

文章编号: 1001-3806(2008)05-0487-03

## AZ91 镁合金激光表面熔凝处理的微观组织变化

许仁军, 张永康\*, 陈菊芳

(江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

**摘要:** 为了研究激光处理后镁合金表面组织的变化, 采用 CO<sub>2</sub> 激光对 AZ91 镁合金表面以氦气作为保护气体的条件下进行处理, 对处理过的试样用光学显微镜进行观察, 并用显微硬度计测量其截面的显微硬度值, 取得了试样表面和截面的组织照片和沿截面的硬度分布曲线。结果表明, 激光处理过的镁合金表面与未经处理的镁合金表面相比晶粒得到了明显的细化, 且随着激光扫描速度的降低, 晶粒更细, 而熔凝层的深度随着速度的增加而减小, 同时在细化后的晶粒的晶界上的 β 相基本上消失, 对其截面进行的显微硬度的测量结果显示其硬度相对未处理的试样有明显的提高, 且晶粒越小显微硬度值越高, 符合 Hall-Petch 公式。

**关键词:** 材料; 晶粒细化; 激光熔凝; 镁合金; 显微硬度

**中图分类号:** TG146.2<sup>+</sup>2; TG156.99 **文献标识码:** A

### Microstructure change of AZ91 magnesium alloy surface melted by laser

XU Ren-jun, ZHANG Yong-kang, CHEN Ju-fang

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** In order to study the surface tissue variation of the magnesium alloy treated by laser, the surface of AZ91 magnesium alloy was treated by CO<sub>2</sub> laser under the protection of helium gas. The treated workpiece was observed through optical microscope, and the microhardness value of the cross section was tested by microhardness tester. The result of the experiment showed that the grain size of the treated magnesium alloy was refined to the primitive magnesium alloy, the grain size of the magnesium alloy becoming smaller with the decrease of the scanning speed, and that the β phase along the grain boundary decreased distinctly. The microhardness test of the cross section showed that the microhardness value of the treated section enhanced distinctly, and the smaller of the grain size, the harder of the cross section, according to the Hall-Petch formula.

**Key words:** materials; grain refining; laser melting; magnesium alloy; micro-hardness

### 引 言

镁合金不仅具有密度小、比强度、比刚度高, 而且还具有良好的阻尼性能及尺寸稳定、价格低廉、可以回收利用等优点, 越来越受到人们的重视, 在汽车、电子、电器、交通、航天、航空和国防军事工业领域具有极其重要的应用价值和广阔的应用前景, 被称之为 21 世纪的绿色工程材料<sup>[1-4]</sup>。

然而由于镁及其镁合金的化学性能极其活泼, 标准电极电位为 -2.36V, 在空气中镁合金表面很容易形成一层很薄的氧化膜, 但由于该膜层疏松多孔, 不如铝合金表面氧化膜完整、致密, 因此镁合金的耐蚀性较差<sup>[5]</sup>。镁合金的使用因其耐蚀性和耐磨性比较差而

受到很大的限制。

目前, 镁合金所采用的表面改性措施主要有化学转化处理<sup>[6]</sup>、阳极氧化处理<sup>[7]</sup>、微弧氧化<sup>[8]</sup>、化学镀与电镀<sup>[9]</sup>等。但是由于镁合金的高度化学和电化学活性, 以及表面改性措施自身技术条件的限制, 使镁合金表面处理技术与实际需求还存在较大差距。激光熔凝强化是通过具有足够高的功率密度的激光束扫描材料表面, 使其局部表面温度快速升高, 达到并超过相变温度后, 以极快的速度自行冷却, 达到表面的强化, 改善和提高表面性能<sup>[10]</sup>。其快速加热与冷却特性使得细晶材料的制备从工艺上和技术上降低了大块状细晶材料制备的困难, 同时能很好地满足实践生产的需求, 因为材料在工作中与周围环境接触并发生作用的只是其表面, 良好的表面性能将大大提高材料的整体使用性。本文中以氦气作为保护气体对镁合金试样表面进行的激光熔凝细晶强化处理, 研究熔凝层表面的微观组织和熔凝层的深度随激光参量改变而发生的变化情况, 同时测量了被处理试样沿截面的硬度变化。

作者简介: 许仁军 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事镁合金的激光改性方向的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: ykzhang@ujs.edu.cn

收稿日期: 2007-07-03; 收到修改稿日期: 2007-12-24

## 1 实验材料及方法

实验材料为 AZ91 镁合金,其原始组织主要为  $\alpha$ -Mg,  $\beta$ -Al<sub>2</sub>Mg<sub>7</sub>,将 AZ91 镁合金经过线切割成 20mm × 20mm × 5mm 的小试样,将其浸入丙酮中用超声波进行清洗以去除表面的油脂,再将待处理表面经砂纸粗磨,将待处理表面放在蜡烛火焰上方使其形成很薄的碳层,微小的碳颗粒的存在将大大地提高镁合金表面对激光的吸收,最后进行 CO<sub>2</sub> 激光处理,并且用氦气作为保护气体,以防止镁合金表面和氧气反应。

激光熔凝处理的工艺参量为:激光功率 1000W,扫描速度从 300mm/m in ~ 600mm/m in,光斑直径为

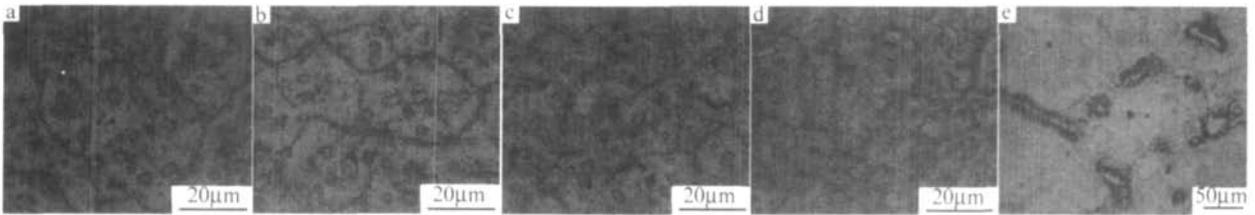


Fig 1 Surface microstructure of AZ91 magnesium alloys that under different scanning speeds and untreated sample

表面显微组织的激光扫描速度为 300mm/m in,其显微组织的晶粒尺寸的平均值约为 30 $\mu$ m,图 1b 所示的激光扫描速度为 400mm/m in,其显微组织的晶粒的平均尺寸约为 25 $\mu$ m,图 1c 所示的激光扫描速度为 500mm/m in,其晶粒平均尺寸约为 20 $\mu$ m,图 1d 所示的激光扫描速度为 600mm/m in,晶粒的平均尺寸约为 15 $\mu$ m。图 1e 所示为未经处理的镁合金的显微组织,其晶粒尺寸约为 150 $\mu$ m。由图可知,经激光处理的镁合金的表面出现了明显的晶粒细化,这主要与该条件下极高过冷度所达到的高形核率和凝固速度有关。在激光熔凝过程中,在金属熔池中存在两种现存的固液相界面,其一是熔池边界被加热到微熔状态的基材晶粒或相界,其二是高熔点杂质的悬浮质点或晶粒残骸,非均匀晶核就依附这种表面上形核,从而使金属凝固过程中的形核率显著提高,另外再加上激光熔凝极高的冷却速度,有效的抑制晶粒长大,获得精细的凝固组织,并且随着激光扫描速度的提高晶粒尺寸变小,出现这种现象的原因主要是由于扫描速度越快其冷却的速度也就越快,从而导致了随着扫描速度的增加晶粒的尺寸逐渐变小。

另外,由图 1e 可见,未经处理的镁合金表面晶粒比较粗大,沿着晶界有  $\beta$  相析出。而经过激光处理的试样的晶界上很少甚至没有  $\beta$  相析出。还有一个明显变化就是在未处理试样的  $\alpha$  相中的成分比较均匀,而用激光熔凝处理的试样表面的  $\alpha$  相中弥散着黑色轮廓线的新相,其效果与固溶时效相似。因此激光熔

4mm,激光束每次扫描的进给量为 1.5mm。

将激光处理过的试样用砂纸从 240<sup>#</sup> 磨到 1200<sup>#</sup>,再对其进行抛光处理,用 5% 的乙酸溶液进行腐蚀,在光学显微镜下观察其显微组织的变化,并利用显微硬度计对熔凝试样的横截面的显微硬度进行测试,载荷为 100g,加载时间 10s,沿激光作用区由表及里每隔 0.05mm 测试 3 次,取其算术平均值。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 表面的显微组织

图 1 所示为不同扫描速度处理的镁合金激光熔凝层和未经处理的镁合金的表面显微组织,图 1a 所示的

凝的综合效果为晶粒细化基础上的固溶时效强化。

### 2.2 熔凝层的形貌

图 2a ~ 图 2b 中所示熔池的形貌所对应的激光处理参量分别与图 1a ~ 图 1b 中的参量相对应,当激光扫描速度较低时,材料的热积累比较严重,使得材料的熔化深度比较大,由图可以很明显的得到,随着激光扫描速度的提高,熔凝层的深度有明显的降低。

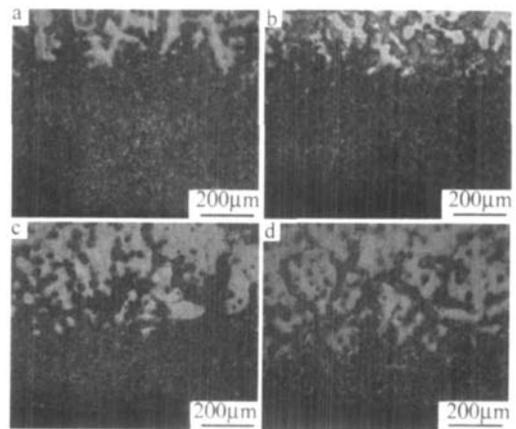


Fig 2 The depth of the molten pools under different scanning speed

由图 2 的经激光处理过的 AZ91 镁合金的显微组织可知,随着激光扫描速度的加快其熔凝层的深度逐渐变浅。

### 2.3 截面的显微硬度

图 3 所示为不同扫描速度下激光熔凝层显微硬度沿熔凝层深度的分布曲线,图中 B、C、D、E 曲线分别与图 2a、图 2b、图 2c、图 2d 中的熔凝层相对应,在激光

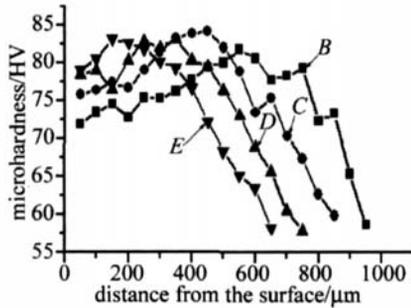


Fig 3 The microhardness distribution curves of the cross section of samples treated with different laser parameter

熔凝过程中,由于激光熔凝的快速加热和冷却作用,使材料表面产生细晶强化,同时随着激光扫描速度的加快使得硬度有所提高,使熔凝层硬度相对于基体的硬度有明显的提高,符合 Hall-Petch 公式。由于熔池亚表层与基体接近其散热速度相对于表层的散热速度较快,因此亚表层的晶粒细化的效果更为明显,从而使不同扫描速度下激光熔凝区的最高显微硬度位于亚表层。

图 3 所示的硬度变化趋势与 Hall-Petch 公式相符,根据 Hall-Petch 公式:

$$\sigma_s = \sigma_0 + Kd^{1/2} \quad (1)$$

式中,  $\sigma_s$  为屈服强度,  $\sigma_0$  是单晶屈服强度,  $d$  是平均晶粒尺寸,  $K$  为 Hall-Petch 常数,  $K$  值随 Taylor 因子的增加而变大, Taylor 因子的大小与滑移系的数量有关,密排六方结构的滑移系有限,其 Taylor 因子大于面心和体心立方结构的 Taylor 因子,故密排六方结构金属材料的强度受晶粒尺寸的影响较大,纯镁及常规镁合金的 Hall-Petch 常数  $K = 280 \text{MPa} \cdot \mu\text{m}^{1/2}$  [31]。因此与铝合金相比,镁合金的晶粒细化对改善强度和延展性来说更加有效。Hall-Petch 关系是建立在位错塞积理论基础上,经过大量试验的证实,总结出来的多晶材料的屈服应力(或硬度)与晶粒尺寸的关系,如用硬度来表示则为:  $H_v = H_0 + Kd^{1/2}$ 。

### 3 结论

激光表面熔凝技术是一种新型的金属材料表面改性技术,作者利用其快速加热和冷却的特性对 AZ91

镁合金进行了表面熔凝处理,得到了晶粒明显细化的表面组织。晶粒细化是提高镁合金铸件性能的重要途径,镁合金晶粒越细小,其力学性能和塑性加工性能越好。此外,镁合金经过晶粒细化处理后铸件中的金属间化合物相更细小且分布更均匀,由实验数据得出其晶粒尺寸降低了一个数量级,由显微硬度的测量结果显示细晶强化的效果比较明显,并且有新相弥散在晶粒内部,这也是提高其硬度的另一因素,同时第 2 相的消失能减轻其电偶腐蚀,也就是使其耐腐蚀性能提高。

### 参考文献

- [1] LEIM K, LIP, YANG H G, *et al* Wear and corrosion resistance of Al-ion implanted AZ31 magnesium alloy [J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 201 (9/11): 5182-5185.
- [2] ABBAS G, LIU Z, SKELDON P. Corrosion behavior of lasermelted magnesium alloys [J]. Applied Surface Science, 2005, 247 (1/4): 347-353.
- [3] GAO Y L, WANG C Sh, LIU H B, *et al* Grain refinement of AZ91HP magnesium alloy treated by vacuum laser melting [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2006, 27 (1): 92-95 (in Chinese).
- [4] LIU Zh, ZHANG K, ZENG X Q. Theoretical basis and application of magnesium-based alloy [M]. Beijing: China Machine Press, 2002: 1-14 (in Chinese).
- [5] CHEN Zh H. Magnesium alloys [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 203-204 (in Chinese).
- [6] ZHANG H Y, LI H L, GUO Y N. Study of corrosion resistance of chemical conversion coatings on magnesium alloys substrate [J]. Materials Protection, 2007, 40 (1): 10-12 (in Chinese).
- [7] QIAN J G, LI D, WANG Ch, *et al* EIS study on corrosion process of anodized film on AZ91D magnesium alloy [J]. Raremetal Materials and Engineering, 2006, 35 (8): 1280-1284 (in Chinese).
- [8] MAO Y J, SHEN Ch J, LIU J J. Corrosion resistance of ceramic layer on AZ91D magnesium alloy formed by micro-arc oxidation [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2006, 34 (10): 43-46 (in Chinese).
- [9] GUO H F, AN M Zh. Electroplating and electroless plating on magnesium and its alloys [J]. Electroplating & Pollution Control, 2004, 24 (2): 1-5 (in Chinese).
- [10] WANG X F, LÜ X D, CHEN G N, *et al* Simulation and verification of the temperature field in laser hardening [J]. Laser Technology, 2004, 28 (2): 162-165 (in Chinese).
- [11] LI H Q, XING D M, TONG J W, *et al* Relationship between yield stress and microscopic structure of nanostructured material [J]. Journal of Tianjin University, 2000, 33 (5): 671-674 (in Chinese).

(上接第 479 页)

- [4] ADRIAN C S Attenuation and impulse response for multiple scattering of light in atmospheric clouds and aerosols [J]. Appl Opt, 2006, 45 (13): 2842-2844.
- [5] XIA M, YANG K Ch, XU D Sh, *et al* Monte Carlo simulation of depolarization during laser transferring in the water [J]. Laser Technology, 2005, 29 (1): 24-27 (in Chinese).
- [6] DU Zh F, LU YM, YANG Zh K, *et al* Monte Carlo calculations of the received oceanic lidar signals [J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26 (1): 52-56 (in Chinese).

- [7] YAN X G, PENG F Y, XU G H, *et al* Analysis of temporal and frequency characteristics of fore-scattered laser in ocean channel [J]. Laser Technology, 2005, 29 (3): 267-269 (in Chinese).
- [8] ARNDAM B, AN L A O, KUNAL M. Experimental simulation of lightning optical emissions in clouds [J]. J Phys, 2006, D39 (3): 575-583.
- [9] TAN X Q, CHEN R. A study for pulse width stabilization technique used in underwater laser pulse position modulation communication [J]. Opto-electronic Engineering, 2002, 29 (1): 23-25 (in Chinese).