

文章编号: 0258-7025(2008)09-1395-06

# AZ91D 镁合金 Al-Si 粉末激光合金化及腐蚀性能

李 达 钱 鸣 金 昌 李 慧

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022)

**摘要** 采用 Al-Si 粉末对 AZ91D 镁合金进行了同步送粉激光合金化研究, 以期改善镁合金的耐腐蚀性能。讨论了激光加工参数与合金化层几何尺寸的对应关系; 采用扫描电镜(SEM)、能谱分析仪(EDS)、X 射线衍射仪(XRD)等材料表征手段分析了合金化层显微组织的结构特征。通过阳极极化实验评价了 AZ91D 镁合金激光合金化组织的腐蚀性能。结果表明, AZ91D 镁合金激光合金化表层的耐腐蚀性能明显提高; 剖析了  $Mg_2Si$ ,  $Al_{12}Mg_{17}$ ,  $Al_3Mg_2$  等金属间化合物(IMC)的耐腐蚀作用。

**关键词** 激光技术; 合金化; 镁合金; 金属间化合物; 腐蚀

**中图分类号** TN 249; TG 156.99

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL20083509.1395

## Laser Alloying of Magnesium Alloy AZ91D with Al-Si Powder and Its Corrosion Performance

Li Da Qian Ming Jin Chang Li Hui

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract** Laser alloying of magnesium alloy AZ91D with direct Al-Si power feeding for improvement of corrosion resistance was investigated. The relationship between laser alloying parameters and dimensions of alloyed layers was studied. The microstructural features of the alloyed layer were characterized by using scanning electronic microscope (SEM), energy disperse spectroscopy (EDS) and X-ray diffraction (XRD). Anodic polarization test was applied to evaluate the corrosion performance of AZ91D alloyed layer, which yielded enhanced corrosion resistance. The contribution of the intermetallic compounds (IMCs) of  $Mg_2Si$ ,  $Al_{12}Mg_{17}$ ,  $Al_3Mg_2$  in alloyed layers to corrosion resistance was studied.

**Key words** laser technique; alloying; magnesium alloys; intermetallic compound; corrosion

### 1 引 言

镁合金是重要的有色轻金属材料, 具有比强度高、比刚度大、减振性、电磁屏蔽和抗辐射能力强、易切削加工、易回收等一系列优点, 广泛应用于航空航天、汽车制造等工业领域<sup>[1~3]</sup>。然而, 镁合金较差的耐腐蚀性能却制约着镁合金的应用拓展。镁及其合金对电化学腐蚀非常敏感, 容易产生严重的点蚀<sup>[2,3]</sup>, 在潮湿和含 NaCl 环境中尤为严重<sup>[2~4]</sup>。因而采用表面改性技术提高镁合金的耐腐蚀性能具有重要的现实意义。近年来, 关于镁合金激光表面改性的研究呈上升趋势。激光表面重熔、激光熔覆、激

光表面合金化等改性方法已开始用于改善镁合金耐腐蚀性能的研究<sup>[3~16]</sup>。其中镁合金激光合金化是引人关注的重要方面之一。

激光表面合金化是以高能密度的激光辐照材料基体使之熔化至所需深度, 同时添加适当合金化元素来改善基材表面显微组织与形成新的非平衡微观结构, 从而提高材料表面的相关性能。合金化的表面层与基材形成冶金结合。与激光熔覆不同之处在于激光合金化层系由基材与合金化材料相互熔合而成, 而激光熔覆层则只由低稀释率的熔覆材料构成。在镁合金激光表面改性中, 人们采用了多种材料用

收稿日期: 2007-04-10; 收到修改稿日期: 2008-01-25

基金项目: 北京市教委科研面上项目(KM200510005007)资助课题。

作者简介: 李 达(1981—), 男, 湖北人, 硕士研究生, 主要从事大功率激光加工应用方面的研究。

E-mail: soslida@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 钱 鸣(1957—), 男, 主要从事激光材料加工等方面的研究。E-mail: qian.18@osu.edu (通信作者)

于腐蚀性能的改善。早期在镁合金表面进行的 Al, Cu, Ni 和 Si 合金化研究发现, 铝合金化的镁合金表层中致密的  $Mg_{17}Al_{12}$  金属间化合物层显著增加耐腐蚀性<sup>[5]</sup>。镁合金激光熔覆 Mg-Zr 和 Mg-Al 合金亦可大大提高耐腐蚀性能<sup>[6,7]</sup>, 且后者效果优于前者; 其原因在于熔覆层中形成  $Mg_2Al_3$  等金属间化合物相。Yue 等<sup>[7]</sup>在 ZK60/SiC 复合镁合金表面进行了先热喷涂 Al-Si 共晶合金而后再重熔的熔覆, 其中形成的  $Mg_{17}Al_{12}$  和  $Mg_2Si$  金属间化合物相有利于耐腐蚀性能的提高。这些研究表明, 在镁合金表面形成适当的含金属间化合物相的合金是一种提高耐腐蚀性能的有效方法。

由于镁合金的熔点低, 激光熔覆仅可采用先将熔覆材料喷涂或粘接到基材表面而后再用激光扫描的方法实现, 从而增加了工艺的复杂性和加工成本。相比之下, 采用一步式同步送粉激光合金化具有明显的优越性。然而, 目前尚缺乏有关镁合金激光合

表 1 镁合金 AZ91D 名义化学成分(质量分数, %)

Table 1 Nominal chemical compositions of magnesium alloy AZ91D (mass fraction, %)

Alloy elements	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	Mg
	8.84	0.82	0.12	0.02	0.0004	0.002	0.0006	Balance

激光合金化前, 镁合金试板表面经过喷砂处理, 以增加激光能量的吸收率<sup>[17]</sup>。激光试验采用同步前置送粉方式; 送粉喷嘴与激光束成  $45^\circ$  角。送粉载气和保护气体均为 Ar 气。所用激光合金化参数范围: 激光功率 1000~1400 W, 激光焦斑直径为 4 mm, 激光扫描速度 300~550 mm/min, 送粉速率为 2.9~3.9 g/min。

激光合金化后, 试件用水冷机加工方法沿焊缝横截面切割成所需尺寸。用环氧树脂镶嵌后按常规方法研磨、抛光并浸蚀显微组织分析试样。所用浸蚀剂为氢氟酸 2.5 mL + 浓硝酸 12.5 mL + 水 85 mL。采用 Olympus PMG3 金相显微镜与定量分析软件 Olycia m3 测定熔深、熔宽和熔高; 采用 FUTURE-TECH FM-700 数字显微硬度计对合金化层进行硬度测试, 载荷为 50 g; 采用 FEI Quanta 200 型扫描电镜 (SEM) 与能谱分析仪 (EDS) 进行显微组织与相分析。

大面积的合金化层系由单一熔道以 20%~40% 搭接率搭接而成, 用于制作 X 射线衍射仪 (XRD) 分析和阳极极化试样。采用 D8 ADVANCE XRD 分析激光合金化层组织的相结构; 所用阳极靶材为铜靶。镁合金和相应合金化层的腐蚀性能采用阳极极化试验评价。腐蚀试样系由搭接合金化层加

合金化的研究报告。采用 Al-Si 共晶系合金材料进行镁合金激光合金化与腐蚀性能的研究亦需进一步的研究。本文采用 Nd:YAG 激光和耐腐蚀的 Al-Si 共晶合金粉末进行镁合金表面合金化, 以求改善镁合金表面的耐腐蚀性。同时将研究与之有关的激光加工参数对合金化的影响, 并分析、考评合金化组织的构成和腐蚀性能。

## 2 试验材料与方法

试验材料是工业常用的铸造镁合金 AZ91D, 其化学成分如表 1 所示。试板经水冷机加工取自 AZ91D 的铸锭, 厚度为 5 mm。选用的激光合金化材料为粉末态的 Al-12%Si 共晶合金, 其粉末粒度为 80~180  $\mu\text{m}$ 。激光合金化采用 2500 W Nd:YAG 固体激光器 (ROFIN-SINAR), 配合光纤导光系统 Motorman 五轴联动机械手进行。所用聚焦透镜的焦距为 200 mm。

工制得, 表面经砂纸打磨并抛光; 其测试面积为 1  $\text{cm}^2$ 。腐蚀介质为质量分数 3.5% 的 NaCl 水溶液; 所用的阳极极化腐蚀试验仪器为 M273A 恒电位仪, 配合 M352 腐蚀测试分析软件表征试验结果。参比电极为饱和甘汞电极 (SCE); 极化试验扫描速度为 1.0 mV/s。试验在室温 (20  $^\circ\text{C}$ ) 下进行。然后采用相应显微分析手段对腐蚀行为进行表征。

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 激光合金化层的形貌与微观结构

采用 Al-Si 粉末, 按设定的激光加工参数范围对 AZ91D 镁合金进行激光合金化试验, 得到的典型合金化层形貌与组织如图 1 所示。激光作用区由上而下分别为合金化熔合区、热影响区 (HAZ) 和母材。由图 1(a), (b) 可见, 合金化组织与镁合金母材实现了冶金结合。并注意到在靠近熔合线的热影响区中, 由于激光快速扫描加热的影响, 位于晶界的  $\gamma\text{-Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  发生了液化所致的重新结晶 (图 1(b))。图 1(c) 展示了 AZ91D 镁合金的  $\alpha\text{-Mg}$  固溶体基体和分布于晶界的  $\gamma\text{-Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  的组织特征以资对比。在图 1(d) 所示的熔合区中, 可见结构致密的合金化组织, 系由基体中分布的树枝晶和多角状颗粒相构成。EDS 分析表明, 颜色较深的树枝晶为  $Mg_2Si$ ,

而较浅的颗粒相为  $Al_{12}Mg_{17}$  或  $Al_3Mg_2$ <sup>[18]</sup>。显然，激光合金化层的组织不同于 AZ91D 母材。

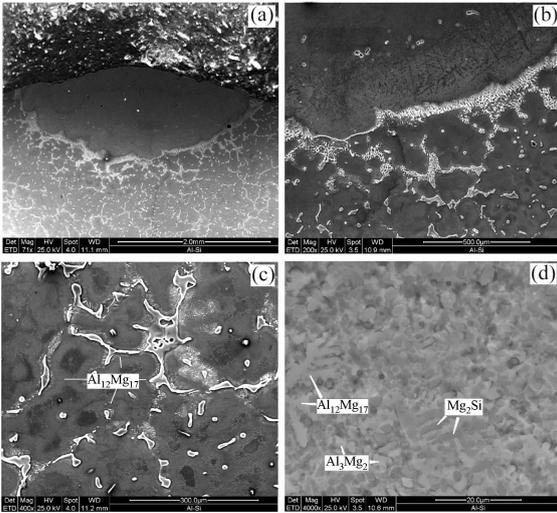


图 1 AZ91D激光合金化层和基材的形貌和显微组织。(a) 横截面形貌；(b) 熔合区与热影响区；(c) AZ91D 母材组织 ( $\alpha$ -Mg 固溶体基体与分布于晶界的  $\gamma$ - $Al_{12}Mg_{17}$  金属间化合物)；(d) 合金化熔合区微观组织中的树枝晶和多角状金属间化合物

Fig.1 Morphology and microstructure of laser-alloyed AZ91D and substrate. (a) transverse morphology; (b) fusion zone and HAZ; (c)  $\alpha$ -Mg solid solution matrix and  $\gamma$ - $Al_{12}Mg_{17}$  IMC segregated along grain boundaries in AZ91D; (d) dendrites of the microstructure and angular IMC phases in fusion zone

激光作用参数对 Al-Si 粉末合金化层几何尺寸的影响如图 2 所示。在固定的激光功率下，随扫描速度的增加，合金化层的熔宽、熔高、熔深呈下降趋势。在一定扫描速度下，合金化层的熔宽和熔深随激光功率的增加而增加；而熔高却呈下降趋势。

硬度测试表明，Al-Si 合金化层的表面硬度明显高于 AZ91D 母材。典型的合金化层组织中的硬度分布情况如图 3 所示。从中可见，Al-Si 粉末合金化层中的硬度大致分布于 220~340HV 区间，并有所波动。除近表面的硬度稍低外，随着距表面的距离增加，硬度呈现出下降的趋势。这显然与合金化的熔合区中形成的金属间化合物(IMC)的种类和密度分布情况有关。在熔合线处，硬度发生陡降；HAZ 近熔合线部位仍有一定硬化。这表明重新结晶的 IMC 与可能发生的元素扩散的综合作用。进入母材一定距离后，硬度则趋于稳定的较低水平。

镁合金表面大面积的合金化层系由单熔道搭接而成。根据单合金化熔道的几何尺寸，选择了下面

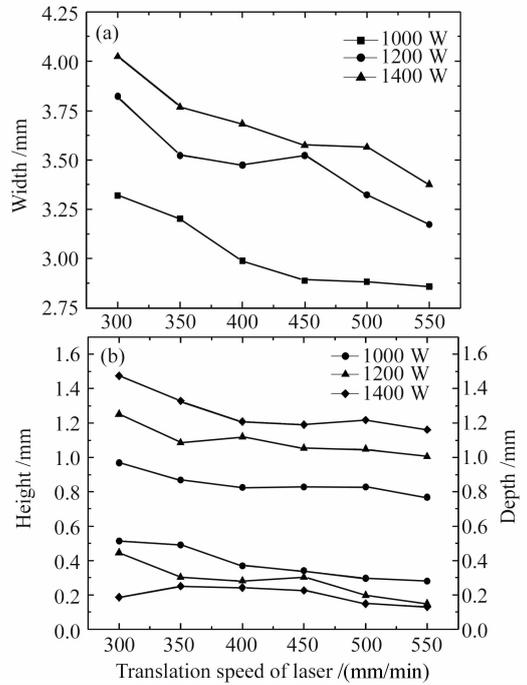


图 2 激光加工参数对 Al-Si 粉末合金化层几何尺寸的影响。(a) 熔宽；(b) 熔高与熔深

Fig.2 Effects of laser power and translation speed on dimension of Al-Si alloyed layers. (a) welding width; (b) welding height and depth

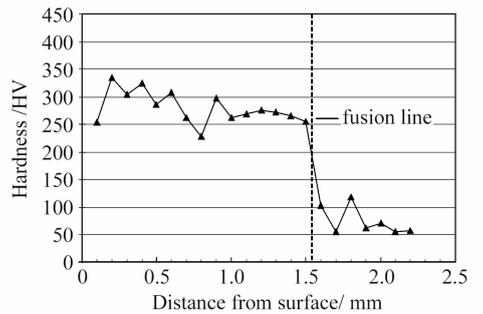


图 3 AZ91D 镁合金 Al-Si 粉末激光合金化层硬度分布

Fig.3 Hardness distribution of laser-alloyed AZ91D layer with Al-Si powder

参数作合金化层面的搭接；激光功率为 1400 W，光斑直径为 4 mm，激光合金化的扫描速度为 300 mm/min，合金化面的搭接率约为 40%。按以上加工参数进行大面积激光合金化。而后用常规金相试样制备方法对合金化表面进行磨制、抛光，进行 XRD 相组织分析。

图 4 是 Al-Si 粉末激光合金化层的 X 射线衍射分析结果。从中可见，该合金化层组织中含有  $Mg_2Si$ ,  $Al_{12}Mg_{17}$ ,  $Al_3Mg_2$  诸金属间化合物相及  $\alpha$ -Mg 和 Al 固溶体，清楚地展示了在激光作用下，Al-Si 粉末材料与 AZ91D 镁合金母材相互熔合产生合

金化的情况。XRD 分析图谱中  $Mg_2Si$  相有多个晶面的衍射峰,且强度较高,定性地表征了较高的含量。结合 AZ91D(表 1)和 Al-Si 粉末的成分构成可以推断, $Mg_2Si$  中的 Si 元素主要来自 Al-Si 粉末。此外,在 XRD 分析图谱中没有 Si 的衍射峰,且 Al 的峰位略有偏移。由此可以判断,Al-Si 粉末中的 Si 元素主要与 Mg 形成  $Mg_2Si$ ,并可能有少量固溶于 Al 的晶格中使其发生了畸变。

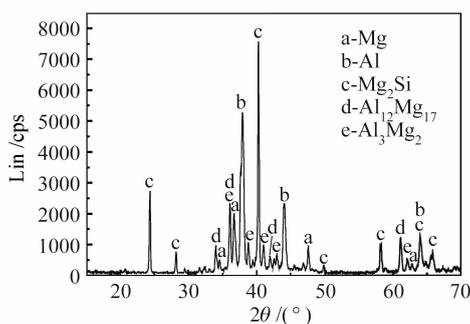


图 4 Al-Si 粉末激光合金化层 XRD 分析图谱

Fig. 4 Phases identification of the Al-Si laser-alloyed layer by XRD analysis

### 3.2 镁合金激光合金化层的腐蚀性能

按前述试验条件,进行了 Al-Si 粉末激光合金化组织和 AZ91D 镁合金母材的阳极极化腐蚀试验。试验测定的动态电势阳极极化曲线如图 5 所示;根据其中阴极和阳极 Tafel 曲线的交汇点计算得出的动态极化腐蚀电势 ( $E_{corr}$ ) 与腐蚀电流 ( $I_{corr}$ ) 亦列于图中<sup>[19]</sup>。由此可见,Al-Si 粉末合金化层的腐蚀电势比 AZ91D 高出 435 mV;而腐蚀电流低于 AZ91D 母材试样近 2 个数量级。这表明 Al-Si 粉末合金化层具有低腐蚀率和较高的极化阻力性质<sup>[19]</sup>。综合图 1 和图 4 显微组织和 XRD 相分析,可知是合金化组织中密集分布的  $Mg_2Si$ ,  $\gamma-Al_{12}Mg_{17}$ ,  $\beta-Al_3Mg_2$  诸金属间化合物发挥了增加耐腐蚀性的作用。与文献描述的  $Mg_2Si$ <sup>[7]</sup>,  $\gamma-Al_{12}Mg_{17}$ <sup>[4,7]</sup>,  $\beta-Al_3Mg_2$ <sup>[10]</sup> 的抗蚀性情况相同。这些 IMC 相对于镁均呈高的电势,从整体上提高了 Al-Si 合金化层的腐蚀电势 ( $E_{corr}$ )。这是使 Al-Si 材料合金化的 AZ91D 镁合金在  $Cl^-$  环境下耐腐蚀性能显著增加的重要原因。

为进一步阐明 IMC 相的耐腐蚀作用,对试样腐蚀形貌的微观特征进行了研究。AZ91D 镁合金母材在质量分数为 3.5% 的 NaCl 水溶液中阳极极化试验的腐蚀形貌特征如图 6 所示。可见在其表面发生了选择性腐蚀(图 6(a))。进一步观察发现,腐蚀优先发生在基体  $\alpha-Mg$  上,而处于晶界处的  $\gamma-Al_{12}Mg_{17}$  IMC 没有发生腐蚀的倾向(图 6(b))。根据电

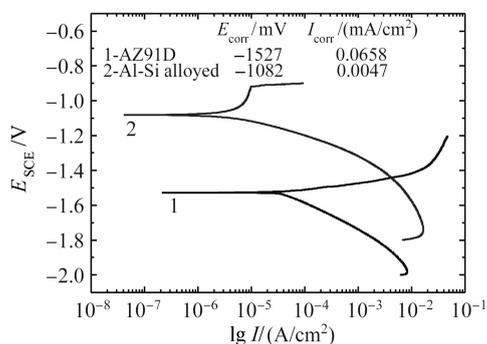


图 5 激光合金化层和 AZ91D 镁合金于质量分数为 3.5% 的 NaCl 水溶液中的阳极极化曲线

Fig. 5 Polarization curve of the alloyed layer and AZ91D in 3.5% (mass fraction) NaCl solution

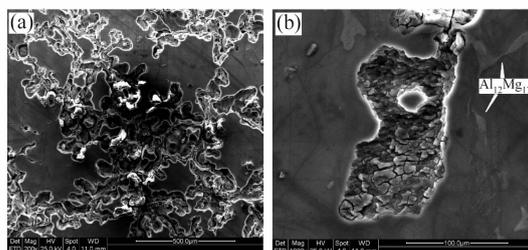


图 6 AZ91D 镁合金的腐蚀特征。(a) 优先腐蚀区域; (b) 优先腐蚀的  $\alpha-Mg$  固溶体与未腐蚀的晶界  $\gamma-Al_{12}Mg_{17}$

Fig. 6 Corroded features of AZ91D base metal in 3.5% NaCl solution. (a) preferential corrosion sites; (b) preferential attack at  $\alpha-Mg$  solid solution leaving grain boundary  $\gamma-Al_{12}Mg_{17}$  unattacked

化学中的电偶原理分析可知,在腐蚀发生时  $\alpha-Mg$  作为阳极,  $\gamma-Al_{12}Mg_{17}$  则为阴极,从而腐蚀优先发生于  $\alpha-Mg$  固溶体基体中的某些敏感部位,继而向其周边扩展。

AZ91D 镁合金 Al-Si 粉末材料激光合金化层的腐蚀特征如图 7 所示。从图 7(a)可以看出腐蚀有选择地发生在被测试样表面。对比具有相同放大倍率的 AZ91D 母材组织(图 6(a)),可知合金化层的腐蚀程度明显低于 AZ91D 母材。图 7(b)进一步展示了腐蚀的局部性特征。其中 A-I 和 A-II 部位的腐蚀细部如图 7(c), (d) 所示。可见,在密集分布的  $Mg_2Si$  和  $\gamma-Al_{12}Mg_{17}$  等 IMC 相之间的固熔体基体中发生了这种选择性腐蚀。腐蚀仅在固熔体基体中扩展,而 IMC 颗粒未被侵蚀。同时可见,明显为 IMC 相脱落而留下的凹坑。

此外,亦见在尚未发生显著腐蚀的区域,沿 IMC 相与固熔体基体的界面处出现很多腐蚀沟纹,如图 7(c), (d) 所示。由图 8(a)进一步观察到固熔

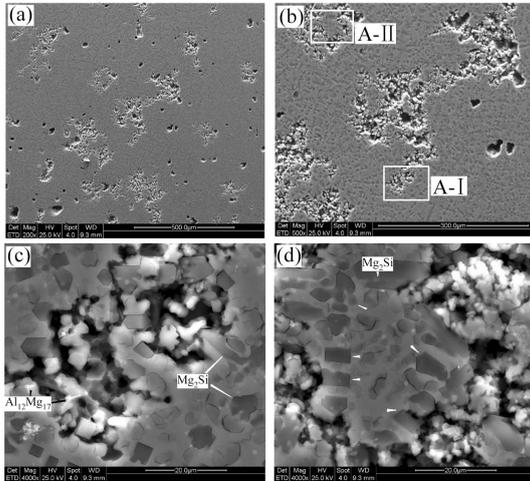


图 7 AZ91D 镁合金 Al-Si 合金化层的腐蚀特征。(a) 低倍形貌;(b) (a)中心的局部形貌;(c) (b)A-I 细部优先发生于  $\alpha$ -Mg 和 Al 固溶体基体的腐蚀;(d) (b)A-II 细部发生于 IMC 界面的先期腐蚀(箭头所指)

Fig. 7 Corroded features of Al-Si alloyed AZ91D layer in 3.5% NaCl solution. (a) general view; (b) morphology of central area of (a); (c) details of A-I showing preferential attack at matrix of  $\alpha$ -Mg and Al solid solution; (d) details at A-II showing early interfacial attack at the interface of IMCs (arrow pointed)

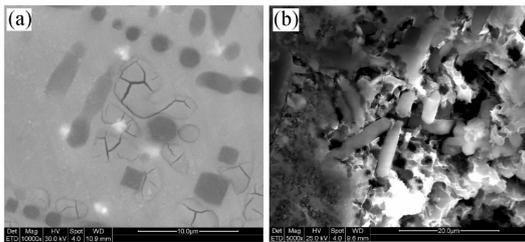


图 8 Al-Si 合金化的 AZ91D 组织中的优先腐蚀。(a) 基体亚结构组织中的腐蚀沟纹;(b) 凹陷腐蚀基体中悬置的 IMC

Fig. 8 Preferential corrosion in the Al-Si alloyed AZ91D microstructure. (a) corroded microgrooves in substructures of matrix; (b) IMC phases hanging over the corroded concave matrix

体基体亚结构中先行出现的腐蚀沟纹呈连接趋势。可以推断,该沟纹一旦在基体内连通,就会导致组织脱落,即发生凹陷。随着腐蚀的继续进行,基体大部分作为阳极被电解质腐蚀溶解而形成凹坑;而剩下的 IMC 相悬置其中,直至周围基体全部腐蚀溶解失去支撑而脱落(图 8(b))。

从极化试验结果和对各种组织及相的腐蚀特征

分析,可以认为,在激光合金化层中形成的密集金属间化合物相对表面腐蚀构成阻力,导致合金化层具有高的腐蚀平衡电位和低的腐蚀电流。而在  $\text{Cl}^-$  介质中,不同的 IMC 相,即  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ ,  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ , 对腐蚀的阻抗作用还有待进一步研究确定。

## 4 结 论

采用 Al-12% Si 粉末材料进行的 AZ91D 镁合金激光合金化实现了合金化层与母材的冶金结合。合金化层的熔高、熔宽和熔深随激光功率和扫描速度呈规律性变化。XRD 和 EDS 物相分析揭示,合金化层组织由  $\alpha$ -Mg 和 Al 固溶体基体与弥散分布其间的树枝状  $\text{Mg}_2\text{Si}$  和多角状的  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ ,  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  金属间化合物相组成。多种金属间化合物的存在是 Al-Si 合金化层中的硬度明显高于 AZ91D 母材的原因。在质量分数为 3.5% 的 NaCl 水溶液介质中的阳极极化试验表明,Al-Si 合金化层相对于 AZ91D 具有高极化阻力和低腐蚀率。腐蚀优先发生于  $\alpha$ -Mg 和 Al 固溶体基体中和基体与 IMC 相的界面部位,并向基体中扩展,直至基体完全腐蚀溶解。合金化层中密集分布的多种金属间化合物相是其在  $\text{Cl}^-$  环境下的耐腐蚀性能显著增加的重要原因。

## 参 考 文 献

- Chen Zhenhua *et al.*. Magnesium Alloy [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004  
陈振华 等 著. 镁合金[M]. 北京:化学工业出版社, 2004
- Song Guangling. The Corrosion and Protect on Magnesium [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. 20~121  
宋光玲 著. 镁合金腐蚀与防护[M]. 北京:化学工业出版社, 2006. 20~121
- J. E. Gray, B. Luan. Protective coatings on magnesium and its alloys — a critical review [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2002, **336**:88~113
- R. Galun, A. Weisheit, B. L. Mordike. Laser surface alloying of magnesium base alloys [J]. *J. Laser Applications*, 1996, **8** (6):299~305
- R. Subramanian, S. Sircar, J. Mazumder. Laser cladding of zirconium on magnesium for improved corrosion properties [J]. *J. Mater. Sci.*, 1991, **26**:951~956
- A. A. Wang, S. Sircar, J. Mazumder. Laser cladding of Mg-Al alloys [J]. *J. Mater. Sci.*, 1993, **28**:5113
- T. M. Yue, A. H. Wang, H. C. Man. Corrosion resistance enhancement of magnesium ZK60/SiC composite by Nd: YAG laser cladding [J]. *Scripta Materialia*, 1999, **40**(3):303~311
- T. M. Yue, Q. W. Hu, Z. Mei *et al.*. Laser cladding of stainless steel on magnesium ZK60/SiC composite [J]. *Materials Lett.*, 2001, **47**(3):165~170
- T. M. Yue, Z. Mei, H. C. Man. Improvement of the corrosion resistance of magnesium ZM51/SiC composite by laser cladding [J]. *J. Mater. Sci. Lett.*, 2001, **20**(16):1479~1482
- N. N. Aung, W. Zhou. Effect of heat treatment on corrosion and electrochemical behaviour of AZ91D magnesium alloy [J].

- J. Appl. Electrochemistry*, 2002, **32**(12):1397~1401
- 11 Sorin Ignat, Pierre Sallamand, Dominique Grevey. Magnesium alloy laser (Nd:YAG) cladding and alloying with side injection of aluminum power [J]. *Applied Surface Science*, 2004, **225**(1-4):124~134
  - 12 Z. Meia, L. F. Guo, T. M. Yue. The effect of laser cladding on the corrosion resistance of magnesium ZK60/SiC composite [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, **161**(3):462~466
  - 13 J. D. Majumdera, R. Galun, B. L. Mordike *et al.*. Effect of laser surface melting on corrosion and wear resistance of a commercial magnesium alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, **361**(1-2):119~129
  - 14 Liu Hongbin, Wang Cunshan, Gao Yali *et al.*. Laser cladding amorphous composite coating of Cu-Zr-Al on magnesium alloy surface [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5):709~713  
刘红宾,王存山,高亚丽等. 镁合金表面激光熔覆 Cu-Zr-Al 非晶复合涂层[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5):709~713
  - 15 Huang Kaijin, Lin Xin, Chen Chi *et al.*. Microstructure and wear behaviour of laser-clad Zr-Cu-Ni-Al/TiC composites on AZ91D magnesium alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4):549~554  
黄开金,林鑫,陈池等. AZ91D 镁合金表面激光熔覆 Zr-Cu-Ni-Al/TiC 复合粉末的组织与磨损[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4):549~554
  - 16 Gao Yali, Wang Cunshan, Liu Hongbin *et al.*. Microstructure and properties of AZ91HP magnesium alloy treated by high power laser melting [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7):1019~1024  
高亚丽,王存山,刘红宾等. 高功率激光熔凝 AZ91HP 镁合金组织和性能[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7):1019~1024
  - 17 W. M. Steen. *Laser Material Processing* [M]. London: Springer-Verlag Limited, 2003
  - 18 Alloy Phase Diagrams. *ASM Handbook* [M]. ASM International, 1992, 3
  - 19 ASTM G3-89 (Reapproved 2004). Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing[S]