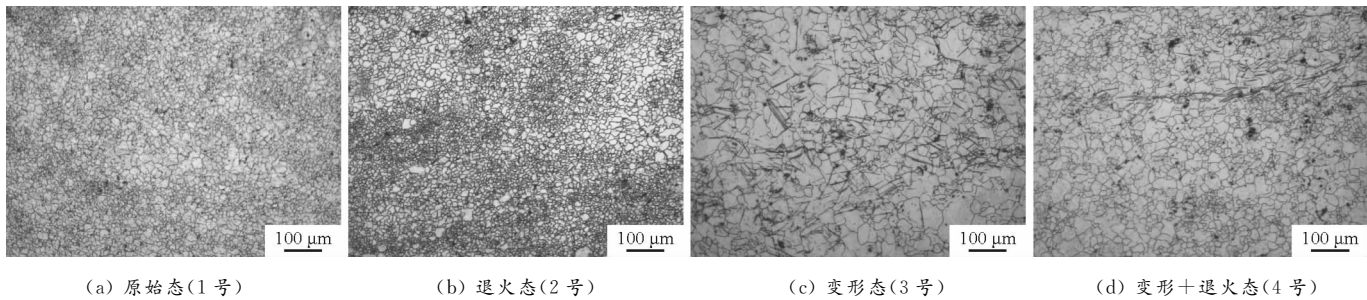


图 3 不同工艺下 AZ31 镁合金的显微组织

Fig.3 Microstructure of AZ31 magnesium alloy under different processes

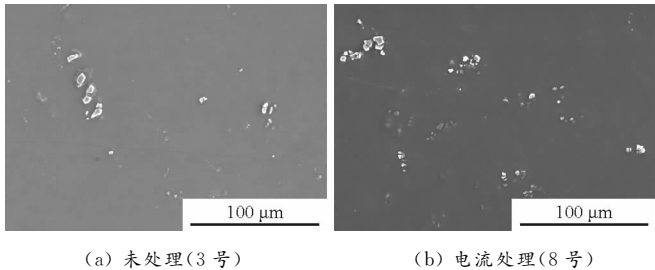


图 4 电流处理前后 AZ31 镁合金的第二相

Fig.4 Second phase in AZ31 magnesium alloy before and after electric current treatment

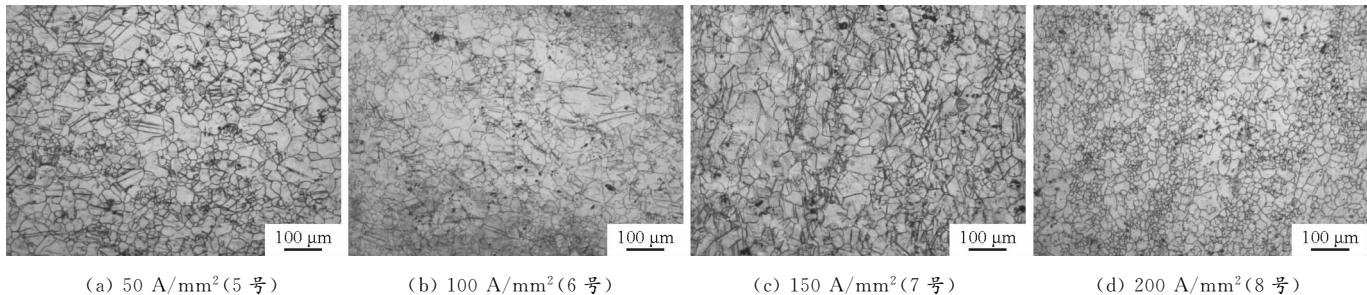


图 5 不同电流密度下 AZ31 镁合金的显微组织

Fig.5 Microstructure of AZ31 magnesium alloy under different current intensities

的数量明显增多且呈现带状分布，见图 5d。

图 6 为轧制后 AZ31 镁合金经过不同时间脉冲电流处理的显微组织。可以看出，当电流处理时间为 120

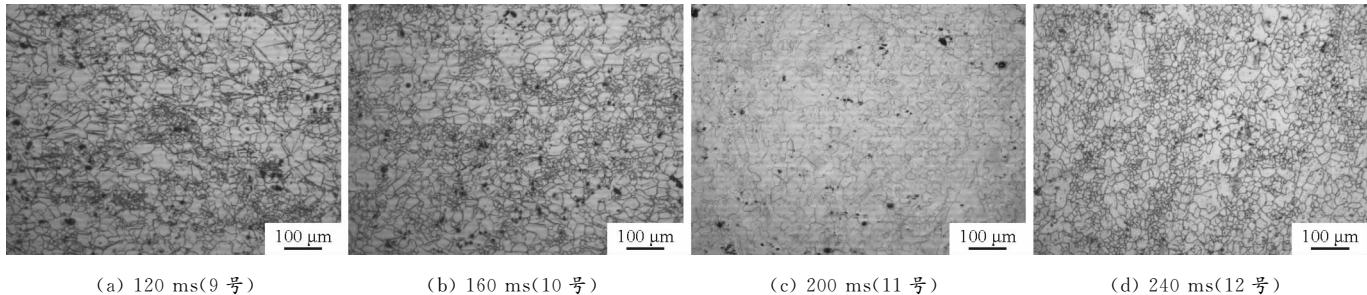


图 6 不同处理时间下 AZ31 镁合金的显微组织

Fig.6 Microstructure of AZ31 magnesium alloy under different treatment time

结晶晶粒呈现带状分布，变形组织逐渐消失。

图 7 为轧制后 AZ31 镁合金经不同循环次数脉冲电流处理后的显微组织。可以看出，在不同循环次数下，合金中均存在变形特征。当脉冲电流循环次数为 1 时，试样的金相组织并没有发生明显变化，合金中保留

后的金相显微组织。可以看出，当电流强度为 50 A/mm<sup>2</sup>时，合金的组织与变形态的组织相比没有明显的变化，仍存在大量细线状孪晶，少量呈现透镜状孪晶、再结晶和剪切带，见图 5a；当电流强度为 100 A/mm<sup>2</sup>时，合金的显微组织内出现了一些细小的再结晶组织，但组织仍以变形组织为主，见图 5b；当电流密度增大至 150 A/mm<sup>2</sup>时，更多的变形晶粒周围出现了细小的再结晶晶粒，但仍然存在部分变形组织，见图 5c；当电流密度为 200 A/mm<sup>2</sup>时，几乎观察不到孪晶，再结晶晶粒

ms 时，合金仍然保留了大量变形组织，在局部区域出现了再结晶晶粒；当电流处理时间大于 160 ms 时，随着电流处理时间增加，变形组织逐渐被再结晶晶粒取代，再

了大量的变形晶粒、孪晶、剪切带和少量的再结晶组织；当循环次数大于 2 次时，随着电流循环次数增加，合金的再结晶程度逐渐提高，变形组织周围开始出现了更多的再结晶晶粒，但仍然存在少量剪切带、变形晶粒和孪晶，合金的平均晶粒尺寸有所减小。

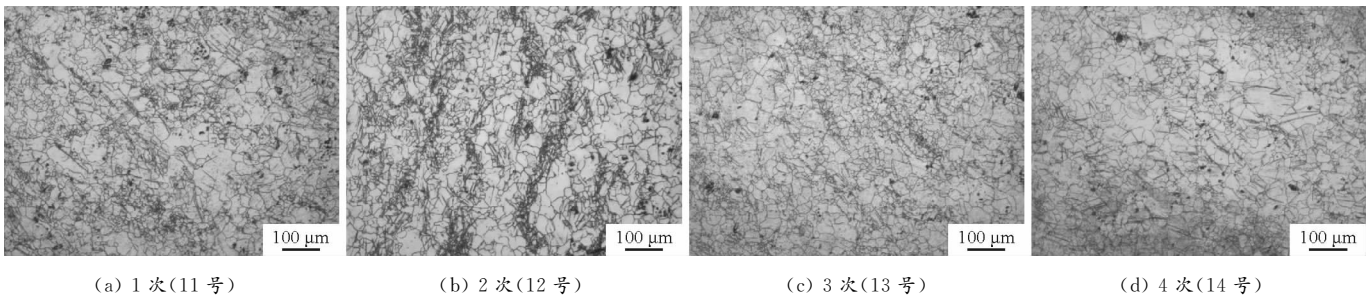


图 7 不同循环次数下 AZ31 镁合金的显微组织

Fig.7 Microstructure of AZ31 magnesium alloy under different cycles

2.2 力学性能

图 8 为经不同的工艺、电流强度、处理时间和电流循环次数下 AZ31 镁合金的力学性能。从图 8a 中可以看出,原始态 AZ31 镁合金板材的抗拉强度为 256 MPa,伸长率为 11.3%;经过均匀化退火处理后,其抗拉强度下降至 240 MPa,而伸长率上升至 12.0%;经过轧制变形后,合金的抗拉强度提高至 266 MPa,而伸长率下降至 3.8%;变形+退火处理后,抗拉强度下降至 242 MPa,但伸长率上升至 14.1%。从图 8b 可以看出,经过

50 A/mm<sup>2</sup> 的脉冲电流处理后,抗拉强度和伸长率与变形态相当;当电流强度为 100 A/mm<sup>2</sup> 时,合金的抗拉强度和伸长率比变形态略高;而将电流强度提高到 150 A/mm<sup>2</sup> 和 200 A/mm<sup>2</sup> 时,抗拉强度降低,但伸长率则提高。从图 8c 可以看出,在 120~240 ms 范围内,随着电流处理时间增加,抗拉强度逐渐下降,而其伸长率逐渐提高。从图 8d 可以看出,在循环 1~4 次范围内,随着电流循环次数增加,抗拉强度逐渐下降,而其伸长率总体上逐渐提高。

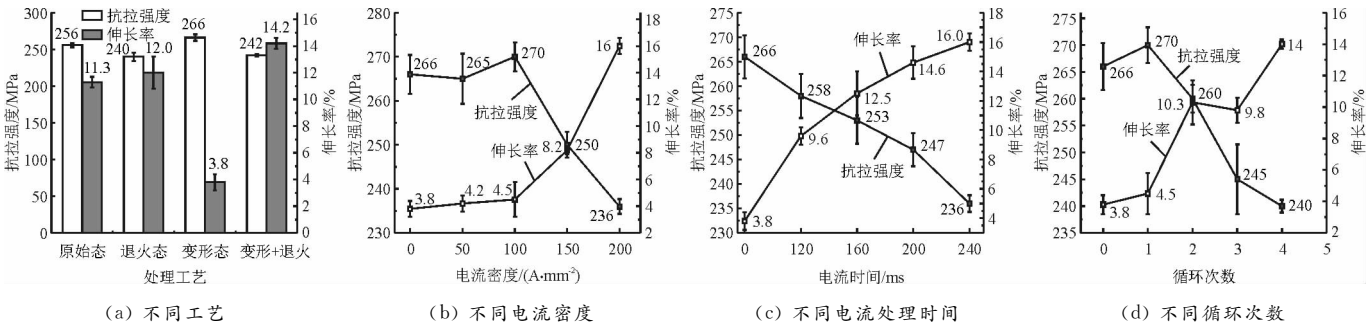


图 8 不同工艺、电流密度、电流处理时间和循环次数下 AZ31 镁合金的力学性能

Fig.8 Mechanical properties of AZ31 magnesium alloy under different processes, current intensities, current treatment times and cycles

图 9 为不同条件下 AZ31 镁合金试样的拉伸断口形貌。可以看出,4 组试样的拉伸断口中都能观察到解理面、韧窝和撕裂棱。变形态 AZ31 镁合金拉伸断口形貌中,存在明显的解理面、解理台阶和少量较浅的韧窝;合金经过退火后,与变形态相比,撕裂棱增多,解理面和

解理台阶减少,韧窝增多;经过电流处理时间为 240 ms、电流强度为 100 A/mm<sup>2</sup>、循环次数为 1 次的脉冲电流处理后,其断口呈现出明显的解理平面,形貌与变形态接近;经过电流处理时间为 240 ms、电流强度为 200 A/mm<sup>2</sup>、循环次数为 1 次的脉冲电流处理后,断口

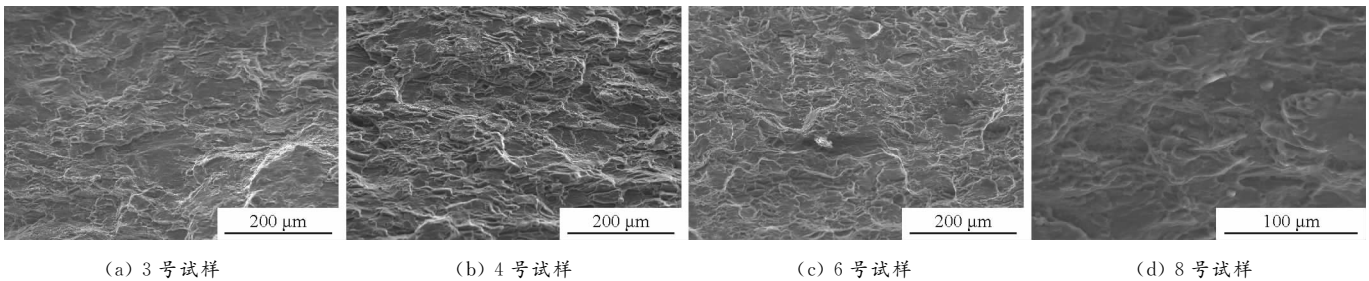


图 9 不同处理条件下试样的断口形貌

Fig.9 Fracture morphologies of the sample under different treatment conditions

中韧窝和撕裂棱的数目明显增多,同时出现了细小的韧窝,这与其在脉冲电流处理时产生的细小再结晶晶粒有关。

2.3 分析与讨论

AZ31 镁合金组织为大量细小的等轴晶粒,经过均匀化退火后,发生了再结晶,同时,部分晶粒长大,因此

合金的抗拉强度下降,伸长率提高。经过 5 道次轧制处理后,由于每道次轧制之间的退火处理,晶粒被拉长,平均晶粒尺寸增大,组织中形成了大量的变形组织,使合金获得了形变强化,因此合金的抗拉强度提高,而伸长率下降。变形+退火处理后,发生了再结晶,变形组织明显减少,形变强化作用消失,组织中的应力减弱,因此合金的抗拉强度相比变形态合金减小,而伸长率提高。

在进行脉冲电流处理时,试样的温度升高主要来自于脉冲电流的焦耳热效应。脉冲电流处理试样过程中,脉冲电流通过试样,使试样提升的温度  $\Delta T$ , 计算如下<sup>[13]</sup>:

$$\Delta T = \rho j^2 t (c_p \cdot d)^{-1}$$

式中,  $j$  为脉冲电流强度,  $A/m^2$ ;  $t$  为脉冲电流持续时间,  $s$ ;  $\rho$  为试样的电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $C_p$  为试样的比热容,  $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ;  $d$  为试样的密度,  $kg/m^3$ 。

由此可知,脉冲电流强度和电流持续时间越大,其产生的焦耳热效应越大。由于脉冲电流作用时间短、能量高,合金试样快速升温,同时伴随着大量的电子运动,降低了原子扩散所需要的能量而使得原子扩散的速率增大,从而使合金试样获得再结晶所需要的原子扩散通量,促进了合金的再结晶。

此外,研究表明,脉冲电流还会使合金的晶界迁移速率增加,获得额外的再结晶形核自由能,也会导致合金再结晶形核率提高,促进合金的再结晶<sup>[14]</sup>。合金的晶界迁移速率和获得的额外再结晶形核自由能均与脉冲电流密度成正比<sup>[15]</sup>。

综上所述,随着脉冲电流强度逐渐增加,脉冲电流产生的焦耳热效应逐渐增强,合金晶界迁移速率和获得的额外再结晶形核自由能逐渐提高,合金的再结晶形核率逐渐提高,使再结晶程度逐渐提升,形变强化作用逐渐减弱,因此,合金的抗拉强度总体上逐渐减小,伸长率逐渐升高。

当电流处理时间为 120 ms 时,由于单个脉冲区间内峰值电流通过的时间较短,脉冲电流所输出的能量不足以诱发轧制态 AZ31 镁合金的完全再结晶,组织中仍存在大量的变形晶粒和孪晶,再结晶程度不高,仅有局部区域发生再结晶,因此合金的抗拉强度有所下降;在 160~240 ms 范围内,随着电流处理时间增大,合金中积累的热效应增大,使合金晶界迁移速率和获得的额外再结晶形核自由能逐渐增加,因此合金变形组织逐渐消失,形变强化减弱,再结晶程度进一步提升,再结晶晶粒的数量逐渐增多,合金的抗拉强度逐渐下降,而伸长率逐渐提高。

经过循环次数为 1~4 次的脉冲电流处理后,由于此时的脉冲电流密度为  $100 A/mm^2$ ,脉冲电流提供的能量不足以让合金发生完全再结晶,4 组合金组织中都

保留了大量的变形组织。随着电流循环次数增加,合金中的变形组织逐渐减少,再结晶晶粒的数量逐渐增多,因此合金的抗拉强度逐渐下降,而伸长率逐渐提高。

### 3 结 论

(1)工频、瞬时脉冲电流处理工艺可以实现 AZ31 镁合金的再结晶,替代再结晶退火过程,调节其抗拉强度和伸长率。

(2)在  $50 \sim 200 A/mm^2$  范围内,随着电流密度增大,AZ31 镁合金的再结晶晶粒数量逐渐增多;其抗拉强度先增大后下降,转折点为  $100 A/mm^2$ ,而伸长率逐渐增大。

(3)当电流处理时间在 120~240 ms 范围内或循环次数在 1~4 次范围内,随着电流处理时间或电流循环次数增加,AZ31 镁合金的再结晶晶粒数量逐渐增多,其抗拉强度不断减小,而伸长率不断提高。

### 参 考 文 献

- [1] 陈怡,邹文兵,郭龙涛,等. 铸造镁合金的焊接修复技术研究现状及发展方向[J]. 材料导报, 2020, 34(15): 6-10.
- [2] 黄海军,韩秋华. 镁及镁合金的特性与应用[J]. 热处理技术与装备, 2010, 31(3): 4-9.
- [3] 任伟杰,林金保. 大塑性变形技术在工业领域的应用研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29(7): 89-94.
- [4] 耿玉波,匡杰,唐国翌,等. 高能脉冲电流在 AZ31 镁合金轧制中的应用研究[J]. 热加工工艺, 2017(3): 5-10.
- [5] KUANG J, DU X P, LI X H, et al. A thermal influence of pulsed electric current on the twinning behavior of Mg-Al-Zn alloy during rolling[J]. Scripta Materialia, 2015, 14: 151-155.
- [6] ZHAO G, FAN J, ZHANG H, et al. Exceptional mechanical properties of ultra-fine grain AZ31 alloy by the combined processing of ECAP, rolling and EPT[J]. Materials Science and Engineering, 2018, A731(25): 54-60.
- [7] 李贝贝,樊建锋,曾勋,等. 经电脉冲处理的轧制 AZ31 镁合金组织与性能演变[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(9): 2 695-2 701.
- [8] 靳伟. 脉冲电流对 ZK60 镁合金组织影响及力学性能研究[D]. 太原:太原理工大学, 2015.
- [9] 曾勋,樊建锋,李贝贝,等. 电脉冲对冷轧 ZK60 镁合金组织及性能的影响[J]. 太原理工大学学报, 2016, 47(4): 6-10.
- [10] 王思淇,顾邦平,胡雄,等. 高能量密度脉冲电流消减淬火 Cr12MoV 钢残余应力研究[J]. 机械强度, 2020, 42(6): 5-10.
- [11] 张宁,刘茂林,王新丽,等. 应变速率和电流处理对铜及铜合金电致塑性效应的影响[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(4): 79-84.
- [12] 徐晓峰. Al-Cu-Mg-(Ag)/Al-Zn-Mg-Cu-(Ag)合金的组织演变及强化研究[D]. 长春:吉林大学, 2015.
- [13] 吕端剑. 金属材料电脉冲处理工艺的实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2011.
- [14] ZHOU Y, ZHANG W, WANG B, et al. Grain refinement and formation of ultrafine-grained microstructure in a low-carbon steel under electropulsing[J]. Journal of Materials Research, 2002, 17(8): 2 105-2 111.
- [15] GUAN L, TANG G, JIANG Y, et al. Texture evolution in cold-rolled AZ31 magnesium alloy during electropulsing treatment[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2009, 487(1-2): 309-313.

(编辑:张正贺)