

文章编号: 0258-7025(2008)11-1752-04

镁合金表面激光熔覆纳米三氧化二铝

陈长军^{1,2} 张 敏² 常庆明² 张诗昌² 马洪岩³,

¹ 兰州理工大学甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050;

² 武汉科技大学 钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 材料与冶金学院激光加工中心, 湖北 武汉 430081;

³ 沈阳航空工业学院材料工程系, 辽宁 沈阳 110034)

摘要 镁合金由于密度小、比强度高、良好的导电和导热性而成为工业结构工程和运输工具中非常有应用前景的工程材料。但由于镁合金的耐磨性差, 成为阻碍镁合金应用与汽车工业或其他工程部件中作为转动部件的一大障碍。为提高镁合金的表面耐磨性, 各种表面处理技术应运而生。其中激光表面改性处理技术比较引人注目。为提高镁合金的表面耐磨性, 采用激光熔覆纳米 Al_2O_3 颗粒的办法对 ZM5 镁合金进行了表面改性处理。激光改性是采用 500 W 脉冲 Nd:YAG 熔化预置在 ZM5 表面的纳米三氧化二铝进行处理。激光熔覆后, 对改性层的显微结构进行了分析。同时对显微硬度与激光加工参数之间的关系以及耐磨性均进行了测试。改性层的显微硬度可以高达 350 HV, 而基材的显微硬度只有 100 HV。激光改性处理层的耐磨性与基材相比也得到了显著的提高。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 纳米陶瓷涂层; 磨损; 镁合金; 纳米三氧化二铝

中图分类号 TG. 156. 99 **文献标识码** A **doi:** 10. 3788/CJL20083511. 1752

Laser Surface Cladding of a ZM5 Magnesium Alloy with Nano- Al_2O_3

Chen Changjun^{1,2} Zhang Min² Chang Qingming² Zhang Shichang² Ma Hongyan³

¹ State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-Ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;

² Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Laser Processing Research Centre, College of Materials & Metallurgy, Wuhan University of Science & Technology, Wuhan, Hubei 430081, China;

³ Department of Materials Engineering, Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang, Liaoning 110034, China

Abstract Mg alloy has become promising materials for industrial structural and transport applications due to their attractive properties such as low density, high specific strength, good electrical and thermal conductivity. The poor wear property is the major concern when it is subjected to motion in automotive or other engine components. To improve its wear property, many different surface engineering methods have been developed. Laser surface cladding technology is a very promising one among these methods. Nano- Al_2O_3 particles are dispersed on the ZM5 surface by laser surface engineering to improve its wear resistance property. Laser processing is carried out with a 500 W pulsed Nd:YAG laser by melting preplaced nano- Al_2O_3 particles on the surface of ZM5. Following laser processing, a detailed microstructural analysis of the surface modified layer is carried out. The microhardness of the surface layer is measured as a function of laser parameters and wear resistance property was evaluated in details. Microhardness of the surface layer is significantly improved to as high as 350 HV as compared to 100 HV of the substrate compared to the as-received specimen, the wear resistance property of the laser surface modified samples is considerably improved.

Key words laser technique; laser cladding; nano-ceramic coating; wear; magnesium alloy; nano- Al_2O_3

收稿日期: 2008-09-16; **收到修改稿日期:** 2008-10-09

基金项目: 有色金属合金及加工教育部重点实验室开放基金(SKL07002), 湖北省教育厅科学技术研究计划优秀中青年人才项目(Q20081101)资助课题。

作者简介: 陈长军 (1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事金属材料的激光焊接与表面熔敷的研究。

E-mail: chjchen2001@yahoo.com.cn; laserwh@yahoo.cn

1 引言

镁合金是性能优异的绿色工程材料,但其耐腐蚀性和耐磨性能差,限制了镁合金的广泛应用,特别是在苛刻条件下的使用。为此,镁合金在使用前均需进行表面防护处理。激光熔敷技术对有效改善镁合金的表面耐腐蚀性及耐磨性受到越来越广泛的关注。

为提高 MEZ 镁合金的耐磨性和耐腐蚀性, Majumdar 等^[1~2]在 MEZ 镁合金上进行了激光制备 Al+SiC, Al+Al₂O₃ 涂层的研究,结果耐腐蚀性和耐磨性均得到提高。国内的 Yao Jun 等^[3]和高亚丽等^[4]则分别进行了 AZ91D 上熔敷 Al+Si+Al₂O₃ 和熔敷 Al₂O₃ 的实验,耐腐蚀性和耐磨性均得到不同程度的改善。唯一美中不足的是,由于使用的陶瓷颗粒的粒度为 40~60 μm,陶瓷颗粒与 Mg 之间的润湿性相对较差而极易产生裂纹。

纳米材料由于其结构的特殊性,具有一般材料难以获得的优异性能,为涂层材料性能的提高提供了有利条件。将激光熔敷技术应用于纳米陶瓷涂层的制备工艺,利用激光的能量密度高、可选区加工、凝固速度快等特点,有利于控制涂层晶粒的生长,获得具有纳米结构、性能优异的陶瓷涂层。纳米材料的激光熔敷则体现了纳米材料与激光熔敷技术的进一步复合,该技术的成功使用无疑将金属材料的高强韧性、良好的工艺加工性与纳米陶瓷材料的优异性能有机地结合起来,从而达到显著改善工件材料表面耐蚀、耐磨、耐热等性能的目的^[5~8]。

作者已经尝试在 ZM5 镁合金基材上,以 Al+纳米 SiC 粉末为体系进行了激光熔敷,结果获得致密的复合涂层, SiC 颗粒直径大约为 100 nm,表面改性层显微硬度得到提高,耐腐蚀性改善^[9]。为了提高镁合金的耐磨性,本文使用激光熔敷技术在 ZM5 镁合金表面制备出含 Al₂O₃ 的纳米陶瓷涂层。

2 实验方法

实验选用在航空工业中应用最为广泛的国产 ZM5 镁合金为基材,其成分见表 1。实验采用脉冲 500 W Nd:YAG 固体激光器进行激光熔覆实验。镁合金 ZM5 表面经过除油、喷砂和清洗并经冷风吹干,然后用粘结剂将粒度为 30 nm 的 SiC 粉末预先铺设在 ZM5 表面上,其厚度大约为 0.4 mm。样品被夹在一个放在机床控制台上移动速度为 100~400 mm/min 的水冷却铜块上,采用光斑直径为 2 mm 的激光熔化 SiC 粉末,使用氩气对熔池进行保护,流速为 6 L/min,喷嘴和试样之间的夹角保持在 50°左右。保持激光束和样品之间相对速度来控制基体-激光束之间的相互作用时间和范围。采用 25% 的搭接率,为了实现激光处理后表面微观结构和成分的均匀化,在进行激光操作的下一道次前,需等待足够长时间使得前一次激光处理后的温度达到室温^[10,11]。实验时选取的激光熔覆参数如表 2 所示。

表 1 ZM5 镁合金成分

Table 1 Chemical composition of ZM5 Mg alloy

Mg	Al	Mn	Zn	Fe	Cu	Si	Ni	Be	others
Bal.	8.5~9.5	0.17~0.40	0.45~0.9	0.004	0.025	0.08	0.001	0.0005~0.0015	0.01

表 2 ZM5 上激光熔覆纳米 Al₂O₃ 时的参数

Table 2 Parameters of clad ZM5 with nano-Al₂O₃ on the surface

No.	<i>I</i> / A	<i>t</i> / ms	<i>f</i> / Hz
1	200	5	4
2	160	5	4
3	100	5	4
4	80	5	4
5	70	5	4

激光熔敷后沿激光扫描的垂直方向截取试样制备出金相试样。采用金相显微镜、扫描电镜进行组

织观察。采用 HVS-100 数显显微硬度计测量熔覆层显微硬度,金刚石显微压头,载荷为 200 g,加载时间为 15 s。最后采用环块磨损实验对其摩擦性能进行测试。试样面积为 40 mm×20 mm。

3 实验结果分析与讨论

图 1(a)~(e)分别对应表 2 中参数 1~5 时获得的激光改性层截面的低倍显微组织。涂层与基材冶金结合,热影响区非常窄,表面改性层主要由弥散的 Al₂O₃ 以及 Al, Mg₁₇Al₁₂ 等组成。图 2 为界面处的显微组织图,除图 2(a),图 1(e)在界面处存在气孔外,均无气孔、裂纹等缺陷存在。

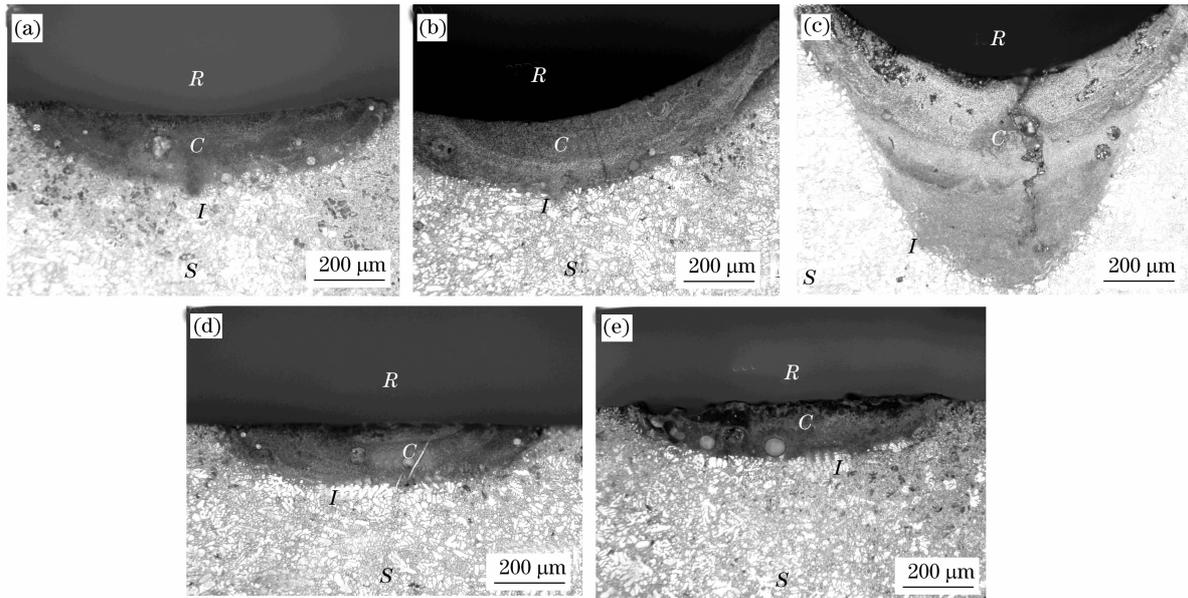


图 1 表 2 中不同参数下得到的涂层与基材的金相

Fig.1 Optical microscope of the coating and substrate under different processing parameters

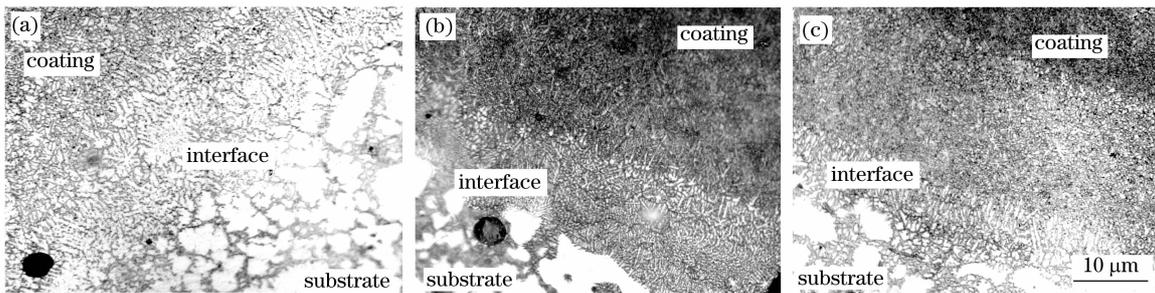


图 2 不同参数下得到的涂层与基材处界面的金相组织:(a)1; (b)2;(c)3

Fig.2 Optical microscope of the cross-section near the interface showing composite surface and substrate under processing parameters (a)1, (b)2, (c)3

在参数 4 下 ZM5 表面激光熔敷纳米 Al_2O_3 后得到的涂层的 SEM 照片见图 3。当激光输出电流亦即激光功率增加时,由于熔化深度增加,纳米

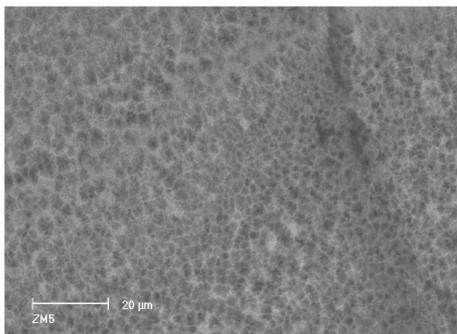


图 3 在参数 4 时 ZM5 表面激光熔敷纳米 Al_2O_3 后涂层的 SEM 像

Fig.3 Scanning electron micrograph (SEM) of the top surface of laser surface treated ZM5 with nano- Al_2O_3 , under processing parameter 4

Al_2O_3 被基体镁合金稀释的程度就相对比较严重,由此单位面积内 Al_2O_3 的数量就会少,这样相应的显微硬度就会低。但如果功率太低,表面预置的 Al_2O_3 不能完全被激光熔融,同样也不能提高单位面积内 Al_2O_3 的比例。此时不能观察到纳米颗粒的具体形态,需要使用透射电镜(TEM)等分析手段进行分析。

ZM5 表面激光熔覆纳米 Al_2O_3 后涂层与基材的显微硬度结果见图 4。涂层的显微硬度均高于未处理的 ZM5 基材。涂层的显微硬度在 125~350 HV,而基材的显微硬度只有 100 HV。从图 4 可以非常明显地观察到,显微硬度的值随着激光能量的增加而有所降低。表面显微硬度的提高主要是改性层中含有纳米 Al_2O_3 以及激光快速凝固造成的晶粒细化。同时 ZM5 镁合金中 Al 在激光快速作用下的固溶也对显微硬度的提高起到了一定的有利作

用。当激光输入能量增加时,由于 Al_2O_3 颗粒单位面积的分布将变少(激光热作用区域变大),从而使硬度有所降低。

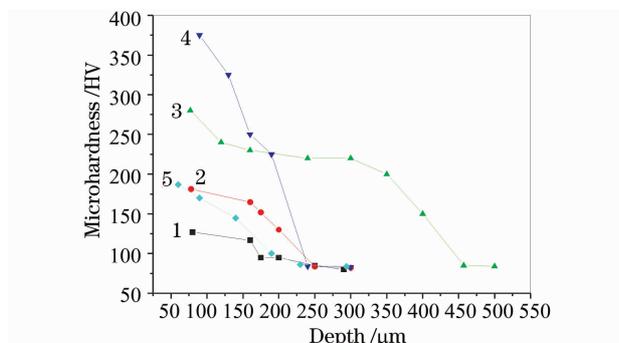


图 4 ZM5 上激光熔覆纳米 Al_2O_3 后硬度随深度变化的曲线图(曲线 1, 参数 1; 曲线 2, 参数 2; 曲线 3, 参数 3; 曲线 4, 参数 4; 曲线 5, 参数 5)

Fig. 4 Microhardness profile along depth for laser surface modified ZM5 with nano- Al_2O_3 lased with different laser processing conditions (curve 1: parameter 1; curve 2: parameter 2; curve 3: parameter 3; curve 4: parameter 4; curve 5: parameter 5)

ZM5 基材与激光处理后的试样的耐磨性采用环块摩擦磨损试验机进行测试的结果见图 5。图 5 是在激光加工参数 4 下测得的实验结果。可以看到在参数 4 时,改性层的耐磨性大大提高。耐磨性的提高归因于激光改性硬度的提高以及硬质陶瓷颗粒 Al_2O_3 的颗粒增强作用。

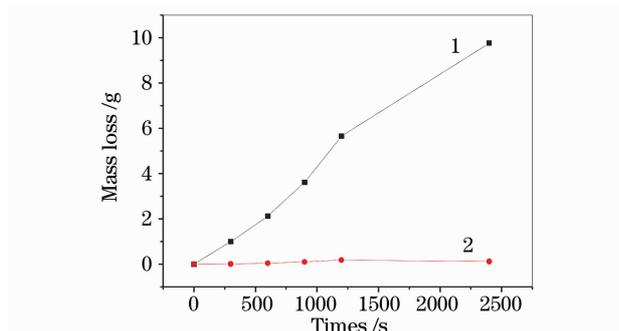


图 5 在表 2 中参数 4 时激光熔敷处理纳米 Al_2O_3 时(曲线 2)的试样与 ZM5 基材(曲线 1)的摩擦失重曲线
Fig. 5 Comparison of the kinetics of wear loss of as-received ZM5 (curve 1) and laser surface treated ZM5 with nano- Al_2O_3 (curve 2) with processing parameter 4 listed in table 2

4 结 论

在 ZM5 上预置纳米 Al_2O_3 粉末,在不同的激光加工参数下进行熔敷实验,得到如下结论:优化的激光加工参数为 80 A, 5 ms, 4 Hz, 熔敷层的显微硬度高达 350 HV, 基材的显微硬度为 100 HV, 熔敷纳米 Al_2O_3 后的改性层的摩擦性能得到改善,改善的原因是纳米 Al_2O_3 颗粒的增强作用以及激光熔化造成的 Al 元素固溶度增大以及晶粒细化作用。

参 考 文 献

- 1 J. Dutta Majumdar, B. Ramesh Chandra, R. Galun *et al.*. Laser composite surfacing of a magnesium alloy with silicon carbide [J]. *Composites Science and Technology*, 2002, **63**(6):771~778
- 2 J. Dutta Majumdar, B. Ramesh Chandra, B. L. Mordike *et al.*. Laser surface engineering of a magnesium alloy with Al + Al_2O_3 [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2002, **179**(2~3): 297~305
- 3 Yao Jun, G. P. Sun, Hongying Wang *et al.*. Laser (Nd: YAG) cladding of AZ91D magnesium alloys with Al + Si + Al_2O_3 [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, **407**(1~2):201~207
- 4 Gao Yali, Wang Cunshan, Yao Man *et al.*. The resistance to wear and corrosion of laser-cladding Al_2O_3 ceramic coating on Mg alloy [J]. *Applied Surface Science*, 2007, **253**: 5306~5311
- 5 Hua Guoran, Luo Xinhua, Huang Yinhui *et al.*. Microstructure and corrosion characteristics of plasma-sprayed ceramic coating by laser remelting of nano- Al_2O_3 modifying [J]. *Chinese J. Nonferrous Metals*. 2004, **14**(6):934~938
花国然, 罗新华, 黄因慧等. 激光重熔改性等离子喷涂陶瓷涂层的组织及其耐腐蚀性能 [J]. *中国有色金属学报*, 2004, **14**(6): 934~938
- 6 Hua Guoran, Huang Yinhui, Zhao Jianfeng. Plasma-sprayed ceramic coating by laser cladding of Al_2O_3 nano-particles [J]. *Chinese J. Nonferrous Metals*, 2004, **14**(2):199~203
花国然, 黄因慧, 赵剑峰. 激光熔覆纳米 Al_2O_3 等离子喷涂陶瓷涂层 [J]. *中国有色金属学报*, 2004, **14**(2):199~203
- 7 Zhang Jianhua, Tian Zongjun, Zhao Jianfeng *et al.*. Study on laser cladding of nano- Al_2O_3 composite coating [J]. *Laser Journal*, 2004, **25**(3):67~69
张建华, 田宗军, 赵剑峰等. Al_2O_3 纳米复合陶瓷涂层激光熔敷试验研究 [J]. *激光杂志*, 2004, **25**(3):67~69
- 8 Li Hualin, Wang Maocai, Zhao Jibing *et al.*. Microstructure character of aluminium alloy coating with Nd: YAG pulsed laser SiC composition [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6):765~768
李华玲, 王茂才, 赵吉宾等. 铝合金 Nd:YAG 脉冲激光 SiC 复合涂层组织特征 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(6):765~768
- 9 Chen Changjun, Zhang Min, Chang Qingming *et al.*. Laser cladding of ZM5 magnesium base alloy with Al + Nano-SiC powder [J]. *Lasers in Engineering*, 2008, **18**:85~94
- 10 Liu Weijun, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Novel Fabry-Perot fiber-optica refractive-index sensor based on laser micromachining [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7):1400~1404
刘为俊, 饶云江, 冉曾令等. 基于激光微加工的新型光纤法布里-珀罗折射率传感器 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(7):1400~1404
- 11 Lei Ma, Yundong Zhang, Nana Wang *et al.*. Nonlinear optical properties of polyaniline composite materials [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(10):599~600