

激光冲击强化对 AZ31 和 AZ91 镁合金表面形貌和电化学腐蚀性能的影响

张青来¹, 鲍士喜¹, 王 荣¹, 钱 阳¹, 张永康², 李兴成¹

(1. 江苏大学 材料科学与工程学院, 镇江 212013;

2. 东南大学 机械工程学院, 南京 210096)

摘 要: 为了研究激光冲击强化对镁合金表面形貌和电化学腐蚀性能的影响, 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 热轧板和 AZ91-T6 铸造镁合金在 3.5%NaCl(质量分数)溶液中的动态极化曲线和电化学阻抗谱特征, 并对镁合金三维表面形貌、腐蚀试样宏观形貌、自腐蚀电位和电化学阻抗谱进行测试与分析。结果表明: 激光冲击改善 AZ31 热轧板和 AZ91-T6 镁合金的耐蚀性。当激光功率密度处于 0.6~0.9 GW/cm² 区间, 镁合金腐蚀电位和电流密度分别出现峰值和谷值; 当功率密度不小于 1.0 GW/cm² 时, 镁合金腐蚀电位和电流密度分别正负移动, 与冲击表面的形变、钝化膜和形貌密切相关。

关键词: 镁合金; 激光冲击强化; 表面形貌; 钝化膜; 电化学腐蚀性能

中图分类号: TN249; TG146.2

文献标志码: A

Effect of laser shock processing on surface morphology and electrochemical corrosion resistance of AZ31 and AZ91 alloys

ZHANG Qing-lai¹, BAO Shi-xi¹, WANG Rong¹, QIAN Yang¹, ZHANG Yong-kang², LI Xing-cheng¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to study the effect of laser shock processing (LSP) on the surface morphology and electrochemical corrosion resistance of magnesium alloys, the dynamic polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) of specimens of hot rolled sheet of AZ31 alloy and AZ91-T6 cast alloy in 3.5%NaCl (mass fraction) solution were investigated by electrochemical method and Nd:glass laser with the wavelength of 1064 nm and pulse width of 20 ns. The 3D surface morphology, macroscopic morphology of corrosion specimens, corrosion potential and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) were also examined and analyzed. The results show that the corrosion resistance of hot rolled AZ31 alloy sheet and AZ91-T6 cast alloy are improved by LSP. When the laser power density is in the range from 0.6 GW/cm² to 0.9 GW/cm², the peaks and valleys of the corrosion potential and the current density of magnesium alloy appear, respectively. When the power density is not less than 1.0 GW/cm², the corrosion potential and current density of magnesium alloy begin to move towards positive and negative directions, respectively, which are closely related to the deformation, passivating film and morphology of the impact surface.

Key words: magnesium alloys; laser shock processing; surface morphology; passivating film; electrochemical corrosion resistance

由于镁合金耐腐蚀性很差,在潮湿和含 Cl^- 环境中容易发生严重的腐蚀,腐蚀问题被认为是目前发展镁合金的核心问题,主要集中在 AZ31 和 AZ91 镁合金在 Cl^- 环境中相结构、微观形态与电化学行为研究^[1-5]。

激光冲击处理(LSP)作为一种新型的材料表面改性技术,由于表层形变、微观结构改变和产生的残余压应力主要体现在提高材料的耐疲劳性能和耐腐蚀性能方面^[6-9]。激光冲击波能量分布的不均匀性对材料的表面粗糙度和表面形貌产生明显的影响。黄舒等^[10]和葛茂忠等^[11]对 AZ31 镁合金激光冲击强化实验进行研究,激光冲击区表层产生大量位错与孪晶,晶粒明显细化,表面产生残余压应力,表面的显微硬度比基体的提高约 58%,抗应力腐蚀和耐疲劳性能均得到提高。张永康等^[11-14]通过三点加载方法和慢应变速率法研究 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^[15]采用电化学方法研究激光冲击 AZ91 铸造镁合金在 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,激光冲击对镁合金的电化学腐蚀性能的影响方面研究还比较少,有待进一步完善。

本文作者将对 AZ31 热轧板和 AZ91-T6 铸造镁合金进行激光冲击强化试验,利用电化学方法和光学轮廓仪对 LSP 后镁合金表面形貌、极化曲线和电化学阻抗谱进行测试,研究激光冲击对镁合金的电化学腐蚀性能影响,并对其腐蚀机理进行了分析。

1 实验

电化学试验用材料为 AZ31 热轧板和 AZ91 连铸棒材。AZ31 热轧板按 300 °C、30 min、AC 制度进行退火处理。AZ91 铸态镁合金时效制度(T6): 420 °C、14 h、AC 固溶和 200 °C、15 h、AC 时效处理。为了防止镁合金在潮湿空气环境中氧化和大气腐蚀,激光冲击实验前对镁合金靶材表面进行钝化处理,形成钝化膜。实验中选用流动的水和厚度为 100 μm 的专用铝箔分别作为约束层和吸收层。实验用激光器参数如下:最大输出脉冲能量为 6 J、脉宽 20 ns 和波长为 1064 nm。采用不同功率密度激光对镁合金靶材进行激光冲击强化,光斑直径为 3 mm,50%搭接方式,冲击面积(即电化学试样工作面积)均为 1 cm^2 。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 : $I = 4E/(\pi\tau D^2)$ (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 CH1660E 的电化学工作站测量。试样焊接铜导线,非工作面用环氧树脂密封。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%NaCl(质量分数)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 Tafel 曲线和交流阻抗(Electrochemical impedance spectroscopy, 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 V,电化学阻抗测试频率范围 0.5 Hz~10 kHz。

采用 VEECO WYKO NT1100 型光学轮廓仪和 X350A 型 X 射线应力仪分别对镁合金靶材表面形貌和表面残余应力进行测试。利用 LEICA DM2500M 型正置透反射光学显微镜和 JEOL JSEM-7001F 热场发射高分辨率电镜对镁合金微观组织进行观察和分析。

2 实验结果

2.1 AZ31 镁合金板材的电化学性能

2.1.1 功率密度的影响

图 1 所示为不同功率密度 LSP 后 AZ31 镁合金热轧板在 3.5%NaCl 溶液中的极化曲线和电化学阻抗谱。由图 1 可知,热轧板的极化曲线和电化学阻抗谱并不随着激光功率密度增加按规律变化。当较小的功率密度激光冲击强化时,合金的极化曲线正向移动,电化学阻抗弧逐渐增加;当功率密度达到 0.7 GW/cm^2 时,阻抗弧开始减小,是一个拐点,如图 1(a)和(b)所示。当功率密度不小于 1.0 GW/cm^2 时,极化曲线正负移动方向不同,功率密度微小变化将改变了极化曲线移动方向和电化学阻抗弧的大小,例如功率密度为 1.0 GW/cm^2 激光冲击镁合金的电化学阻抗弧大于未激光冲击的;当激光功率密度大于 1.25 GW/cm^2 时,阻抗弧随之减小,且均小于未冲击强化的,如图 1(c)和(d)所示。

图 2 所示 AZ31 镁合金热轧板在 3.5%NaCl 溶液中的腐蚀电位 φ_{corr} 、腐蚀电流密度 J_{corr} 和激光功率密度之间关系。由图 2 可观察到,腐蚀电位 φ_{corr} 随着功率密度增加而增加。当功率密度在 0.6~0.9 GW/cm^2 区间时,腐蚀电位 φ_{corr} 有一峰值,而腐蚀电流密度最小,其 J_{corr} 值为 0.04 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 左右,电化学耐蚀性增加;当功率密度在 1.25 GW/cm^2 左右时,腐蚀电位有一谷值,腐蚀电流密度仍很小,其 J_{corr} 值为 0.85 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$,电化学耐蚀性稍微变差;当功率密度增至 1.5 GW/cm^2 时,腐蚀电位和电流密度均增加,特别是腐蚀电流密度

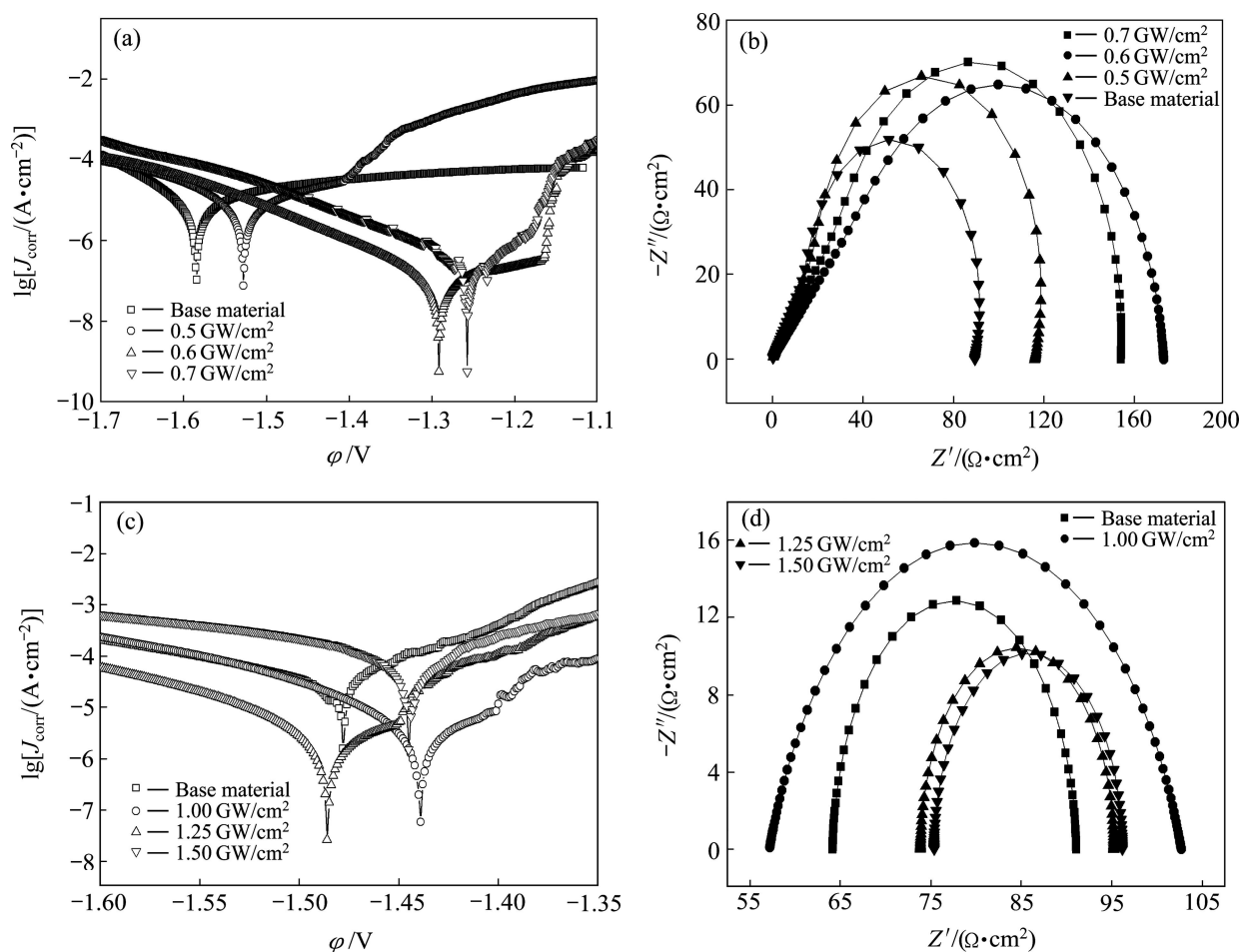


图1 LSP处理后AZ31镁合金热轧板在3.5%NaCl溶液中的极化曲线和电化学阻抗谱

Fig. 1 Polarization and EIS curves of hot rolled sheet of AZ31 alloy by LSP in 3.5% NaCl solution: (a), (c) Tafel curves; (b), (d) EIS curves

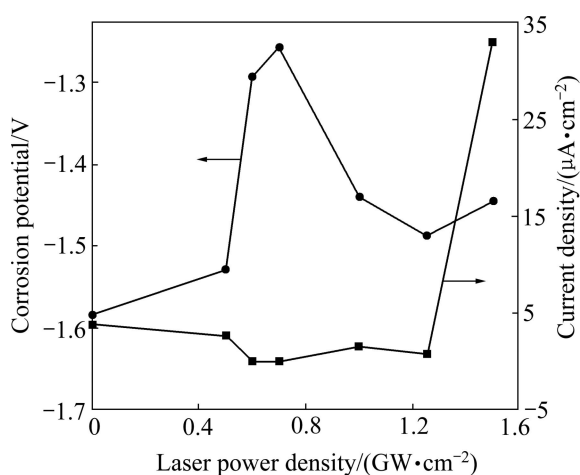


图2 AZ31镁合金热轧板在3.5%NaCl溶液中腐蚀电位、电流密度和激光功率密度之间关系

Fig. 2 Relationship among laser shock density, current density and corrosion potential of AZ31 alloy hot rolled sheet in 3.5%NaCl solution

J_{corr} 快速增至 $32.96 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

图3所示为AZ31镁合金热轧板在3.5%NaCl溶液腐蚀试样表面的宏观形貌。从图3试样表面点蚀状态可观察到激光功率密度对电化学耐蚀性的影响程度,其耐蚀性由大到小的顺序为 $1.0 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 、 $1.25 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 、 $1.5 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 、未强化镁合金,即激光冲击改善了镁合金耐蚀性,这一结果与试样表面膜密切相关。

2.1.2 表面形貌的影响

图4和5所示分别为不同功率密度激光冲击后AZ31镁合金热轧板冲击区局部三维表面形貌及表面粗糙度。由图4和5可见,随着激光功率密度的增加,表面塑性变形随之增大,表面粗糙度却先增后减。当功率密度为 $1.25 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 时,则表面形变峰值 R_p 为 $5.05 \mu\text{m}$,谷值 R_v 为 $-4.57 \mu\text{m}$,表面粗糙度 $R_a(R_a=R_p-R_v)$ 为 $9.57 \mu\text{m}$,峰值后表面粗糙度随之降低。虽然功率密度为 $1.25 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 时的表面形变量大于功率密度为 $1.5 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 时的表面形变量,但其表面形成的凹坑数

量却大于功率密度为 1.25 GW/cm^2 时形成的凹坑数量, 这样 Cl^- 能够在凹坑聚集的机会增多, 其结果导致镁合金的腐蚀速度随之增加。

2.2 T6 时效 AZ91 镁合金的电化学性能

2.2.1 功率密度的影响

图 6 所示为不同功率密度 LSP 后 AZ91-T6 镁合金

在 $3.5\% \text{NaCl}$ 溶液中的极化曲线和电化学阻抗谱。图 7 所示为 AZ91-T6 镁合金在 $3.5\% \text{NaCl}$ 溶液中的腐蚀电位 ϕ_{corr} 、腐蚀电流密度 J_{corr} 和激光功率密度之间关系。由图 6 和 7 可知, 随着激光功率密度的增加, 时效镁合金的极化曲线发生正向或负向移动, 电化学阻抗弧逐渐减小。当激光功率密度为 1.0 GW/cm^2 时, 极化曲线正向移动, 此时腐蚀电位 ϕ_{corr} 和电流密度 J_{corr} 均远

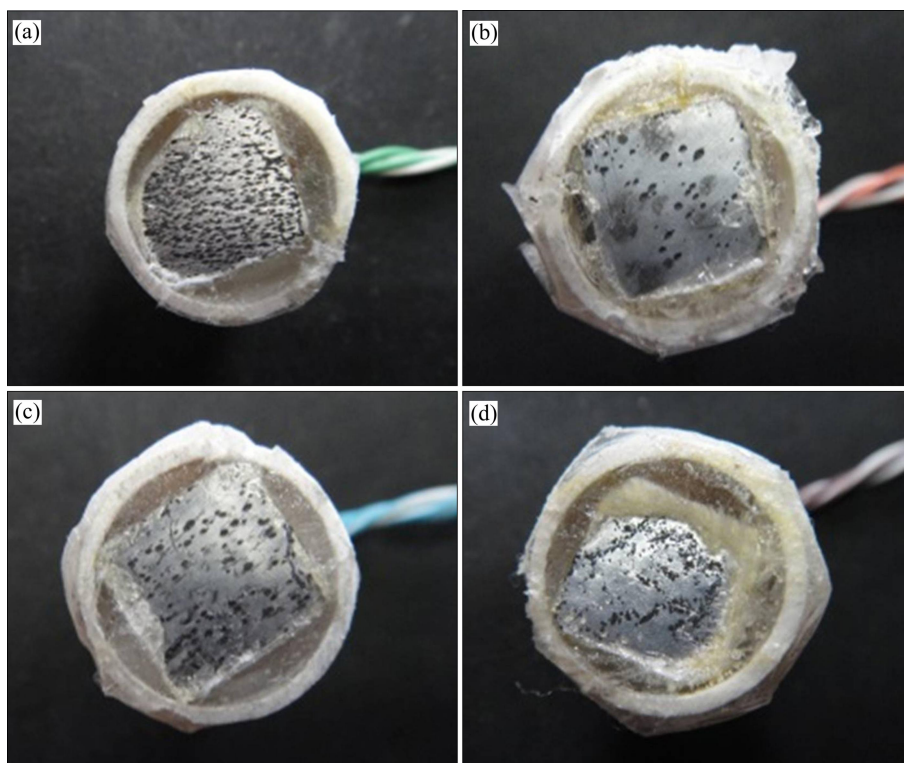


图 3 不同功率密度 LSP 后 AZ31 镁合金热轧板在 $3.5\% \text{NaCl}$ 溶液腐蚀试样表面的宏观形貌

Fig. 3 Macrophenologies of electrochemical corrosion specimens of AZ31 alloy hot rolled sheet in $3.5\% \text{NaCl}$ solution after LSP at different power densities: (a) Base material; (b) 1.0 GW/cm^2 ; (c) 1.25 GW/cm^2 ; (d) 1.5 GW/cm^2

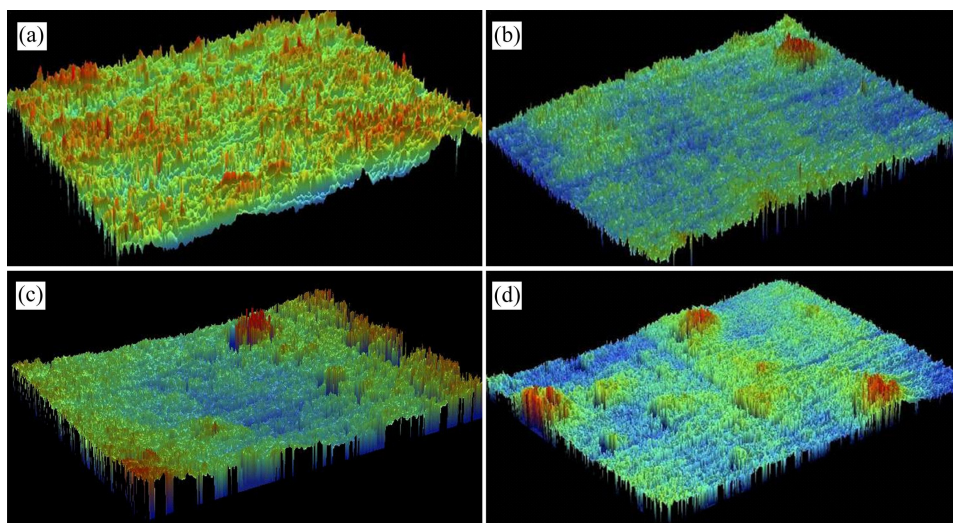


图 4 不同功率密度 LSP 后 AZ31 热轧板微区局部三维表面形貌

Fig. 4 Local three-dimensional surface morphologies of AZ31 alloy hot rolled sheet after LSP at different power densities: (a) 0.7 GW/cm^2 ; (b) 1.0 GW/cm^2 ; (c) 1.25 GW/cm^2 ; (d) 1.5 GW/cm^2

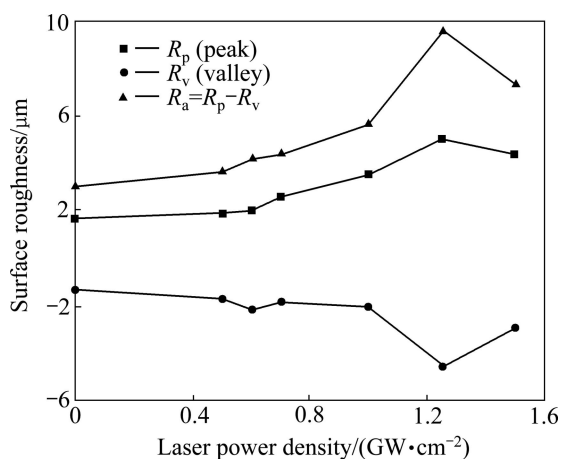


图5 不同功率密度激光冲击后AZ31镁合金冲击区域局部表面粗糙度

Fig. 5 Surface roughness of impact local zone of AZ31 alloy sheet after LSP by different power densities

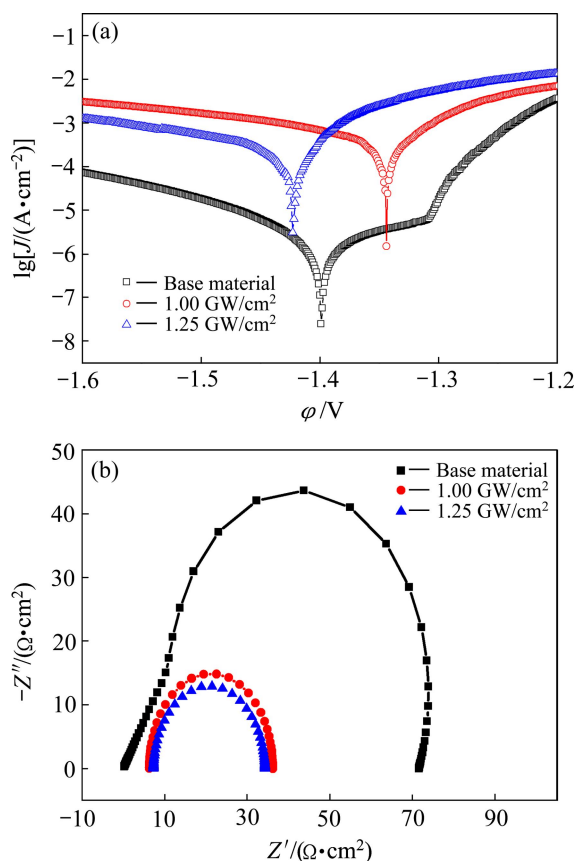


图6 LSP处理后AZ91-T6镁合金在3.5%NaCl溶液中的极化曲线和电化学阻抗谱

Fig. 6 Polarization(a) and EIS(b) curves of AZ91-T6 alloy aged by LSP in 3.5%NaCl solution

高于时效态,分别增至 -1.345 V 和 $136\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$;当功率密度增至 $1.25\text{ GW}/\text{cm}^2$ 时,极化曲线负向移动,腐蚀电位 φ_{corr} 从 -1.379 V 降到 -1.421 V ,电流密度 J_{corr}

从 $0.8\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 快速增加到 $49.2\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$,但均高于功率密度为 $1.0\text{ GW}/\text{cm}^2$ 时的腐蚀电位和电流密度。对比AZ31合金,在相同冲击参数条件下,AZ91-T6镁合金表面 φ_{corr} 和 J_{corr} 变化幅度较大,这可能是由Al含量和析出相引起,如图2和7所示。

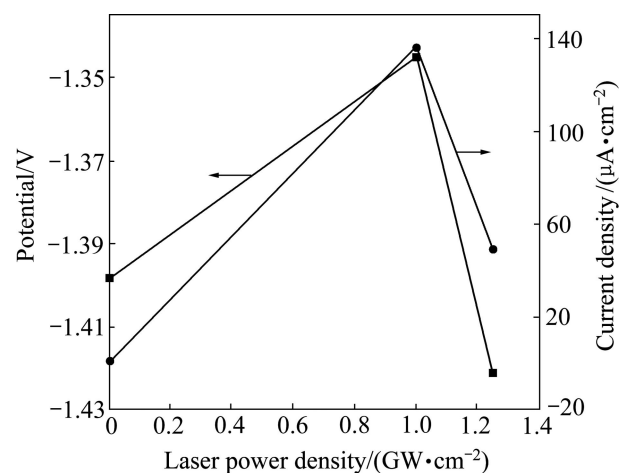


图7 AZ91-T6镁合金在3.5%NaCl溶液中腐蚀电位、电流密度和激光功率密度之间关系

Fig. 7 Relationships among laser shock density, current density and corrosion potential of AZ91-T6 alloy aged in 35%NaCl solution

图8所示为AZ91-T6镁合金在3.5%NaCl溶液腐蚀试样表面的宏观形貌。从图8试样表面点蚀状态可观察到激光功率密度对电化学耐蚀性的影响程度,其耐蚀性由大到小的顺序是 $1.0\text{ GW}/\text{cm}^2$ 、 $1.25\text{ GW}/\text{cm}^2$ 、时效镁合金,激光冲击对镁合金耐蚀性影响效果是相同的,不同的是腐蚀表面点蚀数量、深浅和分布,与 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相密切相关。

2.2.2 表面形貌的影响

图9所示为不同功率密度激光冲击后AZ91-T6镁合金的三维表面形貌。由图9可见,随着功率密度的增加,表面塑性变形随之增大,表面粗糙度 R_a 也逐渐增加,即 $13\text{ }\mu\text{m}$ 砂纸抛光后未激光冲击镁合金表面粗糙度 R_a 为 $3.22\text{ }\mu\text{m}$;功率密度为 $1.0\text{ GW}/\text{cm}^2$ 和 $1.25\text{ GW}/\text{cm}^2$ 时,激光冲击表面合金的表面粗糙度 R_a 分别为 $3.48\text{ }\mu\text{m}$ 和 $6.93\text{ }\mu\text{m}$ 。

综上所述,对比图3和图8中点蚀数量、形貌和分布可确定,AZ91-T6镁合金的耐蚀性高于AZ31热轧板的,而激光冲击改善了AZ31热轧板和AZ9-T6镁合金的耐蚀性,其耐蚀性由大到小的顺序为功率密度为 $1.0\text{ GW}/\text{cm}^2$ 的镁合金、功率密度为 $1.25\text{ GW}/\text{cm}^2$ 的镁合金、功率密度为 $1.5\text{ GW}/\text{cm}^2$ 的镁合金、未强化镁合金,这一结果是由于激光冲击在镁合金表面或表

层产生的残余压应力、晶粒细化及大量孪晶和高密度位错使被冲击表面改性而提高了钝化膜稳定性,提高了镁合金的耐蚀性。过高功率密度将引起被冲击表面严重的塑性变形,凹坑数量相应增加,将导致 Cl^- 离子在凹坑处聚集过多,加速了腐蚀速度和破坏表面膜。因此,镁合金耐蚀性并不随着激光功率密度的提高而增加。

3 分析与讨论

在 AZ31 镁合金板材热轧过程中,变形温度一般控制在 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,柱面和锥面等潜在的滑移系均被激活,发生动态再结晶,轧制后温度急剧降低,

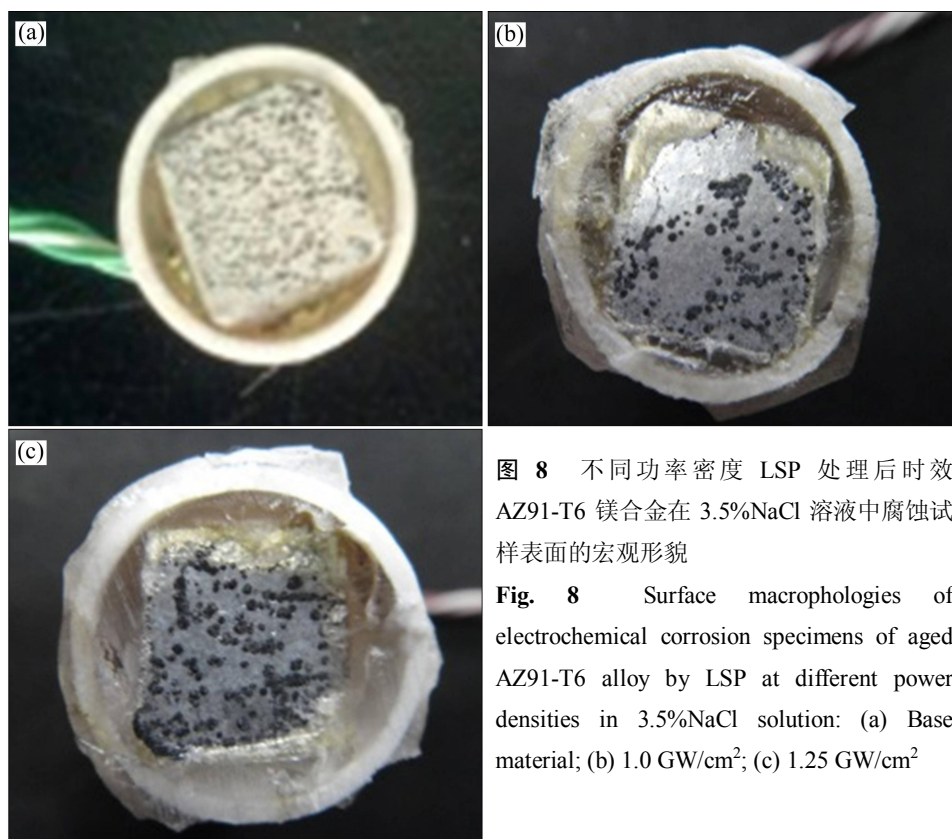


图 8 不同功率密度 LSP 处理后时效 AZ91-T6 镁合金在 3.5%NaCl 溶液中腐蚀试样表面的宏观形貌

Fig. 8 Surface macrophologies of electrochemical corrosion specimens of aged AZ91-T6 alloy by LSP at different power densities in 3.5%NaCl solution: (a) Base material; (b) 1.0 GW/cm^2 ; (c) 1.25 GW/cm^2

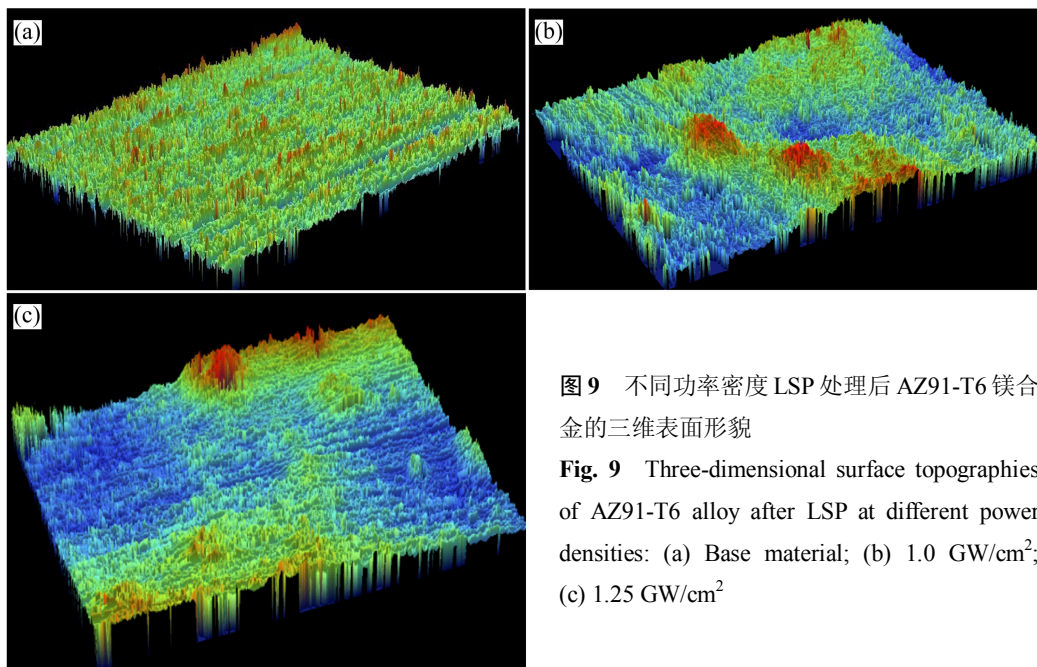


图 9 不同功率密度 LSP 处理后 AZ91-T6 镁合金的三维表面形貌

Fig. 9 Three-dimensional surface topographies of AZ91-T6 alloy after LSP at different power densities: (a) Base material; (b) 1.0 GW/cm^2 ; (c) 1.25 GW/cm^2

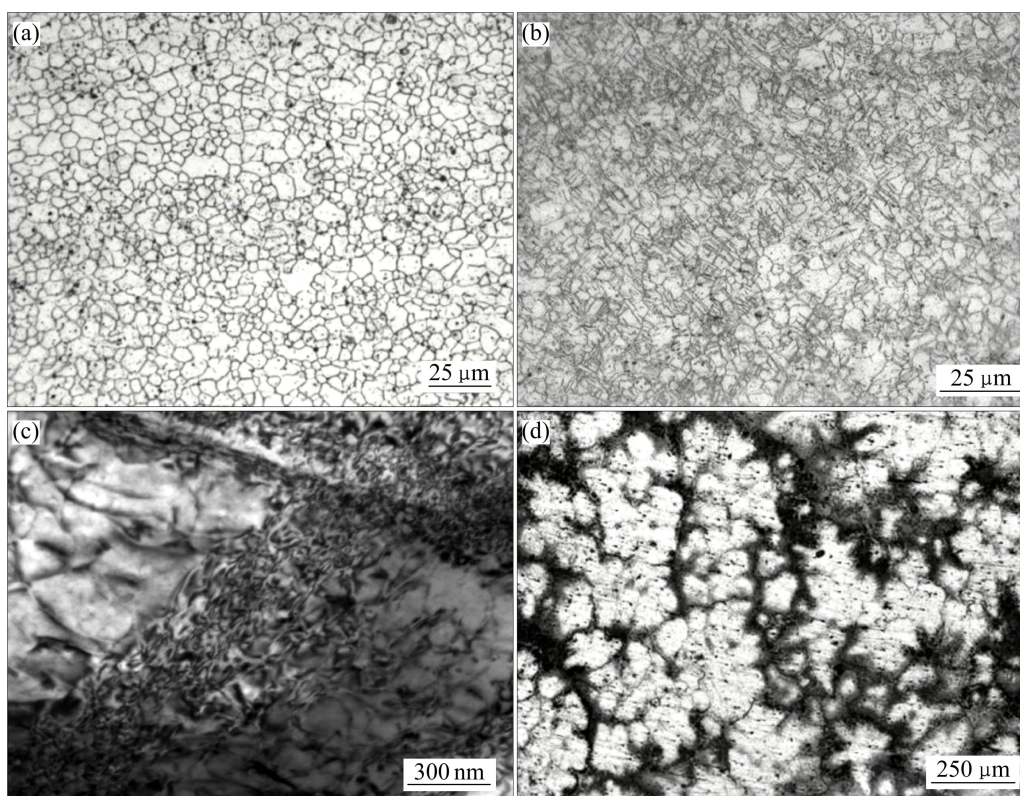


图 10 LSP 前后镁合金的微观组织

Fig. 10 Microstructures of magnesium alloy before and after LSP: (a) OM, AZ31 alloy without LSP; (b) OM, AZ91-T6 alloy after LSP; (c) OM, AZ31 alloy after LSP; (d) TEM, AZ31 aged alloy after LSP

β - $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相主要在晶界及其附近呈不连续析出。热轧板在 300 °C、30 min 退火过程中发生静态再结晶, 形成细小等轴晶粒(尺寸约为 5 μm), 在一定程度上消除了变形组织中的空位、位错等晶体缺陷, Al 原子的偏聚程度降低, 大量活性 β - $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相均匀分布于晶内及晶界上, 有效引发点蚀, 如图 3(a)和 10(a)所示。

AZ91 镁合金中 Al 含量(约 9%)高, 水冷连铸棒材显微组织由 α -Mg 基体和大量的连续或非连续网状的 β - $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相组成^[16]。固溶时效处理后, β - $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相完全溶解于 α -Mg 基体中, 形成单相过饱和的 α -Mg 固溶体, 细小颗粒状 β - $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相在冷却过程中析出, 时效过程中网状的 β - $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相主要沿晶界处不连续析出, 如图 10(b)所示。

在 Mg-Al 系合金中, 第二相主要是 β - $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相, β - $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相既可作为有效阴极相加速腐蚀, 也能阻碍阳极反应, 抑制腐蚀^[17]。AZ31 板材退火处理后, β - $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相析出量不足以阻碍腐蚀反应, AZ31 板材的点蚀比时效 AZ91 的严重, AZ31 板材的耐蚀性较时效 AZ91 的差, 如图 3(a)和 8(a)所示。这是因为 AZ31 合金中细小颗粒状 β - $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相均匀分布于晶内及晶界上, 作为阴极与 α -Mg 基体组成众多腐蚀微电池,

从而加速板材腐蚀。AZ91 镁合金的腐蚀过程^[18]主要分为 α -Mg 的溶解、微电偶腐蚀、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 钝化膜的形成及 β 相的机械阻挡, 其中 β 相含量为 13%(体积分数)时耐蚀性能最佳。

以功率密度为 1.0 GW/cm^2 激光冲击后, 用 X 射线应力仪测试激光冲击区内的表面残余应力, AZ31 和 AZ91 镁合金残余应力值分别为 -94 MPa(误差为 ± 10 MPa)和 -144 MPa(误差为 ± 24 MPa), 这是由于高能量激光冲击引起塑性变形, 在材料内部产生大量的高密度位错^[15], 导致晶格发生畸变, 表现为较高的残余压应力, 对材料耐蚀性的提高具有重要的作用。由图 10 还可观察到, LSP 后, AZ31 镁合金晶粒细化, 并形成大量高密度孪晶(如图 10(c)和(d)所示), 这可能也是提高其耐蚀性能的原因^[19]。因此, 激光冲击强化使镁合金表层改性, 改善了材料耐蚀性, 主要表现在残余压应力所引起的表面钝化, 即减缓了腐蚀速度。

激光功率密度对镁合金耐蚀性影响较大, 激光功率密度越大, 被冲击表面形变越大, 表面粗糙度也大, 凹坑数量越多, 以致使 Cl^- 离子在凹坑中聚集增多, 破坏表面膜, 导致腐蚀速度增加。腐蚀凹坑分布特征与 β - $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相析出密切相关, 如 AZ31 表面点蚀特

点呈离散型分布,而AZ91表面腐蚀特征是由点蚀构成的不连续腐蚀网沿晶界出现,如图3和8所示。镁合金在3.5%NaCl溶液中腐蚀试样表面发生的点蚀属于孔蚀,孔蚀发生的主要原因是晶界处的析氢以及沿晶界处的基体优先腐蚀脱落(见图11)。

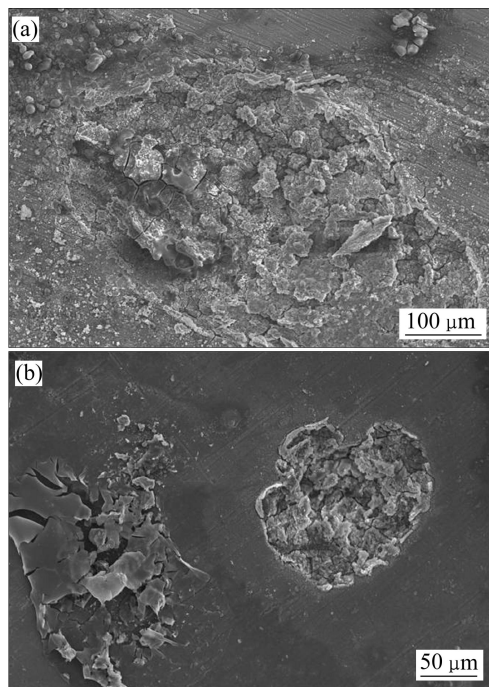


图11 镁合金腐蚀试样的SEM表面形貌

Fig. 11 SEM surface morphologies of electrochemical corrosion specimens of magnesium alloys by LSP: (a) AZ31 alloy; (b) AZ91-T6 aged alloy

4 结论

1) 激光冲击改善了AZ31镁合金热轧板的耐蚀性。当激光功率密度处于0.6~0.9 GW/cm²区间时, AZ31镁合金热轧板在3.5%NaCl溶液中的腐蚀电位和电流密度分别出现峰值和谷值,耐蚀性增加;当功率密度大于1.25 GW/cm²时,腐蚀电位和电流密度均增加,耐蚀性降低,但仍高于热轧态的。

2) 功率密度不小于1.0 GW/cm²时,激光冲击后, AZ91时效镁合金的电化学阻抗弧和腐蚀电流密度均小于未冲击的,腐蚀电位相对时效态发生正负方向移动,取决于功率密度大小,其耐蚀性由大到小的顺序为功率密度为1.0 GW/cm²的镁合金、功率密度为1.25 GW/cm²的镁合金、功率密度为1.5 GW/cm²的镁合金和未强化镁合金。

3) 随着激光功率密度增加,镁合金表面塑性变形

随之增大,表面粗糙度 R_a 也随之增加,出现表面凹坑。激光冲击使表面产生残余压应力,晶粒细化,产生大量孪晶和高密度位错,增加了表面钝化膜稳定性,提高了耐蚀性,而凹坑导致Cl⁻离子聚集浓度增加,加速了腐蚀速度,破坏表面膜,降低了耐蚀性。

REFERENCES

- [1] WANG Lei, SHINOHARA T, ZHANG Bo-ping. Corrosion behavior of Mg, AZ31, and AZ91 alloys in dilute NaCl solutions [J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2010, 14(10): 1897-1907.
- [2] SALMAN S A, ICHINO R, OKIDO M. A Comparative electrochemical study of AZ31 and AZ91 magnesium alloy [J]. International Journal of Corrosion, 2010, 2010: 1-7.
- [3] ZHANG Li-jun, ZHU Xu-bei, ZHANG Zhao, ZHANG Jian-qing. Electrochemical noise characteristics in corrosion process of AZ91D magnesium alloy in neutral chloride solution [J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(2): 496-503.
- [4] GONZALO G, NADINE P, BEMARD T, VINCENT V. Local and global electrochemical impedances applied to the corrosion behavior of an AZ91 magnesium alloy [J]. Corrosion Science, 2009, 51(8): 1789-1794.
- [5] WANG Lei, ZHANG Bo-ping, TADASHI S. Corrosion behavior of AZ91 magnesium alloy in dilute NaCl solutions [J]. Materials and Design, 2010, 31(2): 857-863.
- [6] ZHOU Liu-cheng, LI Ying-hong, HE Wei-feng, HE Guang-yu, NIE Xiang-fan, CHEN Dong-lin, LAI Zhi-lin, AN Zhi-bin. Deforming TC6 titanium alloys at ultrahigh strain rates during multiple laser shock peening [J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 578: 181-186.
- [7] LIN B, LUPTON C, SPANRAD S, SCHOFIELD J, TONG J. Fatigue crack growth in laser-shock-peened Ti-6Al-4V aerofoil specimens due to foreign object damage [J]. International Journal of Fatigue, 2014, 59: 23-33.
- [8] LU J Z, LUO K Y, ZHANG T K, SUN G F, GU Y Y, ZHOU J Z, REN X D, ZHANG X C, ZHANG L F, CHEN K M, CUI C Y, JIANG Y F, FENG A X, ZHANG L. Grain refinement mechanism of multiple laser shock processing impacts on ANSI 304 stainless steel [J]. Acta Materialia, 2010, 58: 5354-5362.
- [9] CHEN Kang-min, ZHANG Chen-chao, YUAN Zhi-zhong, LU Jin-zhong, REN Xu-dong, LUO Xin-min. Deformation microstructures of austenitic stainless steel 2Cr13Mn9Ni4 under ultrafast strain rate by laser shock processing [J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 587: 244-249.
- [10] 黄舒, 周建忠, 蒋素琴, 盛杰, 徐增闯, 阮鸿雁. 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): 1-7.

- HUANG Shu, ZHOU Jian-zhong, JIANG Su-qin, SHENG Jie, XU Zeng-chuang, YUAN Hong-yan. Study on strain hardening and fatigue fracture of AZ31B magnesium alloy after laser shot peening[J]. Chinese Journal of Laser, 2011, 38(8): 1-7.
- [11] 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.
- GE Mao-zhong, ZHANG Yong-kang, XIANG Jian-yun. Research on laser shock strengthening and stress corrosion cracking resistance of AZ31B magnesium alloy[J]. Chinese Journal of Laser, 2010, 37(11): 2925-2930.
- [12] ZHAN Yong-kang, YOU Jian, LU Jin-zhong, CUI Cheng-yun, JIANG Yin-fang, REN Xu-dong. Effects of laser shock processing on stress corrosion cracking susceptibility of AZ31B magnesium alloy[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204(24): 3947-3953.
- [13] 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, 39(12), 2012, 39(12): 1-7.
- 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 Journal of Laser, 2012, 39(12): 1-7.
- [14] LI Xing-cheng, ZHANG Yong-kang, CHEN Ju-fang, LU Ya-lin. 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.
- [15] 李少哲, 张凌峰, 邢清蒲. 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): 1-7.
- LI Shao-zhe, ZHANG Ling-feng, XING Qing-pu. Effect of laser shock processing on electrochemical corrosion behavior of AZ91 magnesium alloy[J]. Chinese Journal of Laser, 2014, 40(5): 1-7.
- [16] AUNG N N, ZHOU W. Effect of heat treatment on corrosion and electrochemical behaviour of AZ91D magnesium alloy[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2002, 32(12): 1397-1401.
- [17] 石凯, 王日初, 彭超群, 解立川, 金和喜, 冯燕, 陈雅谨. 退火温度对镁合金阳极板材组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(6): 1642-1649.
- SHI Kai, WANG Ri-chu, PENG Chao-qun, JIE Li-chuan, JIN He-xi, FENG Yan, CHEN Ya-jin. Effect of annealing temperatures on microstructure and properties of magnesium alloy anode sheet[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(6): 1642-1649.
- [18] 白力静, 张华, 袁颖, 杨欣, 王爱娟. β -Mg₁₇Al₁₂ 相含量对 AZ91 镁合金腐蚀行为的影响[J]. 西安理工大学学报, 2011, 27(1): 31-35.
- BAI Li-jing, ZHANG Hua, YUAN Ying, YANG Xin, WANG Ai-juan. Influence of β -Mg₁₇Al₁₂ phase content on corrosion behavior of AZ91 magnesium alloy[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(1): 31-35.
- [19] 邢清蒲, 张凌峰, 李少哲, 鲁金忠. 激光冲击强化对 2A02 铝合金电化学腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2013, 25(5): 402-405.
- XING Qing-pu, ZHANG Ling-feng, LI Shao-zhe, LU Jin-zhong. Effect of laser shock processing on electrochemical corrosion behavior of 2A02 aluminum alloy[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2013, 25(5): 402-405.

(编辑 李艳红)