

脉冲电流强化对冷轧 AZ31 镁合金的组织与性能的影响

魏陈阳 周 全 陈乐平 李志伟
(南昌航空大学航空制造工程学院)

摘 要 利用 OM、SEM、TEM 及拉伸试验机等测试手段,进行了脉冲电流强化冷轧 AZ31 镁合金的研究,考察了脉冲电流密度、处理时间以及循环次数对 AZ31 镁合金组织和力学性能的影响。结果表明,工频、瞬时交流脉冲电流可以实现冷轧 AZ31 镁合金的强化。在 75~150 A/mm² 范围内,随着电流密度增大,合金的抗拉强度先增大后减小,而其伸长率逐渐增大;当电流密度为 125 A/mm² 时,合金的抗拉强度达到 293 MPa,伸长率为 5.5%;与冷轧态合金相比,其抗拉强度提升了 10%,伸长率提高了 45%。当电流处理时间为 180~240 ms 范围内或循环次数为 1~4 次,随着电流处理时间或循环次数增加,合金的抗拉强度持续下降,而伸长率不断提高。电流处理条件下,合金发生了再结晶,产生了细小的再结晶晶粒,位错密度增大,亚晶数量增多。在这些因素的综合作用下,冷轧 AZ31 镁合金的综合力学性能提高。

关键词 脉冲电流;冷轧 AZ31 镁合金;强化;力学性能

中图分类号 TG146.22;TG113.25;TG391 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.04.014 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Effects of Pulse Current Strengthening on Microstructure and Properties of Cold Rolled AZ31 Magnesium Alloy

Wei Chenyang,Zhou Quan,Chen Leping,Li Zhiwei

(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang HangkongUniversity)

Abstract: Pulse current strengthening cold rolled AZ31 magnesium alloy was investigated by means of OM, SEM, TEM and tensile testing machine.Effects of pulse current density, treating time and cycle times on microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy were analyzed. The results reveal that strengthen of cold rolled AZ31 magnesium alloy can be achieved by power frequency and instantaneous AC pulse current. In the range of 75~150 A/mm², as the current density increases, tensile strength of the alloy is increased at first and then decreased, and elongation is increased gradually. When the current density is 125 A/mm², tensile strength of the alloy reaches the maximum value of 293 MPa, and the elongation is 5.5%. Compared with those of cold rolled alloy, the tensile strength and the elongation of the alloy are increased by 10% and 45%, respectively.When the treating time is at 180~240 ms or the number of currentcycles is at 1~4 times, as the treating time or the number of current cycles increases, tensile strength of the alloy is decreased, and elongation of the alloy is increased. With current treatment, the alloy is recrystallized to generate fine recrystallized grains, resulting in the increase of dislocation density and the number of subgrains.Under the combined effect of these factors, the comprehensive mechanical properties of cold rolled AZ31 magnesium alloy were improved.

Key Words: Pulse Current, Cold Rolled AZ31 Magnesium Alloy, Strengthen, 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^[1-2]。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,因此具有更好的开发潜力^[3]。

显微组织的控制对镁合金力学性能的改善起着重

要作用。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^[4-5]。CHEN L 等^[6]发现频率为 250 Hz、峰值密度为 117.4 A/mm² 的脉冲电流处理同时提高了挤压态 AZ91 合金的屈服强度和抗拉强度,分别为 221

收稿日期:2022-07-12;修改稿收到日期:2022-08-13
基金项目:上海航天科技创新基金资助项目(SAST2019-130);江西省科技重点研发计划资助项目(20202BBEL53024)
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. 脉冲电流强化对冷轧 AZ31 镁合金的组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(4):503-509.
WEI C Y,ZHOU Q,CHEN L P, et al. Effects of pulse current strengthening on microstructure and properties of cold rolled AZ31 magnesium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(4):503-509.

MPa 和 384 MPa,受脉冲电流非热效应的影响,其晶粒尺寸明显细化,Mg₁₇Al₁₂ 相的尺寸减小且分布弥散。ZHAO G 等^[7]研究了“等径角挤压+轧制+脉冲电流处理”相结合的工艺,利用输出频率为 100 Hz、脉宽为 50 μs、电流密度为 4.55×10⁹ A/m² 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是 316 MPa 和 425 MPa,伸长率为 12.9%。曾勋等^[8]采用频率为 100 Hz、峰值电流密度为 4.44×10⁹ A/m² 的直流电脉冲对冷轧 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,合金的抗拉强度从 182 MPa 提高至 265 MPa,伸长率从 7.6% 提高到 18.1%。单召辉^[9]采用等通道角压和频率为 100 Hz、脉宽为 25 μs、峰值电流密度为 4.55×10⁹ A/m²,且脉冲电流处理 10 min 后,获得了组织均匀、力学性能优异的 AZ61 镁合金,试样的平均晶粒尺寸从 89 μm 细化到 1 μm,屈服强度和抗拉强度分别从 100 MPa 和 260 MPa 提高到 330 MPa 和 448 MPa。此外,脉冲电流对钢、铝、铜和钛等材料的固态组织和力学性能也有改善作用^[10-13]。目前,将高频、长时间脉冲电流作为变形镁合金组织和性能优化的处理工艺研究较多,而对于工频、瞬时交流脉冲电流处理变形镁合金的研究报道较少。由于工频、瞬时交流脉冲电流易于操作和实现,处理时间短、效率高,故本研究以冷轧 AZ31 镁合金为对象,进行了工频、瞬时交流脉冲电流强化冷轧 AZ31 镁合金的研究,旨在为其应用提供参考。

1 试验材料及方法

试验选取厚度为 2 mm 的商业 AZ31 镁合金板材作为研究对象,其化学成分为 Mg-3Al-Zn-0.3Mn(质量分数,下同)。首先将原始板材加热至 345 ℃ 保温 1 h 后随炉冷却使其组织均匀化,然后将均匀化后的板材进行 5 道次轧制。每道次压下量约为 5%,轧制道次间在 300 ℃ 下进行 30 min 的中间退火,合金总的变形量为 20% 左右。经过轧制后的板材利用线切割机切割出尺寸为 85 mm×7 mm 的长条状试样以便后续的脉冲电流处理。为了保证电极与试样间的良好导电性,用砂纸磨平试样表面,并将轧制后的试样紧固于电极上。主要研究了不同参数的脉冲电流对 AZ31 镁合金组织及力学性能的影响,具体工艺参数见表 1。

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。调压器的电压变化范围为 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

表 1 冷轧 AZ31 镁合金脉冲电流处理的工艺参数

Tab.1 Experimental process parameters			
序号	处理时间/ms	电流密度/(A·mm ⁻²)	循环次数
1	—	—	—
2	200	75	1
3	200	100	1
4	200	125	1
5	200	150	1
6	180	100	1
7	220	100	1
8	240	100	1
9	200	75	2
10	200	75	3
11	200	75	4

固态继电器组成,用于调节电流的通断时间。时间控制器的可调范围为 1~1 000 ms。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。

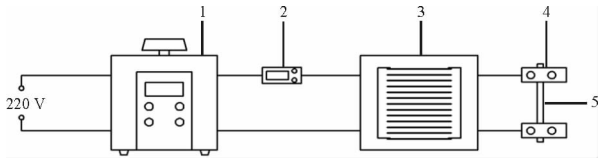


图 1 脉冲电流处理装置示意图

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

电流处理试验后,对试样分别进行组织表征与性能测试。先将金相试样经 400~2000 号砂纸依次打磨,最后用抛光机进行抛光,然后用 98 mL 的 3% 的草酸水溶液+2 mL 的 HNO₃ 进行腐蚀。利用 XJP-6A 倒置金相数码显微镜(OM)观察合金的显微组织,FEI-Quanta 200 型扫描电镜(SEM)观察合金的断口形貌;利用 FEI TaloS F200X 型透射电镜(TEM)对合金中的第二相、位错及亚晶进行表征;试样的力学性能测试在 WDW-50 微机控制电子万能试验机上完成,其拉伸试样尺寸见图 2。

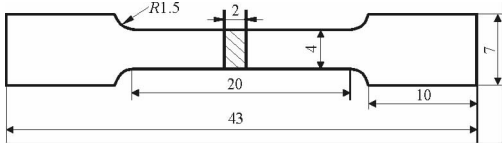


图 2 拉伸试样尺寸图

Fig.2 Dimensional drawing of tensile sample

2 试验结果与分析

2.1 合金的力学性能

图 3 为不同电流密度、处理时间及循环次数下 AZ31 镁合金的力学性能。由图 3a 可以看出,随着电流密度增大,合金的抗拉强度先增大后减小,而伸长率逐

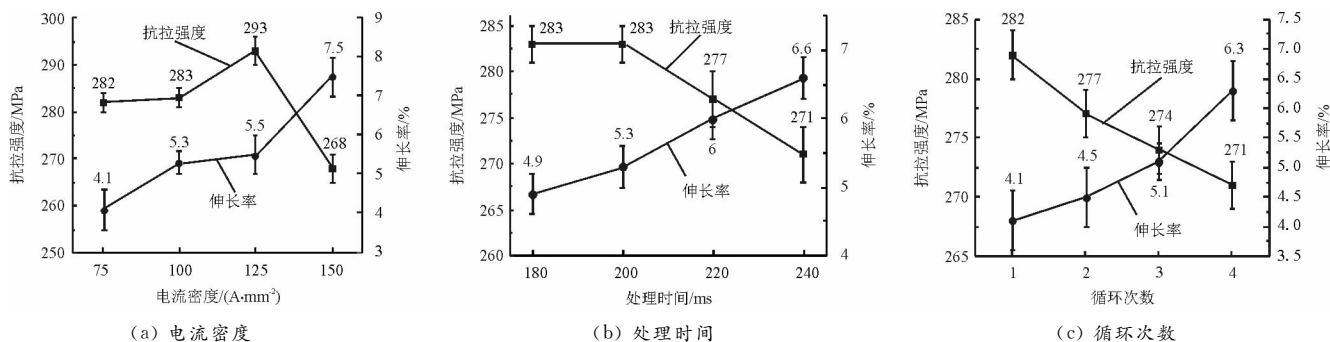


图 3 不同电流密度、处理时间和循环次数下 AZ31 镁合金的力学性能

Fig.3 Mechanical properties of AZ31 magnesium alloy under different current density

渐增大;当电流密度为 125 A/mm²时,合金的抗拉强度达到最大值。由图 3b 可以看出,随着电流处理时间延长,合金的抗拉强度逐渐降低,而其伸长率逐渐上升;由图 3c 可知,随着循环次数增加,合金的抗拉强度逐渐下降,而伸长率逐渐提高。

图 4 为不同工艺处理条件下 AZ31 镁合金的力学性能。可以看出,冷轧态合金的抗拉强度为 266 MPa,伸长率为 3.8%;经过电流密度为 125 A/mm²、通电时间为 200 ms 的 1 次脉冲电流处理后,合金的抗拉强度提升至 293 MPa,伸长率提升至 5.5%,与冷轧态合金相比,其抗拉强度提升了 10%,伸长率提高了 45%。

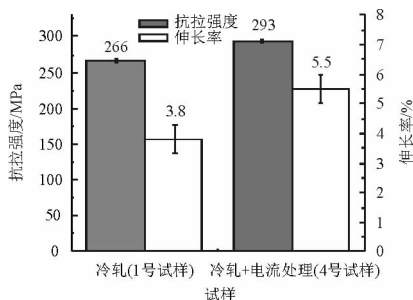


图 4 不同工艺下 AZ31 镁合金的力学性能

Fig.4 Mechanical properties of AZ31 magnesium alloy under different processes

2.2 合金的微观组织

图 5 为冷轧 AZ31 镁合金的显微组织。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,为典型的冷轧态组织。图 6~图 8 分别为不同电流密度、处理时间及循环次数下 AZ31 镁合金的显微组织。

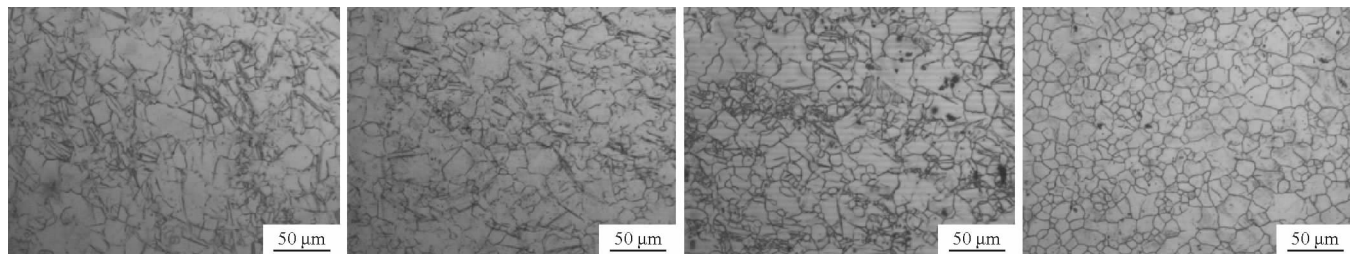
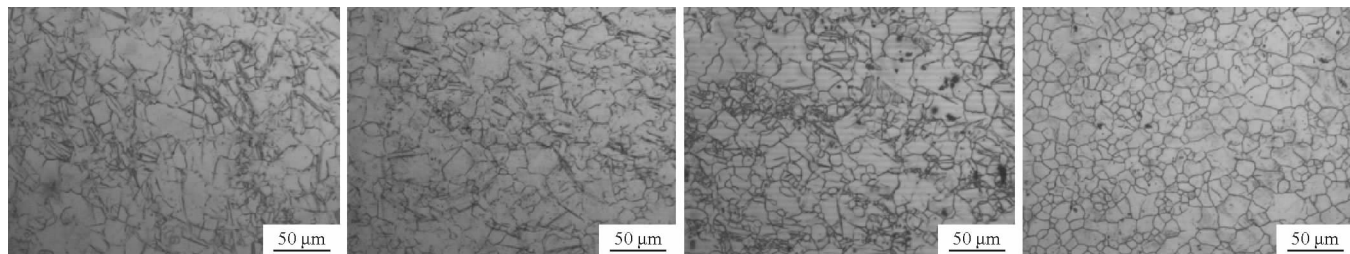


图 5 冷轧 AZ31 镁合金的显微组织

Fig.5 Microstructure of cold rolled AZ31 magnesium alloy under different current densities

可以看出,当电流密度在 75~125 A/mm²范围内,合金仍然保留着变形组织,同时还有少量细小的再结晶晶粒;随着电流密度增大,再结晶程度逐渐提高,变形组织逐渐减少;当电流密度达到 150 A/mm²时,合金中变形组织明显减少,几乎观察不到孪晶,再结晶程度明显提高,且再结晶晶粒有所长大。当处理时间为 180 ms 时,合金中存在大量细线状孪晶、少量呈现透镜状孪晶、再结晶晶粒以及剪切带,但与冷轧态试样相比,变形组织有所减少;当处理时间大于 180 ms 时,随着处理时间增加,合金的再结晶程度不断提高,变形组织逐渐减少,再结晶晶粒逐渐长大。在不同循环次数下,合金中均存在变形组织。当循环次数为 1 次时,合金中保留了变形晶粒、孪晶及剪切带;当循环次数大于 2 次时,随着循环次数增加,合金的再结晶程度逐渐提高,孪晶数量逐渐减少,再结晶晶粒逐渐长大。

图 9 为 AZ31 镁合金经脉冲电流处理前后位错形



(a) 75 A/mm²

(b) 100 A/mm²

(c) 125 A/mm²

(d) 150 A/mm²

图 6 不同电流密度下 AZ31 镁合金的显微组织

Fig.6 Microstructure of AZ31 alloy under different current densities

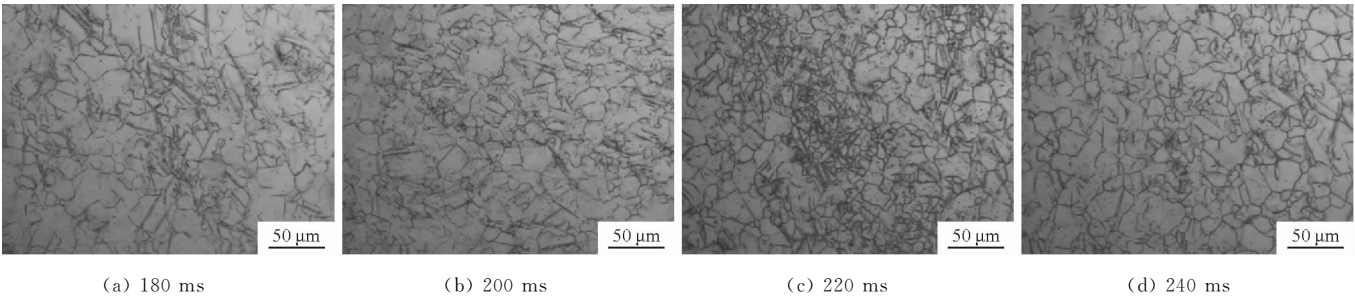


图 7 不同处理时间下 AZ31 镁合金的显微组织

Fig.7 Microstructure of AZ31 magnesium alloy under different treatment time

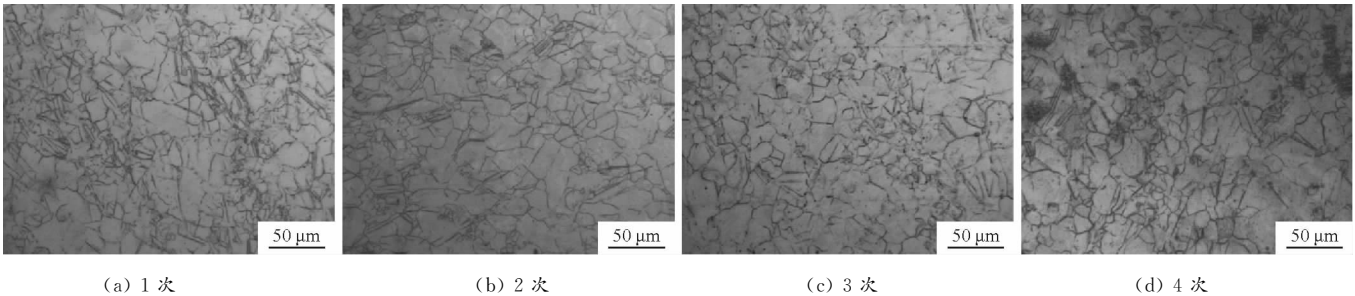


图 8 不同循环次数下 AZ31 镁合金的显微组织

Fig.8 Microstructure of AZ31 magnesium alloy under different cycles

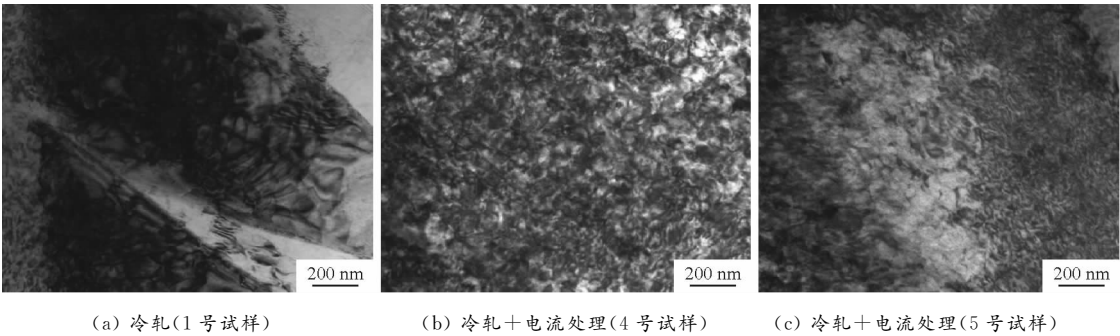


图 9 脉冲电流处理前后 AZ31 镁合金位错形貌

Fig.9 Dislocation morphology of the AZ31 alloy before and after pulse current treatment

貌的 TEM 形貌。可以看出,在冷轧试样和电流处理的 4 号和 5 号试样中,均存在较高的位错密度,且都形成了位错缠结,与冷轧态(1 号试样)相比,在电流处理(4 号试样)后,其内部的位错密度明显增大。而与 4 号试样相比,在 5 号试样中,试样的位错密度又出现了明显下降。

图 10 为脉冲电流处理前后 AZ31 镁合金中亚晶形貌的 TEM 图。可以看出,在进行脉冲电流处理前后,合金中均发现了亚晶存在,但合金经过脉冲电流处理后,合金中亚晶的数量增多,且尺寸有所减小。

图 11 和图 12 为 AZ31 镁合金经脉冲电流处理前后 Al-Mn 相的 TEM 形貌及其元素扫描。AZ31 镁合金中 Al-Mn 相主要为 Al_8Mn_5 相^[14]。可以看出,虽然有少量尺寸较大的 Al-Mn 相在电流处理后有所溶解和细化,且均匀性略微提高,但从总体上看,第二相的尺寸和分布变化较小。

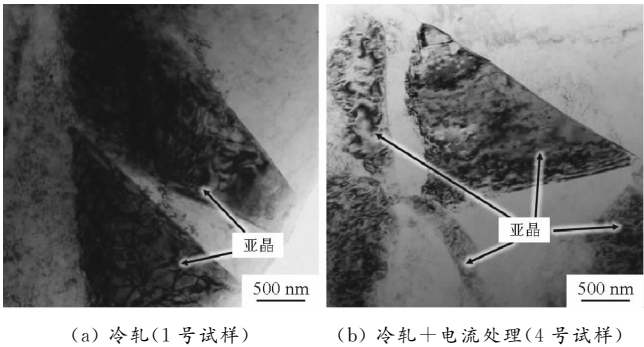


图 10 脉冲电流处理前后 AZ31 镁合金中亚晶形貌

Fig.10 Morphology of subgrain in the AZ31 alloy before and after pulse current treatment

图 13 为脉冲电流处理前后 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相形貌的 TEM 图。在脉冲电流处理前后,均可以看到球形的 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 析出相存在,且尺寸几乎没有发生明显变化,这说明脉冲电流处理对合金中的 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相无明显影响。

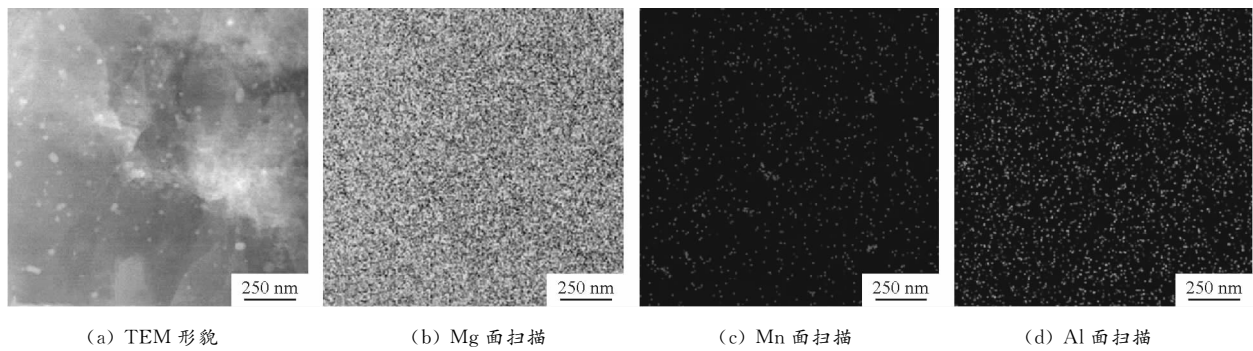


图 11 脉冲电流处理前 Al-Mn 相的 TEM 形貌及 EDS 图谱

Fig.11 TEM morphology and EDS spectra of the Al-Mn phase before pulse current treatment

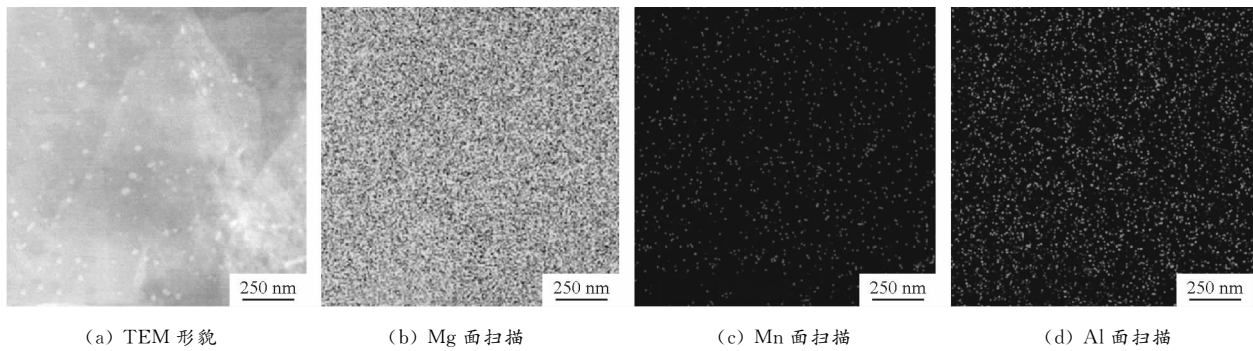


图 12 脉冲电流处理后 Al-Mn 相的 TEM 形貌及 EDS 图谱

Fig.12 TEM morphology and EDS spectra of the Al-Mn phase after pulse current treatment

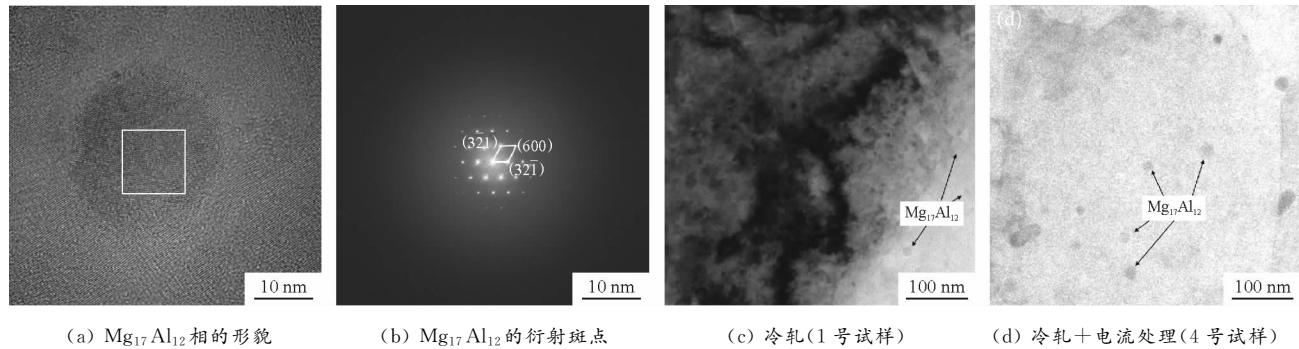


图 13 脉冲电流处理前后 $Mg_{17}Al_{12}$ 相形貌的 TEM 图

Fig.13 Morphology of $Mg_{17}Al_{12}$ phase in the alloy and TEM diagram before and after pulse current treatment

2.3 断口形貌

图 14 为 AZ31 镁合金拉伸断口形貌。可以看出，

冷轧态试样的断口存在较大的解理面和解理台阶，少量的撕裂棱和韧窝；经过脉冲电流处理后，试样断口处的

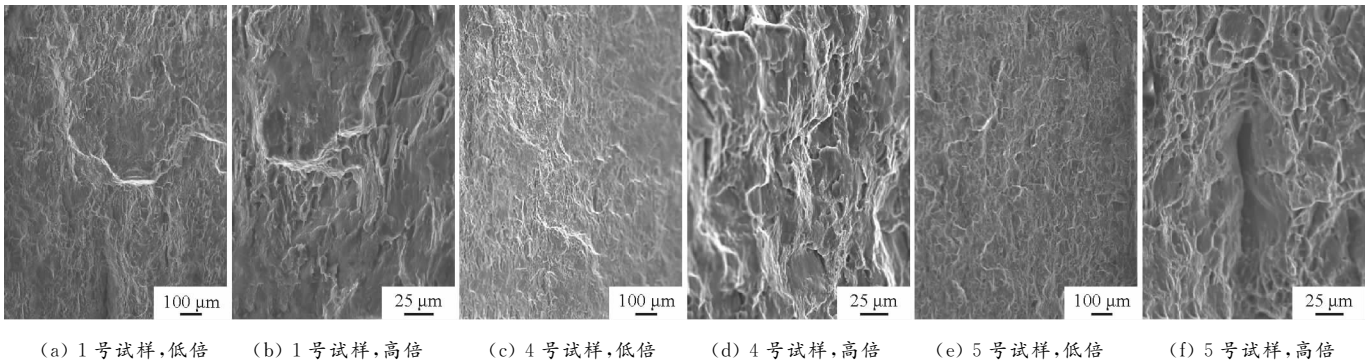


图 14 不同处理条件下试样的断口形貌

Fig.14 Fracture morphology of the sample under different treatment condition

解理面和解理台阶均变小,撕裂棱和韧窝的数量增多,且 5 号试样断口处的韧窝数量多于 4 号试样的。

2.4 分析与讨论

2.4.1 脉冲电流在合金中的热效应与非热效应

镁合金在进行脉冲电流处理时,有一定量的高速漂移电子与原子进行碰撞,产生焦耳热效应,使合金的温度升高,合金提升的温度 ΔT 可表示为^[9]:

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

式中, ρ 为合金的电阻率; j 为电流密度; t 为脉冲电流作用时间; c_p 为合金的比热容; d 为合金的密度。

同时,由于脉冲电流持续的时间较短,会使得合金材料的温升很快,使其热膨胀滞后,从而在试样内部产生一个很大的瞬时热压应力,促进位错的可移动性,产生的热压应力可表示为^[9]:

$$\tau_h = E_Y \chi \Delta T \quad (2)$$

式中, E_Y 为合金的弹性模量; χ 为合金的膨胀系数。

此外,由于电流通过金属时,电子流与位错间存在相互作用,拖曳位错运动。单位位错长度上的电子风力 F_{ew} 可表示为^[15]:

$$F_{ew} = e n_e j \left(\frac{\rho_d}{N_d} \right) \quad (3)$$

式中, $\frac{\rho_d}{N_d}$ 为单位位错密度的比电阻; N_d 为位错密度; e 为电子电荷; n_e 为电子密度。

通过式(1)~式(3)可以看出,随着电流密度增大,脉冲电流的焦耳热效应、热压应力和电子风力都是逐渐增加的。

2.4.2 脉冲电流对合金微观组织的影响

(1)脉冲电流对位错的影响 由于 AZ31 镁合金在进行脉冲电流处理前经过多道次轧制,使得合金内部获得了较高的位错密度,又因为位错线可能出现在各个方向上,在脉冲电流产生的热压应力和电子风力的共同作用下,加快了冷轧 AZ31 镁合金中的位错运动,使得位错之间更容易发生缠结和堆积,形成受阻位错塞积群,从而提高了合金的位错密度。当瞬时热压应力和电子风力大于合金中位错堆积和缠结所产生的阻力时,打开堆积受阻的位错缠结,会使得合金位错密度降低。

(2)脉冲电流对亚晶的影响 经过脉冲电流处理后,亚晶数量的增多是焦耳热效应、瞬时热压应力和电子风力共同作用导致^[16]。在焦耳热效应、瞬时热压应力和电子风力的共同作用下,会使合金中位错不断运动,促进位错重排,位错之间相互作用形成亚晶粒,使亚晶数量增多。

(3)脉冲电流对再结晶的影响 合金发生再结晶是脉冲和电流处理过程中产生的焦耳热效应所致。在焦耳热效应的作用下,合金温度获得了快速的提升,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的提高,促进合金的再结晶^[17]。

(4)脉冲电流对第二相的影响 试验中,对于 AZ31 镁合金,在电流密度为 125 A/mm^2 、通电时间为 200 ms 的脉冲电流条件下,取 $\rho = 9.2 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, $c_p = 1.1 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$, $d = 1.78 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,由式(1)可以得出在进行脉冲电流处理时,试样的最大温升约为 $154 \text{ }^\circ\text{C}$,远小于 Al_8Mn_5 相和 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相的回溶温度。原子半径越小,原子之间结合就越紧密,第二相的稳定性越高;Mg 的原子半径为 0.143 nm ,Al 的原子半径为 0.160 nm ,Mn 的原子半径为 0.127 nm ,因此 Al_8Mn_5 相的稳定性较差,故 Al_8Mn_5 相在脉冲电流的作用下会发生略微溶解,而 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相没有发生溶解与析出,但总体上看,脉冲电流处理前后, Al_8Mn_5 相和 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相的尺寸和分布变化不明显。

2.4.3 脉冲电流对合金力学性能的影响

位错密度、亚晶、再结晶和第二相是影响冷轧 AZ31 镁合金力学性能的重要因素。位错密度会影响合金的强度,位错密度对合金强度的影响主要与位错滑移启动力 τ_p 有关。根据 Peirls-Nabarro 公式,位错滑移的启动力 τ_p 为^[18]:

$$\tau_p = \frac{f_{x,\max}}{b} = \frac{2G}{1-\nu} \exp\left(-\frac{2\pi\omega}{b}\right) \quad (4)$$

式中, $f_{x,\max}$ 是滑移面上上下两层原子间的最大作用力; b 为柏氏矢量; G 为切变模量; ν 为泊松比; ω 为位错密度, $\omega = a/(1-\nu)$; a 为滑移面的面间距。位错密度越大,位错滑移阻力将增大,位错强化效果更加显著,合金的抗拉强度越高。

亚晶对合金强度的影响取决于其数量和尺寸。根据 Hall-petch 公式可知,细晶强化效果与亚晶数量呈正相关,与亚晶尺寸呈负相关。因此,亚晶数量越多,亚晶尺寸越小,合金的细晶强化效果越好;冷变形合金再结晶产生的细小晶粒会使合金强度和塑性都提升。第二相也会影响合金的强度,细小、弥散分布的第二相对位错有钉扎作用,阻碍位错的运动,产生弥散强化作用,提高合金的强度。

与冷轧态 AZ31 镁合金相比,脉冲电流处理 4 号合金中,虽然 Al_8Mn_5 相有所溶解和细化,但变化较小,且

Mg₁₇Al₁₂相的数量和尺寸均无明显变化;由于 AZ31 镁合金中 Al₈Mn₅相和 Mg₁₇Al₁₂相的含量较低,因此其对 AZ31 镁合金的力学性能的影响很小。在交流脉冲电流作用下,合金的位错密度增大,亚晶数量增加,且发生了局部再结晶,形成了细小的再结晶晶粒,故在位错强化和细晶强化的综合作用下,使得合金的抗拉强度和伸长率提高。而在脉冲电流处理 5 号合金中,由于位错密度降低,再结晶程度进一步提升,再结晶晶粒有所长大,因此合金的抗拉强度下降,伸长率提高。

在 75~125 A/mm²范围内,随着电流密度增大,脉冲电流产生的焦耳热效应增强,热压应力和电子风力增大,AZ31 镁合金的位错密度增大,亚晶数量增多,细小的再结晶晶粒增多,使得合金的抗拉强度提高,伸长率升高;当电流密度为 150 A/mm²时,焦耳热效应显著,同时瞬时热压应力和电子风力大于合金中位错堆积和缠结所产生的阻力,促进位错的可移动性,打开堆积受阻的位错缠结,从而引起位错密度降低,位错强化效应减弱,同时合金的再结晶晶粒有所长大,使合金的抗拉强度降低,伸长率进一步提高。

随着通电时间延长和循环次数的增多,脉冲电流产生的焦耳热效应增强,热压应力和电子风力增大,位错缠结被打通,使得合金位错密度减小,同时在焦耳热作用下,再结晶程度提高,再结晶晶粒长大,合金的抗拉强度逐渐降低,但伸长率逐渐升高。

3 结 论

(1)工频、瞬时交流脉冲电流可以实现冷轧 AZ31 镁合金的强化。

(2)在 75~150 A/mm²范围内,随着电流密度增大,AZ31 镁合金的抗拉强度先增大后减小,而其伸长率逐渐增大;当电流密度为 125 A/mm²时,其抗拉强度达到最大值 293 MPa,伸长率为 5.5%,与冷轧态合金相比,分别提高了 10% 和 45%。

(3)当电流处理时间为 180~240 ms 或电流循环次数在 1~4 次范围内,随着电流处理时间或电流循环次数的增加,AZ31 镁合金的抗拉强度不断下降,而伸长率不断提高。

(4)电流处理条件下,AZ31 镁合金发生了再结晶,产生了细小的再结晶晶粒,位错密度增大,亚晶数量增多,在这些因素的综合作用下,冷轧 AZ31 镁合金的综合力学性能提高。

参 考 文 献

[1] ZHANG W, XIAO W, WANG F, et al. Development of heat resistant Mg-Zn-Al-based magnesium alloys by addition of La and Ca: Microstructure and tensile properties[J]. Journal of Alloys &

Compounds, 2016, 684: 8-14.

- [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): 6-8.
- [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] JIANG Y B, TANG G, ZHU Y H Y, et al. On the thermodynamics and kinetics of electropulsing induced dissolution of β -Mg₁₇Al₁₂ phase in an aged Mg-9Al-1Zn alloy-ScienceDirect[J]. Acta Materialia, 2009, 57(16): 4 797-4 808.
- [5] 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, 46(3): 74-78.
- [6] CHEN L, LI S, CHU X, et al. Grain refinement and strength enhancing of hot extruded Mg alloy by application of electric pulse[J]. Materials Letters, 2019, 241(15): 104-107.
- [7] 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.
- [8] 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): 466-470.
- [9] 单召辉. 高密度脉冲电流处理 AZ 系变形镁合金的微观组织与力学性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- [10] FENG J, HANG C, TIAN Y, et al. Effect of electric current on grain orientation and mechanical properties of Cu-Sn intermetallic compounds joints[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 753: 203-211.
- [11] ZHAO Y, MA B, GUO H, et al. Electropulsing strengthened 2 GPa boron steel with good ductility[J]. Materials & Design, 2013, 43: 195-199.
- [12] SONG H, WANG Z J. Effects of electro pulsing on dislocation mobility of Titanium sheet[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(7): 1 599-1 605.
- [13] 湛利华, 贾树峰, 张姣. 电脉冲时效对 7075 铝合金组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(3): 600-605.
- [14] 王杰, 童文辉, 高恩志, 等. Al-Mn 相在 AZ 系镁合金中的分布和形成[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(2): 310-321.
- [15] 王艺潼. 电-热-力耦合场下 Al-Mg-Si 合金的组织演变及强化机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [16] 刘庆. 镁合金塑性变形机理研究进展[J]. 金属学报, 2010, 46(11): 1 458-1 472.
- [17] 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.
- [18] 季凯, 张静. 冷热循环处理对 6005A 铝合金焊接接头显微组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(8): 2 066-2 074.

(编辑: 张正贺)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com