

基于激光冲击的镁合金在 NaCl 溶液中 电化学腐蚀的研究

张青来¹ 钱 阳¹ 安志斌² 李兴成¹ 张永康³ 王思顺¹

¹ 江苏大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013
² 空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038
³ 东南大学机械工程学院, 江苏 南京 210096

摘要 为了研究激光冲击强化对镁合金耐腐蚀性的影响, 采用电化学方法和钕玻璃脉冲激光(波长 1064 nm, 脉冲宽度 20 ns)研究 AZ31、AZ61 和 AZ91 三种镁合金在 3.5%(质量分数)NaCl 溶液中的电化学腐蚀行为, 并对合金表面形貌、微观组织、显微硬度、自腐蚀电位和电化学阻抗谱进行实验测试与分析。结果表明: 激光冲击强化改善了镁合金的耐腐蚀性。随着激光功率密度的增加镁合金自腐蚀电位正向移动, 腐蚀电流密度降低, 阻抗弧变大。当功率密度为 0.7 GW/cm² 时电流密度开始增加, 阻抗弧减小。讨论和分析了 Al 含量、固溶和时效处理对激光冲击镁合金自腐蚀电位和阻抗谱的影响。

关键词 激光光学; 镁合金; 激光冲击强化; 自腐蚀电位; 电化学阻抗谱; 微观组织

中图分类号 TN249; TG146.2+2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0903002

Study on Electrochemical Corrosion of Magnesium Alloys by Laser Shock Processing in NaCl Solution

Zhang Qinglai¹ Qian Yang¹ An Zhibin² Li Xingcheng¹
Zhang Yongkang³ Wang Sishun¹

¹ School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China
² College of Engineering, Airforce Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China
³ School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China

Abstract In order to study the effect of laser shock processing (LSP) on the electrochemical corrosion resistance of magnesium alloys, the electrochemical corrosion behaviors in 3.5% (mass fraction) NaCl solution of AZ31, AZ61 and AZ91 magnesium alloys are investigated by electrochemical method and Nd: glass laser with the wavelength of 1064 nm and pulse width of 20 ns. Its surface morphologies, microstructures, microhardness, self-corrosion potential and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) are also examined and analyzed. The experimental results show that electrochemical corrosion resistance of magnesium alloys are improved after LSP. With the increasing of laser power density, the self-corrosion potential of magnesium alloy begins to move towards a positive direction, the corrosion current density decreases and the impedance arc becomes larger. When power density reaches to 0.7 GW/cm², the current density increases and impedance arc becomes smaller. The effect of the Al content, solution and aging treatment on the corrosion potential and EIS of magnesium alloys by LSP are discussed and analyzed.

Key words laser optics; magnesium alloys; laser shock processing; self-corrosion potential; electrochemical impedance spectroscopy; microstructure

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

收稿日期: 2014-03-17; 收到修改稿日期: 2014-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(51175231)

作者简介: 张青来(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事镁合金、钛合金及激光加工等方面的研究。

E-mail: zhangql196210@163.com

1 引 言

近年来,镁合金在航空和汽车工业得到日益广泛应用。由于镁合金耐腐蚀性很差,作为结构零件受到机械应力与腐蚀介质的共同作用,易产生应力腐蚀开裂,大大限制了其应用范围^[1-5]。激光冲击处理(LSP)作为一种新型的材料表面改性技术,是提高镁合金表面耐腐蚀性能的方法之一。激光冲击材料表层的剧烈塑性变形、微观结构改变和产生的残余压应力可提高其综合力学性能^[6-9]。激光冲击波能量分布的不均匀性对材料表面粗糙度(如表面完整性和表面形貌)产生明显的影响。

激光冲击提高镁合金抗应力腐蚀性能,可以抑止裂纹的产生,阻止裂纹的扩展。Zhang等^[10-13]通过三点加载方法和慢应变速率法研究了AZ31镁合金应力腐蚀裂纹的产生和扩展以及抗应力腐蚀性。李少哲等^[14]采用电化学技术研究了激光冲击AZ91镁合金在NaCl溶液中的耐蚀性能,随着激光冲击次数的增加,自腐蚀电位正移,腐蚀电流密度降低,耐腐蚀性能提高。目前,激光冲击镁合金的耐腐蚀性基础研究还比较少,有待进一步完善。

本文对AZ31、AZ61和AZ91三种镁合金进行LSP实验,利用电化学方法研究了各种状态下LSP前后镁合金的电化学腐蚀性能,并结合冲击区表面形貌和组织结构来讨论镁合金的电化学腐蚀行为,为进一步完善镁合金表面改性技术提供理论依据和实验数据。

2 实 验

电化学实验用材料为AZ31、AZ61和AZ91三种牌号镁合金。AZ31镁合金为轧制板材(厚度为0.7 mm)和连铸棒材。AZ31板材退火工艺为300 °C/30 min/空气冷却(AC)。AZ31铸造镁合金均匀化处理工艺:420 °C/14 h/AC,而AZ61和AZ91铸态镁合金固溶和时效处理制度分别为420 °C/14 h/AC和200 °C/15 h/AC。

激光冲击用镁合金靶材夹持在工作台上,用流动的水为约束层,选用厚度为100 μm的专用铝箔作为吸收层。实验用激光器参数:最大输出脉冲能量为6 J、脉宽20 ns、波长为1064 nm。激光冲击光斑直径为3 mm,采用50%的搭接率对镁合金靶材进行冲击,冲击面积均为1 cm²(电化学实验用试样尺寸)。靶材表面的组织细化和残余压应力大小以及表面形貌主要取决于激光功率密度的大小。激光

功率密度 I 公式为: $I = 4E / (\pi\tau D^2)$, 其中 E 为激光脉冲能量, τ 为脉宽, D 为光斑直径。

动电位极化曲线采用型号为CH1600的电化学工作站测量。采用三电极体系,辅助电极为石墨电极,参比电极为饱和甘汞电极,电解质为3.5% (质量分数,下同)NaCl溶液,在室温下进行。以恒电位扫描法测定试样的极化曲线,扫描速率为5 mV/s。测定塔菲尔(Tafel)曲线和交流阻抗(EIS),静置时间为300 s,测定的电位范围是-1.4~2.5 V,扫描速度为1 mV/s,终止电位为0,电化学阻抗测试频率范围0.5~10000 Hz。

采用Veeco Wyko NT1100型光学轮廓仪对镁合金靶材表面形貌进行测试。通过HVS-1000Z型显微硬度仪测量冲击横断面的显微硬度。利用Leica DM2500M型正置透反射光学显微镜对镁合金微观组织进行观察和分析。

3 结果与分析

3.1 电化学性能

3.1.1 激光功率密度的影响

众所周知,激光功率密度是金属材料LSP的重要参数之一。选择AZ31镁合金轧制板材作为LSP靶材来研究功率密度对其电化学腐蚀的影响。

图1为不同激光功率密度下激光冲击前后AZ31镁合金板材在3.5%NaCl溶液中的极化曲线及电化学阻抗谱曲线。由图1可见,激光冲击提高了镁合金的耐腐蚀性。随激光功率密度的增加激光冲击镁合金板材的自腐蚀电位发生正移,腐蚀电流密度均降低,容抗弧均明显变大。因为容抗弧是由电荷传递引起,其直径可看作电极反应电荷传递电阻(即极化电阻),与析氢过程和表面膜层的完整性有关^[2]。当激光功率密度为0.6 GW/cm²时极化曲线明显右下移动,自腐蚀电位相对未冲击板材的正移量为290 mV,电流密度 i_{corr} 显著降低,即从 $5.91 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 降到 $0.1 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$,其阻抗弧增加,耐腐蚀性得到提高;当功率密度为0.7 GW/cm²时极化曲线有右上移动趋势,自腐蚀电位相对于未冲击板材的正移量为325 mV,而电流密度 i_{corr} 显著降低,即从 $5.91 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 降到 $0.11 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$,相对功率密度为0.6 GW/cm²时变化量 $\Delta i_{\text{corr}} = 0.01 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$,阻抗弧稍微减小。实验结果表明,镁合金的耐腐蚀性受激光功率密度的影响较大,当功率密度为0.6 GW/cm²时激光冲击的AZ31合金

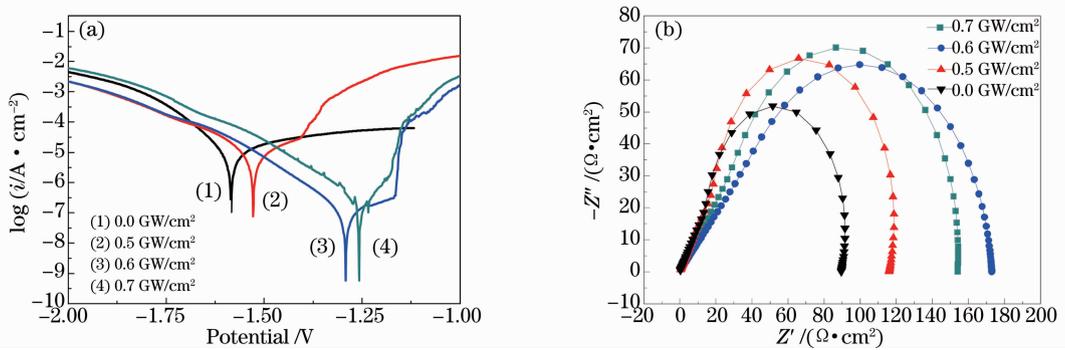


图1 激光冲击 AZ31 镁合金轧制板材在 3.5% NaCl 溶液中的(a)极化曲线和(b)电化学阻抗谱

Fig. 1 (a) Tafel curves and (b) EIS curves of the rolled sheet of AZ31 magnesium alloy by LSP in 3.5% NaCl solution

板材腐蚀电流密度($i_{\text{corr}} = 0.1 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)最低,具有良好的电化学耐蚀性质。

3.1.2 固溶和时效的影响

以 AZ91 铸造镁合金为对象,通过固溶和时效处理研究微观组织对 LSP 及镁合金耐腐蚀性的影响。

图 2 所示为功率密度为 $1.0 \text{ GW}/\text{cm}^2$ LSP 前后的固溶和时效 AZ91 镁合金在 3.5% NaCl 溶液中的极化曲线及电化学阻抗谱。由图 2 可见, AZ91 固溶镁合金自腐蚀电位为 -1.522 V , 腐蚀电流密度 i_{corr} 为 $2.69 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$; AZ91 时效镁合金自腐蚀电位为 -1.397 V , 腐蚀电流密度 i_{corr} 为 $1.61 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 时效镁合金自腐蚀电位相对固溶的正移量 ΔE 为 125 mV , 腐蚀电流密度则降低了 $1.08 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。LSP 处理后 AZ91 固溶镁合金相对未冲击的极化曲线向右下偏移, 即自腐蚀电位的正移增量为 92 mV , 腐蚀电流密度 i_{corr} 从 $269 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 大幅度降到 $1.78 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 激光冲击大幅度改善了 AZ91 固溶镁合金的耐蚀性。LSP 处理后 AZ91 时效镁合金相对未冲击的极化曲线向右上偏移, 即自腐蚀电位的正移增量为 205 mV , 腐蚀电流密度 i_{corr} 从 $1.61 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 增到 $8.77 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。激光冲击增加了固溶镁合金的阻抗弧, 却在一定程度上降低了时效镁合金的阻抗弧。

综上所述, 微观组织对镁合金及其 LSP 后的耐蚀性有明显影响。时效 AZ91 镁合金耐蚀性高于固溶的, 而激光冲击改善固溶镁合金耐蚀性的效果更好。AZ91 镁合金极化曲线和阻抗谱特征: 时效镁合金极化曲线相对固溶的自腐蚀电位正向移动, 腐蚀电流密度降低, 阻抗弧降低。基于激光冲击的 AZ91 镁合金极化曲线和阻抗谱特征: 固溶镁合金相对未冲击的自腐蚀电位正向移动, 腐蚀电流密度降低, 阻抗弧增加; 时效镁合金相对未冲击的极化曲线向右上移

动, 腐蚀电流密度增加, 阻抗弧降低。

3.1.3 Al 含量的影响

选择固溶 AZ31、时效 AZ61 和时效 AZ91 三种铸造镁合金作为实验材料, 来研究 Al 含量对镁合金的耐蚀性影响, 以及激光冲击对不同 Al 含量镁合金耐蚀性的影响。

图 3 所示为激光功率密度为 $1.0 \text{ GW}/\text{cm}^2$ LSP 前后三种状态铸造镁合金在 3.5% NaCl 溶液中极化曲线和电化学阻抗谱。由图 3 可观察到, 固溶 AZ31、时效 AZ61、时效 AZ91 铸造镁合金试样的自腐蚀电位 E 分别为 -1425 、 -1382 、 -1399 mV , 腐蚀电流密度 i_{corr} 分别为 152 、 2.61 、 $1.61 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 即随着 Al 元素含量增加, 腐蚀电流密度逐渐减小, 而自腐蚀电位正向移动, 当 Al 含量大于 6% 时(质量分数), AZ61 和 AZ91 的 i_{corr} 和 E 变化很小, 自腐蚀电位负向移动, 其负增量 ΔE 仅为 17 mV 。因此, 综合腐蚀试样表面点蚀情况, 三种状态镁合金耐蚀性顺序: 时效 AZ91 大于时效 AZ61 大于固溶 AZ31。

AZ31 固溶镁合金经激光冲击后试样的自腐蚀电位正向移动明显, 比未激光冲击的试样正移了 195 mV , 腐蚀动力增强, 同时 LSP 使表面膜更加致密, 不利于氯离子破坏, 导致腐蚀电流密度明显降低, 即固溶和固溶与 LSP 试样的 i_{corr} 分别为 $152 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $0.244 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 电化学阻抗弧相应增加, 如图 3(a1) 和图 3(a2) 所示。因此, LSP 处理改善了固溶 AZ31 镁合金的耐蚀性。

对 AZ61 时效镁合金来说, 激光冲击处理改变了其极化曲线, 试样的自腐蚀电位发生正移 310 mV , 而激光冲击前后的腐蚀电流密度 i_{corr} 分别为 $2.61 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $1.23 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 阻抗弧减小, 如图 3(b1) 和图 3(b2) 所示。因此, LSP 处理同样提高了固溶 AZ31 镁合金的耐蚀性。

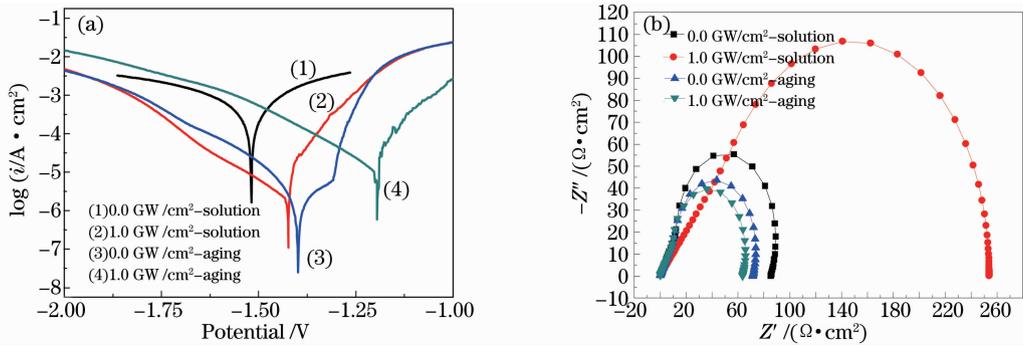


图 2 激光冲击 AZ91 固溶时效镁合金在 3.5%NaCl 溶液中的 (a) 极化曲线和 (b) 电化学阻抗谱
Fig. 2 (a) Tafel curves and (b) EIS curves of AZ91 solution and aging magnesium alloys by LSP in 3.5% NaCl solution

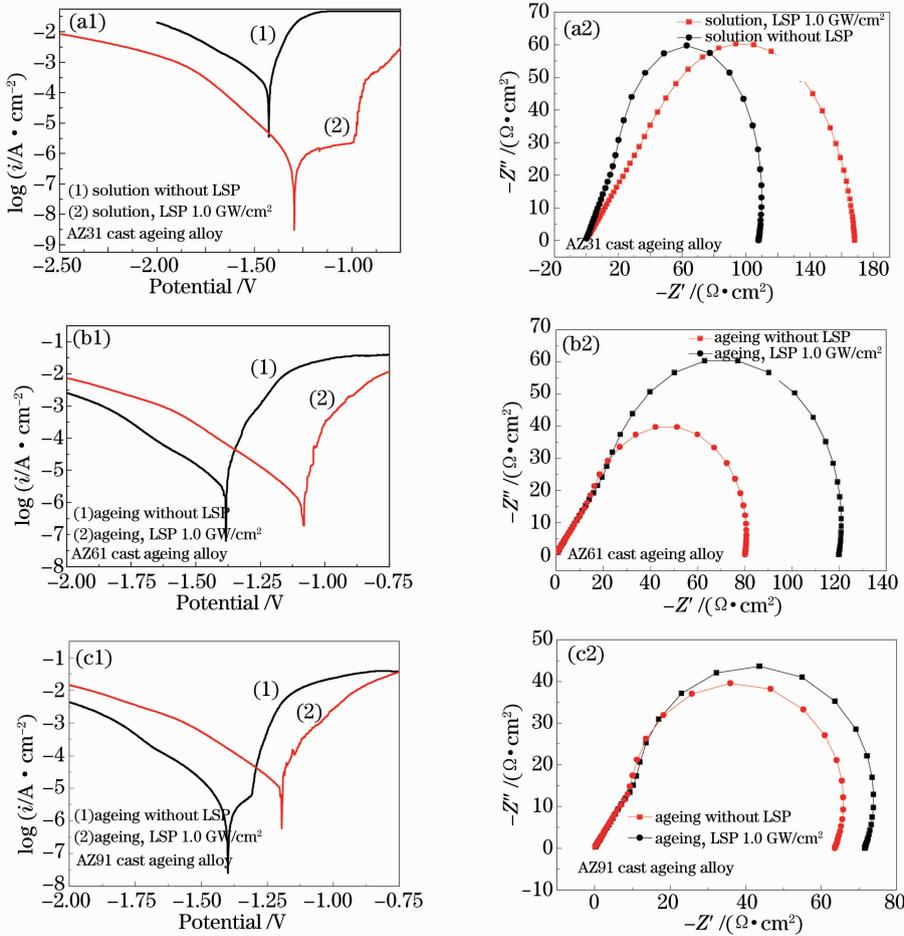


图 3 LSP 前后三种铸造镁合金在 3.5%NaCl 溶液中的极化曲线和电化学阻抗谱。

(a1)(a2) 固溶 AZ31; (b1)(b2) 时效 AZ61; (c1)(c2) 时效 AZ91

Fig. 3 Polarization and EIS curves of three casting magnesium alloys before and after LSP in 3.5% NaCl solution.

(a1), (a2) AZ31 solution alloy; (b1), (b2) AZ61 ageing alloy; (c1), (c2) AZ91 ageing alloy

激光冲击使时效 AZ91 镁合金试样的极化曲线右上移动, 其自腐蚀电位正移了 190 mV, 腐蚀电流密度 i_{corr} 从 $1.61 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 增至 $8.77 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 阻抗弧减小, 如图 3(c1) 和图 3(c2) 所示。

LSP 对不同含 Al 量的镁合金极化曲线和电化

学阻抗谱具有明显的影响, 影响其耐腐蚀因素很多, 如激光冲击参数、微观组织及冲击靶材表面状态等。结合腐蚀试样表面点蚀情况可得出, LSP 不同程度地提高了固溶和时效铸造镁合金的电化学耐蚀性。

3.2 分析与讨论

3.2.1 显微硬度

图 4 所示为经功率密度为 1.0 GW/cm^2 LSP 后几种铸造镁合金试样的断面显微硬度变化情况。由图 4 可见,在 LSP 前分别对镁合金进行固溶和时效处理,再对试样进行功率密度为 1.0 GW/cm^2 LSP, LSP 后冲击区表面显微硬度高于基体,随着 Al 含量增加显微硬度随之增加,而且时效镁合金的表面显微硬度高于固溶镁合金(如 AZ91 镁合金)。因此,激光冲击使镁合金表层不仅形成残余压应力,而且晶粒得到细化,形成大量孪晶和位错,提高了合金的显微硬度,进而提高了材料的耐腐蚀性^[15]。

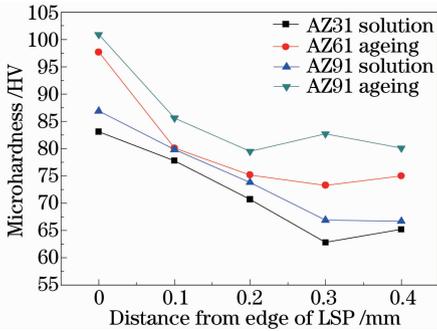


图 4 功率密度为 1.0 GW/cm^2 LSP 后不同状态铸造镁合金试样断面显微硬度

Fig. 4 Microhardness of sectional samples of different cast magnesium alloys after LSP by power density of 1.0 GW/cm^2

3.2.2 表面形貌

镁合金腐蚀性能与激光冲击表面的完整性(如表面形貌和粗糙度)密切相关。冲击表面塑性变形越大,粗糙度就越大,形成的凹坑中聚集 Cl^- 离子浓度越大,腐蚀速度越快,加速破坏表面膜。

表 1 是经不同功率密度激光冲击前后镁合金冲击区域的表面粗糙度。图 5 所示为经不同功率密度 LSP 前后 AZ31 镁合金轧制板材 50% 搭接冲击区域的三维表面形貌。由表 1 可知,激光冲击区域表面凸

表 1 经不同功率密度激光冲击前后镁合金冲击区域的表面粗糙度

Table 1 Surface roughness of impact zone of magnesium alloys before and after LSP by different power densities

Materials	State of alloy	Power density / (GW/cm^2)	R_p peak / μm	R_v valley / μm	$R_t = R_p - R_v$ / μm
AZ31	Rolling	0.0	1.70	-1.34	3.04
AZ31	Rolling	0.5	1.92	-1.74	3.66
AZ31	Rolling	0.6	2.00	-2.16	4.16
AZ31	Rolling	0.7	2.56	-1.82	4.38
AZ31	Rolling	1.0	3.55	-2.05	5.60
AZ31	Rolling	1.5	4.36	-2.93	7.29
AZ31	Casting solution	1.0	9.00	-1.50	10.48
AZ61	Casting ageing	1.0	3.96	-3.25	7.21
AZ91	Casting ageing	1.0	3.13	-2.33	5.46

3.2.3 相结构的影响

下面以固溶 AZ31 和时效 AZ91 铸造镁合金为

凹不平,随着激光功率密度增加冲击表面粗糙度逐渐增加,冲击深度反映了塑性变形的程度。例如 AZ31 镁合金轧制板材的表面粗糙度 R_t 为 $3.04 \mu\text{m}$,经 0.7、1.0、1.5 GW/cm^2 功率密度激光冲击后冲击区的表面粗糙度 R_t 分别为 4.38、5.60、7.29 μm ,特别是当功率密度大于 1.0 GW/cm^2 时,冲击表面形貌凸凹[见图 5(c)和(d)]明显,形成的凹坑将聚集更多 Cl^- 离子,加快腐蚀速度。

从表 1 还可观察到,随着 Al 含量增加,冲击区表面粗糙度 R_t 降低,如经 1.0 GW/cm^2 功率密度激光冲击后固溶 AZ31、时效 AZ61 和 AZ91 铸造镁合金表面粗糙度 R_t 分别为 10.48、7.21、5.46 μm ,且铸造镁合金表面粗糙度 R_t 高于轧制板材。因此,从激光冲击表面形貌和改性来说,用于镁合金的激光冲击密度应选不大于 1.0 GW/cm^2 为宜。

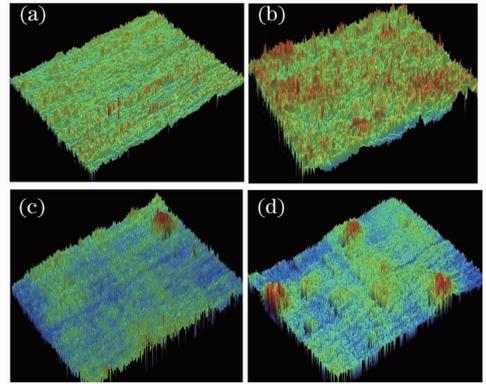


图 5 不同功率密度 LSP 前后 AZ31 镁合金轧制板材冲击区域的三维表面形貌。(a) 不经过激光冲击;(b) 0.7 GW/cm^2 ;(c) 1.0 GW/cm^2 ;(d) 1.5 GW/cm^2

Fig. 5 Three dimensional surface topographies of impact zone of AZ31 magnesium alloy rolled sheet before and after LSP by different power densities. (a) Without LSP; (b) 0.7 GW/cm^2 ; (c) 1.0 GW/cm^2 ; (d) 1.5 GW/cm^2

例,讨论 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相结构对激光冲击镁合金电化学耐蚀性的影响。

β -Mg₁₇Al₁₂相结构对镁合金的腐蚀行为具有重要的影响。在 NaCl 溶液中化学活性较高的 α -Mg 基体容易与 β -Mg₁₇Al₁₂相形成腐蚀电池,诱发电偶腐蚀,作为 β -Mg₁₇Al₁₂相比 α -Mg 基体具有更好的耐蚀性能,耐蚀性能受 β -Mg₁₇Al₁₂相分布的影响,即离散型和连续型分布。 β -Mg₁₇Al₁₂相在腐蚀过程中具有抑制腐蚀的作用,而且 Al 含量对于 β -Mg₁₇Al₁₂相的分布、晶粒大小以及表面膜稳定性具有明显的作用^[15]。沿晶界析出的 β -Mg₁₇Al₁₂相在 Cl⁻离子溶液中相对于 α -Mg 基体更不活泼,作为腐蚀阻挡层改善了 AZ91 镁合金钝化能力。当 β 相离散分布时,其周围 α 基体腐蚀速率最快,形成腐蚀缩颈坑,坑内 Cl⁻离子富集,进一步加速了 α 基体的腐蚀;当 β 相连续分布时, α 基体不断被腐蚀,直至 α 基体全部溶解而只剩 β 相^[16]。

图 6(a),(b)分别为 LSP 前 AZ31 和 AZ91 铸造镁合金的微观组织。AZ31 镁合金中 Al 元素含量较少,420 °C 均匀化后 Al 元素均匀分布在 Mg 基固溶体内,少量颗粒状 β -Mg₁₇Al₁₂相呈离散型均匀分布,如图 6(a)所示。AZ91 铸造镁合金中 Al 含量约为 9%(质量分数)左右,时效 AZ91 合金晶界处分布着大量析出 β -Mg₁₇Al₁₂相,其呈连续和不连续网

状形式析出,而少量颗粒状 β -Mg₁₇Al₁₂相在基体上呈离散型析出,如图 6(b)所示。

图 6(c),(d)分别为 LSP 后 AZ31 和 AZ91 铸造镁合金的微观组织。由于 AZ31 和 AZ91 合金中 Al 含量不同,激光冲击不同程度地改变了析出 β -Mg₁₇Al₁₂相的数量、形状和分布,进一步影响着镁合金的电化学腐蚀行为,其特征如下:功率密度为 1.0 GW/cm²激光冲击后固溶 AZ31 铸造镁合金晶粒得到一定程度细化,晶粒仍属于粗晶,其尺寸不小于 200 μ m,未改变颗粒 β -Mg₁₇Al₁₂相分布特征,见图 6(c)。冲击试样相对原始试样的自腐蚀电位正向移动量为 195 mV,腐蚀电流密度 i_{corr} 从 152 μ A·cm⁻²降到 0.244 μ A·cm⁻²,电化学阻抗弧增加,如图 3(a)和图 3(d)所示。

功率密度为 1.0 GW/cm²激光冲击后时效 AZ91 镁合金晶粒细化,沿晶界分布的网状 β -Mg₁₇Al₁₂相(黑色)数量增多[见图 6(d)]。冲击试样相对原始试样的自腐蚀电位正移量为 190 mV,与固溶 AZ31 镁合金接近,但是腐蚀电流密度 i_{corr} 从 1.61 μ A·cm⁻²增至 8.77 μ A·cm⁻²,电化学阻抗弧减小,如图 3(c)和(d)所示。

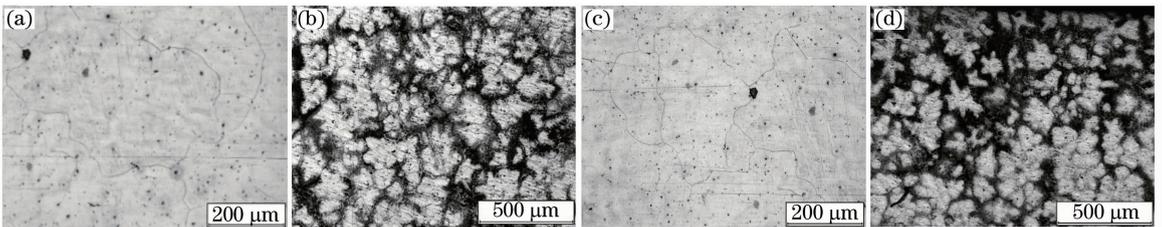


图 6 功率密度为 1.0 GW/cm²激光冲击前后 AZ31 和 AZ91 镁合金试样的微观组织。(a) LSP 前 AZ31; (b) LSP 前 AZ91; (c) LSP 后 AZ31; (d) LSP 后 AZ91

Fig. 6 Microstructures of AZ31 and AZ91 magnesium alloys samples before and after LSP by power density of 1.0 GW/cm². (a) AZ31 before LSP; (b) AZ91 before LSP; (c) AZ31 after LSP; (d) AZ91 after LSP

4 结 论

1) 随着激光功率密度增加 AZ31 镁合金板材自腐蚀电位发生正向移动,电化学阻抗弧变大。当功率密度为 0.6 GW/cm²时,腐蚀电流密度最低,表现出良好的电化学耐蚀性;当功率密度为 0.7 GW/cm²时,腐蚀电流密度开始增加,其阻抗弧变小。

2) 极化曲线及电化学阻抗谱表明,基于激光冲击的固溶 AZ91 镁合金比时效的耐蚀性效果更明显。具体表现:固溶镁合金的自腐蚀电位正向移动,腐蚀电流密度降低,阻抗弧增加;时效镁合金的自腐

蚀电位正向移动,腐蚀电流密度增加,阻抗弧减小。

3) 激光冲击对不同 Al 含量铸造镁合金的极化曲线和阻抗谱具有不同的影响。固溶 AZ31 合金的腐蚀电流密度明显减小,阻抗弧增加;时效型 AZ61 合金的腐蚀电流密度降低,阻抗弧减小;时效型 AZ91 合金的腐蚀电流密度增加,阻抗弧减小。

参 考 文 献

- Hao Xianchao, Zhou Wanqiu, Zheng Zhiguo. Study on electrochemical corrosion behaviors of AZ31 magnesium alloys in NaCl solution [J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science), 2004, 22(2): 117-121.
- 郝献超,周婉秋,郑志国. AZ31 镁合金在 NaCl 溶液中的电化学

- 腐蚀行为研究[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2004, 22(2): 117-121.
- 2 Li Lingjie, Yu Shenghai, Lei Jinglei, *et al.*. Study on time-dependent electrochemical corrosion behavior of AZ31 magnesium alloy in NaCl medium [J]. *Ordinance Material Science and Engineering*, 2008, 31(6): 8-11.
李凌杰, 于生海, 雷惊雷, 等. NaCl 介质中 AZ31 镁合金的动态电化学腐蚀行为研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2008, 31(6): 8-11.
- 3 Chen Chongmu, Zhang Tao, Shao Yawei, *et al.*. Electrochemical noise analysis for corrosion of AZ91 magnesium alloy in alkaline chloride medium [J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2009, 21(1): 15-19.
陈崇木, 张涛, 邵亚薇, 等. AZ91D 镁合金在 NaCl 溶液中腐蚀过程的电化学噪声分析[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2009, 21(1): 15-19.
- 4 Shi Huiying, Chen Zishan, Zhang Jumei, *et al.*. Formation mechanism of twins in AZ61 magnesium alloy during aging[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2009, 29(9): 867-869.
时惠英, 陈梓山, 张菊梅, 等. 时效处理 AZ61 铸造镁合金中孪晶的形成机理[J]. *特种铸造及有色合金*, 2009, 29(9): 867-869.
- 5 Liu Zheng, Liu Chongyang, Wang Zhongguang, *et al.*. Influence of solution and aging on mechanical properties of AZ91HP die-casting alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1999, 35(8): 869-873.
刘正, 刘重阳, 王中光, 等. 固溶和时效对压铸 AZ91HP 合金力学性能的影响[J]. *金属学报*, 1999, 35(8): 869-873.
- 6 Zhang Yongkang, Chen Jufang, Xu Renjun. Experimental research of laser shock strengthening AM50 magnesium alloy[J]. *Chinese J Laser*, 2008, 35(7): 1068-1072.
张永康, 陈菊芳, 许仁军. AM50 镁合金激光冲击强化实验研究[J]. *中国激光*, 2008, 35(7): 1068-1072.
- 7 Huang Shu, Zhou Jianzhong, Jiang Suqin, *et al.*. Study on strain hardening and fatigue fracture of AZ31B magnesium alloy after laser shot peening[J]. *Chinese J Laser*, 2011, 38(8): 0803002.
黄舒, 周建忠, 蒋素琴, 等. AZ31B 镁合金激光喷丸后的形变强化及疲劳断口分析[J]. *中国激光*, 2011, 38(8): 0803002.
- 8 Yu Shuisheng, Yao Hongbing, Wang Fei, *et al.*. Influence of interaction parameters on high power laser induced shockwave in magnesium alloy[J]. *Chinese J Laser*, 2010, 37(5): 1386-1390.
于水生, 姚红兵, 王飞, 等. 作用参数对镁合金中强激光诱导冲击波的影响[J]. *中国激光*, 2010, 37(5): 1386-1390.
- 9 Xiang Jianyun, Ge Maozhong. Effect of laser shock processing on surface quality of AZ31B magnesium alloy[J]. *Electromachining & Mould*, 2012, 4: 26-29.
项建云, 葛茂忠. 激光冲击处理对 AZ31B 镁合金表面质量的影响[J]. *电加工与模具*, 2012, 4: 26-29.
- 10 Zhang Yongkang, You Jian, Lu Jinzhong, *et al.*. Effects of laser shock processing on stress corrosion cracking susceptibility of AZ31B Magnesium alloy[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2010, 204(24): 3947-3953.
- 11 Ge Maozhong, Zhang Yongkang, Xiang Jianyun. Research on laser shock strengthening and stress corrosion cracking resistance of AZ31B magnesium alloy[J]. *Chinese J Laser*, 2010, 37(11): 2925-2930.
葛茂忠, 张永康, 项建云. AZ31B 镁合金激光冲击强化及抗应力腐蚀研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(11): 2925-2930.
- 12 Ge Maozhong, Xiang Jianyun, Zhang Yongkang. Effect of laser shock processing on resistance to stress corrosion cracking of tungsten inert-gas welded AZ31B magnesium alloy[J]. *Chinese J Laser*, 2012, 39(12): 1203007.
葛茂忠, 项建云, 张永康. 激光冲击处理对 AZ31B 镁合金焊接件抗应力腐蚀的影响[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1203007.
- 13 Li Xingcheng, Zhang Yongkang, Chen Jvfang, *et al.*. Effect of laser shock processing on stress corrosion cracking behavior of AZ31 magnesium alloy at slow strain rate[J]. *Materials Science and Technology*, 2013, 29(5): 626-630.
- 14 Li Shaozhe, Zhang Lingfeng, Xing Qingpu. Effect of laser shock processing on electrochemical corrosion behavior of AZ91magnesium alloy [J]. *Chinese J Laser*, 2014, 40(5): 0503004.
李少哲, 张凌峰, 邢清浦. 激光冲击强化对 AZ91 镁合金的电化学腐蚀行为的影响[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0503004.
- 15 Wang Yapeng, Sun Kai. Organization analysis of modified layer on AZ91D magnesium alloy surface and effect research on corrosion resistance[J]. *Surface Technology*, 2010, 39(3): 60-62.
王亚鹏, 孙凯. AZ91D 镁合金表面改性层组织分析及其对耐腐蚀性影响的研究[J]. *表面技术*, 2010, 39(3): 60-62.
- 16 Gao Fuyong, Zhao Ming, He Guangping, *et al.*. Numerical study on the micro-galvanic corrosion of AZ31 magnesium alloy [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2013, 35(5): 634-641.
高福勇, 赵明, 何广平, 等. AZ31 镁合金微区电偶腐蚀的数值研究[J]. *北京科技大学学报*, 2013, 35(5): 634-641.

栏目编辑: 韩峰