

# 激光冲击处理对 AZ31B 镁合金焊接件抗应力腐蚀的影响

葛茂忠<sup>1,2</sup> 项建云<sup>1,2</sup> 张永康<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013  
<sup>2</sup>常州轻工职业技术学院模具系, 江苏 常州 213164)

**摘要** 为了研究激光冲击处理对镁合金焊接件应力腐蚀性能的影响,采用激光波长 1064 nm,脉冲宽度 15 ns,脉冲能量 4 J,光斑直径 3 mm 的钕玻璃脉冲激光器,对 AZ31B 镁合金交流氩弧焊接件表面进行冲击处理。室温下采用三点加载的方式,在去离子水中对试样进行应力腐蚀实验。利用光学显微镜和透射电镜观测激光冲击试样微观结构,利用扫描电镜观测应力腐蚀断口。实验结果表明:根据优化的激光参数,能在试样表面制得纳米结构表层,样品表面纳米晶粒大小为 35 nm 左右;激光冲击处理改变了试样表面的应力状态,由残余拉应力 60 MPa 转变为残余压应力 -125 MPa;激光冲击处理后自腐蚀电位增大 88 mV,腐蚀电流减小了 73.4%,从而降低试样腐蚀倾向;未激光冲击的试样在浸没了 192 h 后出现应力腐蚀开裂,而激光冲击的试样在浸没了 10 个月未出现裂纹,这表明激光冲击处理能够提高 AZ31B 镁合金焊接件抗应力腐蚀的能力。

**关键词** 激光技术;激光冲击处理;AZ31B 镁合金;交流氩弧焊;纳米结构表层;残余压应力;应力腐蚀开裂

**中图分类号** TN249;TG156.99 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1203007

## Effect of Laser Shock Processing on Resistance to Stress Corrosion Cracking of Tungsten Inert-Gas Welded AZ31B Magnesium Alloy

Ge Maozhong<sup>1,2</sup> Xiang Jianyun<sup>1,2</sup> Zhang Yongkang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China  
<sup>2</sup>Mould Department, Changzhou Institute of Light Industry Technology, Changzhou, Jiangsu 213164, China)

**Abstract** In order to study the effect of laser shock processing (LSP) on the stress corrosion cracking (SCC) of welded magnesium alloy, tungsten inert-gas (TIG) welded AZ31B magnesium alloy sheets surface is processed using Nd:YAG laser with a wavelength of 1064 nm, a pulse width of 15 ns, a pulse energy of 4 J and a spot diameter of 3 mm. At room temperature, the SCC susceptibility of the weldment samples with and without laser treatment is assessed by three points loading method in deionized water. The microstructure of specimens by LSP and fracture surfaces are analyzed by optical microscopy (OM), transmission electron microscope (TEM) and scanning electron microscope (SEM), respectively. The results show that a nanostructured surface layer can be produced on welded AZ31B Mg alloys by using optimized laser parameters and surface nano grain size is about 35 nm. The surface residual stress is converted from tensile stress (60 MPa) to compressive stress (-125 MPa). LSP can reduce the corrosion trend of the weldment samples because corrosion potential increases by 88 mV and corrosion current decreases by 73.4% as compared to the samples without LSP. SCC appears on samples without laser treatment after 192 h of immersion, however, no cracks is observed on samples treated by laser after 10 months, which shows that LSP can obviously improve the resistance to stress corrosion cracking of TIG welded AZ31B magnesium alloy.

**Key words** laser technique; laser shock processing; AZ31B Mg alloy; tungsten inert-gas welding; nanostructured surface layer; residual compressive stress; stress corrosion cracking

**OCIS codes** 140.3390; 140.3538; 140.3540; 140.3580; 350.3850

收稿日期: 2012-07-30; 收到修改稿日期: 2012-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(50735001, 50675089, 50975127)资助课题。

作者简介: 葛茂忠(1970—),男,博士研究生,副教授,主要从事激光表面改性方面的研究。E-mail: gmzxjy@126.com

导师简介: 张永康(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事激光先进制造与检测技术等方面的研究。

E-mail: ykzhang@ujs.edu.cn

# 1 引 言

零件在服役期间往往受到应力的作用,这种应力可以是加工(如焊接、轧制等)应力、外加应力或装配应力等,再加上特定的工作环境,容易产生应力腐蚀(SCC)开裂<sup>[1]</sup>。由于应力腐蚀开裂前不会产生明显的塑性变形,人们很难对其加以预防,因而危害性更大,破坏性更强。目前,应力腐蚀导致的工程结构的破坏,已危害到航空、航天、交通、化工等领域,常常造成巨大的经济损失和灾难性后果<sup>[1]</sup>。而镁合金作为最轻的结构构件,具有特定的强度和刚度、密度小、吸振性能好、屏蔽性好、易回收等优点<sup>[2]</sup>。近年来,随着各国节能减排法规的出台,镁合金被广泛应用于航空航天及交通等领域。镁属于密排六方晶体结构,层错能小,滑移系少,镁合金中的位错易形成平面状结构,该位错结构对应力腐蚀敏感<sup>[3]</sup>。另外,镁的化学性质活泼,在特定的环境和一定的应力共同作用下,易产生应力腐蚀,从而限制了镁合金的推广使用。

焊接作为材料连接方式之一,被广泛应用于镁合金零件的生产中。目前,镁合金已采用的焊接方法有:交流氩弧(TIG)焊、激光焊及摩擦焊等,但生产上最常用的还是交流氩弧焊。由于熔接焊工艺本身固有的特点,使得焊接接头和焊接热影响区(HAZ)存在较大的残余拉应力,从而加剧镁合金焊接件应力腐蚀倾向。

众所周知,材料的三种失效形式(腐蚀、磨损和疲劳)均与材料的表面性能有关。为了提高镁合金的表面性能,扩大镁合金在汽车及航空航天领域的应用范围,许多学者采用各种表面改性技术,如低温高速氧燃料微粒撞击<sup>[4]</sup>、表面机械研磨<sup>[5]</sup>及激光冲

击处理(LSP)等对镁合金进行处理,从而改变镁合金的表层显微结构,提高镁合金的表面性能。而激光冲击处理作为一种新型的材料表面改性技术,已经成功运用在铝合金<sup>[6]</sup>、钛合金<sup>[7]</sup>、不锈钢<sup>[8]</sup>及低碳钢<sup>[9]</sup>的表面改性中。但激光冲击处理镁合金的研究较少。张永康等<sup>[10]</sup>用激光冲击强化铸态 AM50 镁合金以提高其机械性能;葛茂忠<sup>[11]</sup>采用激光冲击处理 AZ31B 变形镁合金以提高其抗应力腐蚀的能力;黄舒等<sup>[12]</sup>采用波长为 1064 nm、脉冲宽度为 23 ns、脉冲能量为 20 J、光斑直径为 6 mm 的钕玻璃脉冲激光,冲击强化 AZ31B 镁合金以提高其疲劳寿命。但用激光冲击镁合金焊接件诱导其表层纳米化及其对抗应力腐蚀性能的影响未见报道。本文采用生产上常用的交流氩弧焊,根据优化的焊接工艺参数焊接商用的 AZ31B 变形镁合金;利用钕玻璃脉冲激光对 AZ31B 镁合金焊接件进行冲击处理;在去离子水中采用三点加载方式进行应力腐蚀实验;并对微观组织、残余应力及抗应力腐蚀机理进行研究与探讨。

## 2 实验材料及方法

### 2.1 试样制备

实验采用厚度为 2.2 mm 的轧制态 AZ31B 镁合金板材,其具体化学成分和机械性能见表 1<sup>[11]</sup>。采用交流氩弧对接焊,单面焊接双面成型,不开坡口,优化后的焊接参数为:焊接电流 45~50 A,钨极直径  $\phi 2$  mm,焊丝直径  $\phi 2$  mm,保护气体流量 8~10 L/min。根据 GB/T228-2002《金属材料室温拉伸试验》标准,在室温下通过拉伸实验测得 AZ31B 焊接件的屈服强度为 140 MPa,抗拉强度为 209 MPa。

表 1 AZ31B 镁合金的化学成分(质量分数,%)和机械性能

Table 1 Chemical compositions (mass fraction, %) and mechanical properties of AZ31B magnesium alloy

Al /%	Mn /%	Zn /%	Fe /%	Si /%	Be /%	Cu /%	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta$ /%
3.19	0.334	0.81	0.005	0.02	0.01	0.005	300	220	18

根据 ASTM39-79《弯曲梁应力腐蚀试样制备和应用标准方法》,将厚度为 2.2 mm 的轧制 AZ31B 镁合金焊接件薄板用线切割机床加工成尺寸为 135 mm×30.2 mm×2.2 mm 的试样,保证试样的长度方向与轧制方向平行,用砂轮打磨焊接凸台,再用砂纸逐级打磨试样表面,保证最终尺寸为 135 mm×30 mm×2 mm,然后用乙醇清洗,接着用冷风吹干<sup>[11]</sup>。

极化曲线测量试样采用线切割加工,尺寸为 10 mm×10 mm×2 mm,工作表面为 10 mm×

10 mm 的平面,其余表面用 704 硅胶封装。试样分为两组,一组是未激光冲击试样,工作表面需用金相砂纸逐级打磨;另一组为激光冲击试样,工作表面为激光冲击面,不能打磨。两组试样先用乙醇脱脂,接着用冷风吹干,确保试样表面清洁干燥。

### 2.2 实验仪器

在江苏大学强激光冲击实验室采用钕玻璃脉冲激光,激光脉冲波长 1.064  $\mu\text{m}$ ,有效光斑直径为 2.5~13.0 mm,功率密度为  $10^8 \sim 10^9$  W/cm<sup>2</sup>,其他性能指标有:1) 激光脉冲能量  $\geq 12$  J;2) 激光脉冲

宽度 $\leq 15$  ns;3) 激光脉冲峰值功率 $\geq 1.2 \times 10^9$  W;4) 激光脉冲能量输出不稳定度 $\leq \pm 10\%$ ;5) 发散角 $\leq 10$  mrad;6) 工作重复频率 $\leq 5$  Hz。采用 XJL-02 立式金相显微镜观察、拍摄金相组织;利用 X-350A 型 X 射线应力仪测试表面残余应力,其工作原理为:当试样中存在残余应力时,晶面间距将发生改变,发生布拉格衍射时,产生的衍射峰也将随之移动,而且移动距离的大小与应力大小有关。用波长为  $\lambda$  的 X 射线,先后数次以不同的入射角照射到试样上,测出相应的衍射角  $2\theta$ , 求出  $2\theta$  对  $\sin^2 \psi$  的斜率,便可算出应力。其测量参数为:管电压 20 kV,管电流 5 mA,钴靶  $K\alpha$  特征辐射,准直管直径  $\phi = 2$  mm,阶梯扫描步进角  $0.1^\circ$ ,时间常数 1 s,侧倾角  $\psi$  分别取  $0^\circ$ 、 $25^\circ$ 、 $35^\circ$  和  $45^\circ$ ,应力测试晶面为 (104),应力常数  $K = -78$  MPa/ $(^\circ)$ ,扫描起始及终止角分别为  $159^\circ$  和  $144^\circ$ <sup>[11]</sup>;采用 JEM-2100 高反 (HR) 高分辨透射电镜 (TEM) 观察样品表层的微观组织。TEM 样品的制备:先用线切割在激光冲击区域加工出  $10$  mm $\times 10$  mm $\times 2$  mm 样品,再用金相砂纸打磨减薄未激光冲击一侧,当厚度为  $120$   $\mu$ m 左右时,再用 Gatan 公司生产的圆片打孔机 (型号:659) 冲裁出  $\phi 3$  mm 的样品,用手工逐级研磨至厚度为  $40$   $\mu$ m 左右,最后采用美国 Gatan 公司生产的离子减薄仪 (型号:691) 进行离子减薄 (先用大角度再用小角度轰击未激光冲击一侧,但激光冲击一侧,只需用大角度轰击一次即可,目的是保证试样厚度均匀,便于观测)。采用 JSM-7001F 热场发射扫描电镜 (SEM) 扫描应力腐蚀断口。采用上海辰华仪器有限公司生产的 CHI660B 型电化学工作站测定 AZ31B 镁合金焊接件热影响区激光冲击前后的动电位极化曲线。

### 2.3 激光冲击实验

根据 ASTM39-79《弯曲梁应力腐蚀试样制备和应用标准方法》,采用三点加载试样,所以设计专用夹具来装夹镁合金薄板,考虑到镁合金易与其他金属形成电偶腐蚀,故选用尼龙作为夹具材料<sup>[11]</sup>。在制备好的镁合金焊接件待冲击区粘贴铝箔并压实,最后将其安装在夹具上,使试样外表面所承受的最大应力为  $140$  MPa (屈服应力),为了防止镁合金薄板在冲击过程中失稳变形,故采用双层镁合金薄板 (如图 1 所示)<sup>[11]</sup>。根据文献<sup>[11]</sup>提出的激光冲击工艺参数优化方法,得到优化的工艺参数:脉冲能量  $4$  J,光斑直径  $3$  mm,平均激光功率密度为  $3.86$  GW/cm<sup>2</sup>。采用优化后的工艺参数、 $3$  mm 厚水约束层和  $0.1$  mm 厚铝箔作为涂层进行冲击实验,激光光斑搭

接率  $50\%$  (如图 1 所示),激光冲击处理后,去除铝箔,并用乙醇清洗接着用冷风吹干<sup>[11]</sup>。

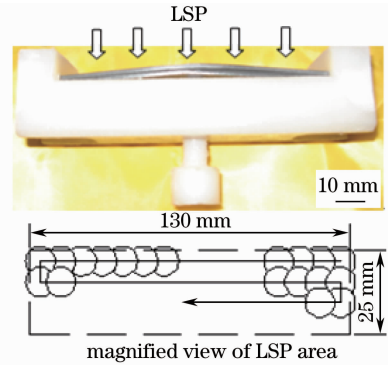


图 1 激光冲击三点加载试样

Fig. 1 Three points loading sample with LSP treatment

### 2.4 应力腐蚀实验

在室温下,将固定在夹具上的激光冲击以及未激光冲击的镁合金焊接件试样同时浸没在装有去离子水 (pH 值在 5 左右) 的容器中进行应力腐蚀实验,为了确保化学腐蚀反应不断进行,必须控制 pH 值,使其小于 11<sup>[1]</sup>,因此,每隔三天换一次去离子水<sup>[11]</sup>。定期观察实验现象,记录断裂时间,用丙酮溶液超声清洗断口后,再用扫描电镜观察断口形貌。

### 2.5 电化学实验

实验介质为  $3.5\%$  (质量分数) 的 NaCl 水溶液,采用分析纯 NaCl 和蒸馏水配制,溶液 pH 值为  $6 \sim 7$ 。采用三电极体系,工作电极为  $704$  硅胶镶嵌的 AZ31B 镁合金试样,面积为  $1$  cm<sup>2</sup>。参比电极为饱和甘汞电极 (SCE),辅助电极为 Pt 电极。测量温度为  $25$   $^\circ$ C。测量时,将工作电极浸入实验介质中  $5 \sim 10$  min,待工作电极电位稳定后,对试样以  $0.5$  mV/s 的速度进行动电位极化扫描,电位扫描范围为  $-1.9 \sim -1.2$  V。测量过程中,三电极体系不能受到外界的扰动,否则,会影响测量结果。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 焊接件微观组织

图 2 为激光冲击前 AZ31B 镁合金焊接接头横截面上的微观组织。图 2(a) 表明焊缝由熔池 (FZ)、热影响区和基体三部分组成。热影响区与熔池之间是粗大的柱状晶,并且柱状晶由热影响区朝着熔池中心生长。图 2(b) 表明熔池中间为大小均匀、呈等轴状的晶粒。图 2(c) 表明热影响区晶粒粗大,且晶粒大小不均匀。图 2(d) 为基体组织,主要由  $\alpha$ -Mg 相、少量沿晶界析出的  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相和少量分布于晶内的析出相组成。晶粒平均直径为  $20$   $\mu$ m 左右,

晶粒比较粗大,而且晶粒大小分布不均匀。

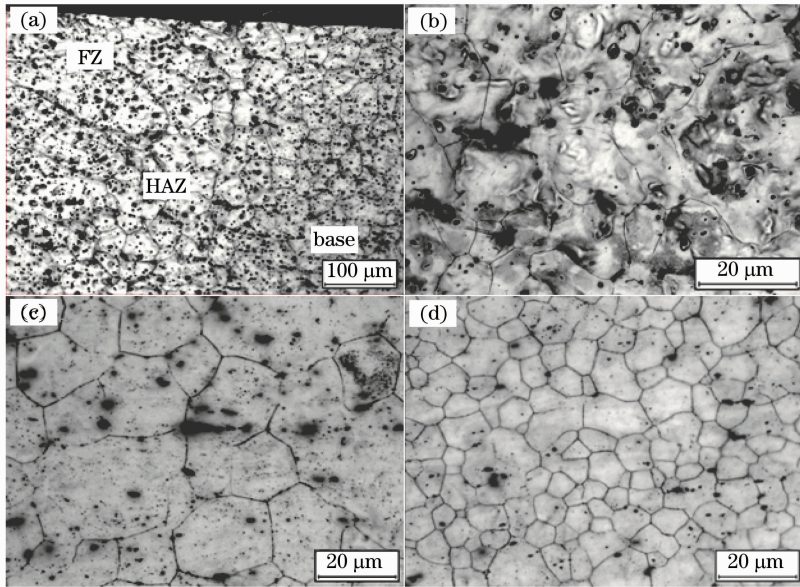


图2 激光冲击前 AZ31B 焊接接头横截面上的微观组织。(a)不同区域;(b)熔池;(c)热影响区;(d)基体组织  
Fig.2 Cross-section microstructure of welded AZ31B before LSP. (a) Different zones; (b) fusion zone; (c) heat affected zone; (d) base material

### 3.2 激光冲击诱导表面纳米化

图3为激光冲击后焊接件热影响区表层的TEM像、电子衍射(SAED)谱和高分辨率TEM像(HRTEM)。图3(a)表明样品表层组织为尺寸均匀、呈等轴状、平均晶粒尺寸为35 nm左右的纳米晶。由相应的SAED谱可以看出:衍射环比较完整

和连续,表明该层的晶粒细化更加明显,纳米晶晶体学取向随机;衍射环由多组同心圆组成,表明大角度晶界已经形成。从图3(b)可以看出:部分晶界和晶向不清晰,这是由剧烈的塑性变形导致晶格紊乱造成的;各晶粒间取向差很大,属于大角度晶界;图中黑色区域是由剧烈的塑性变形导致位错缠结造成的。

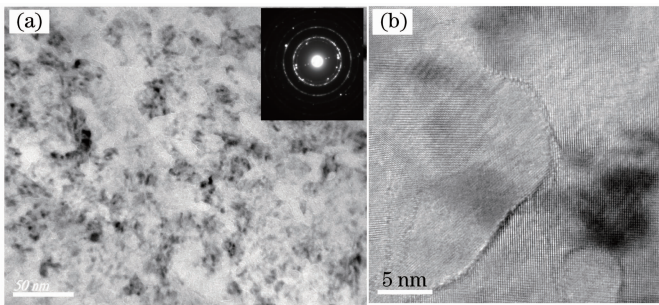


图3 AZ31B 镁合金焊接件热影响区激光冲击处理表层的 TEM 像与 SAED 图(a)和 HRTEM 像(b)  
Fig.3 (a) TEM image and corresponding SAED pattern and (b) HRTEM image taken from the HAZ surface layer of welded AZ31B Magnesium alloy by LSP

### 3.3 激光冲击诱导残余应力

激光冲击处理前后,用 X-350A 型 X 射线应力仪测量焊接件热影响区表层残余应力,测量结果如图4所示,  $2\theta_p$  表示衍射峰对应的衍射角。图4(a)表明在激光冲击前,焊接件热影响区表层的残余应力值为 60 MPa 左右,这是由于焊件不均匀受热和焊缝金属的收缩造成的。图4(b)表明在激光冲击后,焊接件热影响区表层的残余应力值为 -125 MPa。残余压应力产生的机理是:在激光和

靶材相互作用时,激光诱导的强冲击波使靶材表层材料产生塑性变形,次表层发生弹性变形;当激光冲击结束后,表层材料被压扁,离开平衡位置的质点无法回到原先位置,同时塑性层阻挡了已发生弹性变形层的恢复,从而在材料表层产生了残余压应力<sup>[11]</sup>。由此可见,激光冲击处理一方面改变了焊接件热影响区表层的应力状态,由残余拉应力转变为残余压应力;另一方面表面残余压应力值高达 -125 MPa。

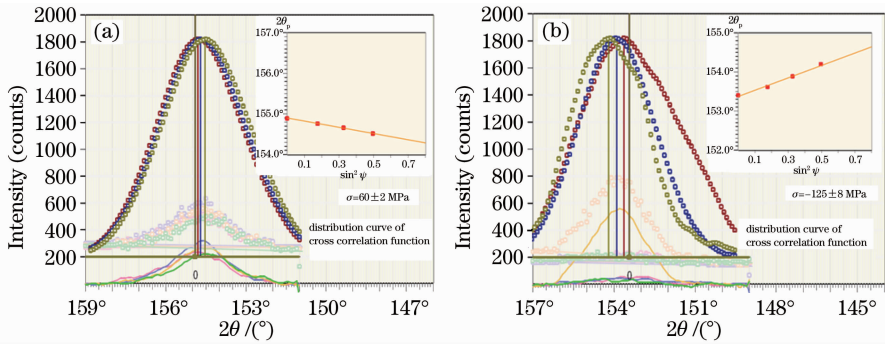


图4 试样的残余应力。(a)激光冲击前;(b)激光冲击后

Fig. 4 Residual stress of sample. (a) Before LSP; (b) after LSP

### 3.4 激光冲击处理对镁合金抗应力腐蚀性能的影响

为了验证激光冲击处理对镁合金焊接件抗应力腐蚀性能的影响,将试样分成两组,第一组为激光冲击试样,第二组为未被激光冲击试样,将两组试样放在相同的腐蚀环境(去离子水)下进行实验。在应力腐蚀实验过程中,试样表面不断有气泡逸出,开始时,气泡逸出速率较快,随着时间的延长,气泡逐渐减少,但仍有气泡逸出,每次换去离子水后,重复上述过程<sup>[11]</sup>。未被激光冲击的试样在浸泡了 192 h 后,在受拉应力一侧的试样表面(热影响区)出现了许多丝状裂纹,裂纹做横向扩展,并很快连接在一起,形成大的裂纹而断裂,如图 5(a)所示。从宏观上看,裂纹较平直,裂纹出现在受拉应力的区域内,这表明拉应力在应力腐蚀过程中,起了重要作用<sup>[11]</sup>。另外,镁合金板的表面失去了原有的金属光泽,变为暗灰色,这表明去离子水对镁合金有较强的腐蚀作用;而激光冲击的试样未出现裂纹,这表明激光冲击强化能够抑制应力腐蚀裂纹的产生<sup>[11]</sup>,如图 5(b)所示。

### 3.5 断口分析

从宏观上看,断口截面未产生明显的收缩现象,断裂面基本上与所受的拉应力垂直,断口比较平整,

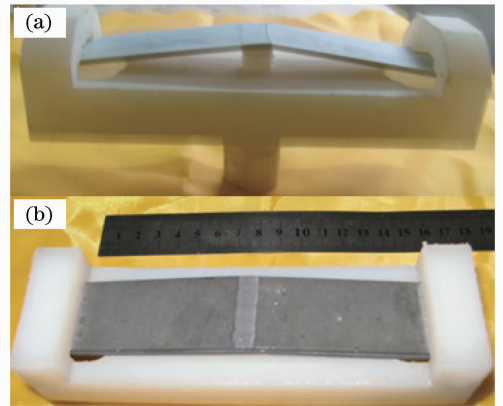


图5 未被激光冲击试样。(a) 192 h 和激光冲击试样;(b) 10 个月后的应力腐蚀结果

Fig. 5 SCC results of sample without LSP. (a) After 192 h and sample with LSP; (b) after 10 months  
故属于脆性断裂<sup>[11]</sup>。

图 6 为 AZ31B 焊接件在去离子水中应力腐蚀开裂后的断口形貌。从图 6(a)可以看出河流状腐蚀裂纹由受拉一侧的表面(下表面)向试样纵深扩展。应力腐蚀实验过程中,首先在受拉应力一侧的试样表面产生点蚀,在工作应力及腐蚀介质的共同作用下,裂纹源主要沿纵向扩展形成裂纹,最终导致断口有效承载面积的减小而断裂。从图 6(b)可以看到泥状的花纹以及残留的腐蚀产物等。

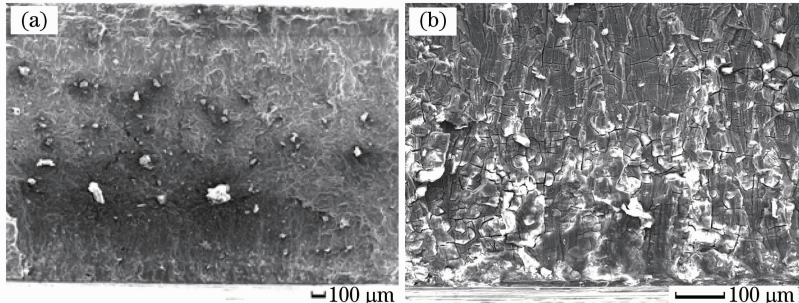


图6 AZ31B 焊接件应力腐蚀 SEM 断口(a)和放大像(b)

Fig. 6 (a) SEM fractography of SCC of welded AZ31B magnesium alloy and (b) magnified SEM fractography

### 3.6 极化曲线

图 7 为激光冲击前后 AZ31B 镁合金焊接件热影响区在质量分数为 3.5% NaCl 溶液中的动电位极化曲线。根据系统自带的分析软件,可知激光冲击处理前,AZ31B 焊接件热影响区的自腐蚀电位  $E$  和腐蚀电流  $I$  分别为  $-1.487\text{ V}$ 、 $3.245 \times 10^{-8}\text{ A/cm}^2$ ,激光冲击处理后,AZ31B 焊接件热影响区的自腐蚀电位和腐蚀电流分别为  $-1.399\text{ V}$ 、 $8.632 \times 10^{-9}\text{ A/cm}^2$ 。由此可知,激光冲击处理后,自腐蚀电位正移了  $88\text{ mV}$ ,腐蚀电流减小了  $73.4\%$ ,这表明激光冲击处理降低了 AZ31B 镁合金焊接件在质量分数为 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀倾向。

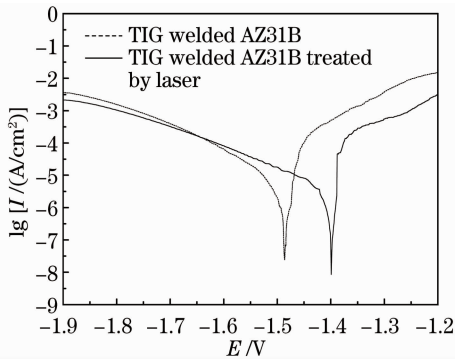


图 7 激光冲击前后 AZ31B 焊接件热影响区在 3.5% NaCl 溶液中的动电位极化曲线

Fig. 7 Potentiodynamic polarization curves of HAZ of welded AZ31B magnesium alloy before and after LSP in a solution of 3.5% NaCl

### 3.7 抗应力腐蚀能力提高的机理

晶粒的细化,一方面提高了镁合金的强度;另一方面,提高了镁合金的脆断抗力和韧性<sup>[3]</sup>。根据金属断裂理论,在裂纹萌生阶段,晶粒越细,单位体积内的晶粒数目越多,在相同的变形量下,变形分散在更多的晶粒内进行,晶粒内部和晶界附近的应变度相差较小,使变形分布得更加均匀,从而使可能导致局部开裂的应力集中程度减小<sup>[11]</sup>,微裂纹不易形成;在裂纹的扩展阶段,一方面,当微裂纹由一个晶粒穿过晶界进入另一个晶粒时,微裂纹在晶界处将受到阻碍,晶粒越细,晶界面积就越大,晶界对位错运动的阻碍作用也就越大,从而提高了材料的屈服强度;另一方面,由于相邻晶粒的取向不同,微裂纹一旦穿过晶界,扩展方向必然发生改变,微裂纹扩展方向的多次改变将加大能量的损耗,从而阻止微裂纹的扩展,使材料在断裂前能承受较大的变形,进而呈现出较高的强度以及较好的脆断抗力和韧性<sup>[13]</sup>。

根据机械应力导致钝化膜破裂机理,焊接件在

受到外加载荷时发生塑性变形,位错的滑移一旦到达试样的表面将在局部微区产生滑移台阶,如果滑移台阶的高度小于镁合金表面钝化膜的厚度,钝化膜不会破裂,只有当滑移台阶的高度大于金属表面钝化膜的厚度时,钝化膜破裂,基体金属就直接暴露在腐蚀介质中,成为电化学反应中的阳极,而其余具有钝化膜的金属成为阴极,形成一个小阳极大阴极的腐蚀微电池,使得阳极溶解非常迅速,于是在金属表面产生蚀坑,由于应力集中,微电池反应不断进行,钝化膜就难以恢复,裂纹沿纵深发展产生应力腐蚀开裂<sup>[13]</sup>。激光冲击处理诱导 AZ31B 镁合金焊接件表层纳米化后,首先,表层纳米化导致纳米晶粒中可动位错数量减少,位错增殖困难,当试样受到外加载荷作用时,难以在晶界处塞积足够数量的位错,形成较大的应力集中,促使相邻晶粒中的位错产生滑移;其次,纳米表层导致晶界百分数增大,晶界对位错运动的阻碍作用增大;最后,纳米晶粒内位错塞积的长度将缩短,其应力集中程度不足以推动相邻晶粒内的位错滑移。因此,纳米表层下基体内的位错滑移到纳米表层将受阻;纳米表层内的位错又难以滑移,从而抑制试样表面滑移台阶的形成,延缓应力腐蚀裂纹的产生,提高 AZ31B 镁合金焊接件抗应力腐蚀的能力。

激光诱导的残余压应力,可以平衡 AZ31B 镁合金焊接件在应力腐蚀实验过程中所承受的绝大部分弯曲拉应力,从而使试样实际承受的工作载荷减小,降低腐蚀裂纹扩展的驱动力,从而抑止应力腐蚀裂纹的产生。根据线弹性断裂力学理论,张开型裂纹应力场强度因子的表达式为  $K_I = Y\sigma\sqrt{a}$ ,式中  $Y$  为裂纹形状系数; $a$  为初始裂纹长度; $\sigma$  为名义应力<sup>[1,3]</sup>。当裂纹形状系数  $Y$  和初始裂纹长度  $a$  一定时,名义应力  $\sigma$  越小,则应力场强度因子  $K_I$  越小。由于激光诱导的残余压应力为  $-125\text{ MPa}$ ,试样表面最大弯曲拉应力为  $140\text{ MPa}$ ,可以抵消绝大部分弯曲拉应力,使得裂纹尖端的名义应力很小,从而降低应力场强度因子。要产生应力腐蚀开裂,必须满足关系式  $K_I \geq K_{Isc}$ ,式中  $K_{Isc}$  为应力腐蚀临界应力场强度因子<sup>[1,3]</sup>。对于特定的金属材料,在特定的腐蚀环境中, $K_{Isc}$  值是一定的。由于实际应力场强度因子的降低,当满足关系式  $K_I \leq K_{Isc}$  时,试样就不会发生应力腐蚀开裂。这就是激光冲击处理的 AZ31B 焊接件经历 10 个月之后而不产生应力腐蚀开裂的主要原因。

## 4 结 论

采用钕玻璃脉冲激光, 激光波长 1064 nm, 脉冲宽度 15 ns, 根据优化后的激光工艺参数: 脉冲能量 4 J, 光斑直径 3 mm, 0.1 mm 厚的铝箔作为涂层, 3 mm 厚的水流作为约束层, 对轧制态 AZ31B 镁合金焊接件薄板表面进行激光冲击处理。实验表明: 采用激光冲击处理技术能在 AZ31B 镁合金表面制得纳米晶, 表层纳米晶粒大小为 35 nm 左右; 激光冲击处理不但消除了焊接件表面有害的残余拉应力, 而且在焊缝热影响区诱导的残余压应力高达 -125 MPa。未激光冲击处理的 AZ31B 焊接件在去离子水中浸泡 192 h 后出现应力腐蚀开裂, 且断裂均出现在热影响区, 而激光冲击处理的 AZ31B 焊接件在去离子水中浸泡 10 月后也未出现应力腐蚀开裂, 这表明激光冲击处理能有效提高镁合金焊接件抗应力腐蚀的能力。动电位极化曲线表明激光冲击处理后, 腐蚀电位正移 88 mV, 腐蚀电流减小了 73.4%, 这说明激光冲击处理降低了 AZ31B 镁合金焊接件在质量分数为 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀倾向。AZ31B 镁合金焊接件在去离子水中抗应力腐蚀能力的提高归因于激光冲击处理诱导的表层纳米化和残余压应力。

**致谢** 感谢江苏大学化工学院王坤老师及其研究生在电化学实验中的大力帮助和指导。

### 参 考 文 献

- 1 Liu Daoxin. The Corrosion and Protection of Materials [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005. 152~216  
刘道新. 材料的腐蚀与防护 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005. 152~216
- 2 Wei Yinghui, Xu Bingshe. The Theory and Practice of Magnesium Alloy Corrosion Protection [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006

- 卫英慧, 许并社. 镁合金腐蚀防护的理论与实践 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006
- 3 Shu Delin. Metal Mechanical Properties [M]. Beijing: Machine Industry Press, 1999
- 4 Kaidong Xu, Aihua Wang, Yang Wang. Surface nanocrystallization mechanism of a rare earth magnesium alloy induced by HVOF supersonic microparticles bombarding [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2009, **256**(3): 619~626
- 5 Yinghui Wei, Baosheng Liu, Lifeng Hou *et al.*. Characterization and properties of nanocrystalline surface layer in Mg alloy induced by surface mechanical attrition treatment [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, **452**(2): 336~342
- 6 Y. K. Zhang, J. Z. Lu, X. D. Ren *et al.*. Effect of laser shock processing on the mechanical properties and fatigue lives of the turbojet engine blades manufactured by LY2 aluminum alloy [J]. *Materials and Design*, 2009, **30**(5): 1697~1703
- 7 S. A. Martinez, S. Sathish, M. P. Blodgett *et al.*. Effects of fretting fatigue on the residual stress of shot peened Ti-6Al-4V samples [J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 2005, **399**(1-2): 58~63
- 8 K. Y. Luo, J. Z. Lu, Y. K. Zhang *et al.*. Effects of laser shock processing on mechanical properties and micro-structure of ANSI 304 austenitic stainless steel [J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 2011, **528**(13-14): 4783~4788
- 9 J. P. Chu, J. M. Rigsbee, G. Banaš *et al.*. Laser-shock processing effects on surface microstructure and mechanical properties of low carbon steel [J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 1999, **260**(1-2): 260~268
- 10 Zhang Yongkang, Chen Jufang, Xu Renjun. Experimental research of laser shock strengthening AM50 magnesium alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 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
- 11 Ge Maozhong, Zhang Yongkang, Xiang Jianyun. Research on laser shock strengthening and stress corrosion cracking resistance of AZ31B magnesium alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 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 Huan 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. Lasers*, 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
- 13 Wang Guofan. Material Molding and Failure [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002  
王国凡. 材料成形与失效 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002