

激光功率对 AZ91HP 镁合金熔凝层组织和性能影响

高亚丽^{*1}, 王存山¹, 刘红宾¹, 姚 曼²

(1.大连理工大学 三束材料改性国家重点实验室, 辽宁 大连 116024
2.大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为提高镁合金表面耐磨蚀性,开展了真空条件下 AZ91HP 镁合金 CO₂ 激光熔凝处理. 固定扫描速度下通过改变激光功率,分析讨论了激光功率对熔凝层组织和性能的影响. 研究结果表明,随激光功率增加,硬质相 U-Mg₁₇Al₁₂ 含量逐渐增加,熔凝层枝晶逐渐粗化,枝晶变长;由于枝晶细化和硬质相 U-Mg₁₇Al₁₂ 的综合作用,熔凝层在激光功率为 3 kW 时具有较高的硬度,较好的耐磨性;熔凝层耐蚀性随功率增加而提高.

关键词: 镁合金; 激光功率; 微观组织; 性能
中图分类号: TG146 **文献标识码:** A

镁合金具有密度小,比强度、比刚度、阻尼性能好等优点,因此,在汽车工业、通讯电子业和航空航天工业等领域正得到日益广泛的应用. 但镁合金低的耐磨性和耐蚀性制约了其性能优势的发挥,因此,采用表面改性技术增强镁合金的表面性能具有重要的现实意义^[1~3]. 以高能量密度的激光束作为热源对镁合金进行表面改性处理的应用研究正在进行,并显现出极大的优越性^[4~6]. 本文主要通过高功率快速扫描工艺对 AZ91HP 镁合金进行激光熔凝处理,研究激光功率对熔凝层中 U 相含量、枝晶尺寸的影响,以及熔凝层的硬度、耐磨性及耐蚀性随激光功率的变化规律.

1 实验材料及方法

实验材料为 AZ91HP 镁合金,原始组织为 T-Mg + U-Mg₁₇Al₁₂,试样尺寸为 15 mm × 15 mm × 10 mm,表 1 示出了其具体化学成分. 将试样置于真空容器中(真空度为 10⁻³ Pa),

通氩气保护,然后采用横流 CO₂ 激光器对试样进行激光熔凝处理. 激光熔凝工艺参数:扫描速度 50 mm/s,激光功率 2~5 kW,光斑直径 3 mm,搭接率 30%.

采用 XRD-6000 型 X 射线衍射仪、JSM-5600LV 型扫描电镜对熔凝层的物相及微观结构进行分析. 利用 DMH-2LS 型努氏硬度计测试熔凝试样的显微硬度,载荷 0.05 N,加载时间 10 s,沿激光硬化区由表及里每隔 0.05 mm 测试 3 次,取其算术平均值. 摩擦磨损实验在 CETRUM T-2 磨损实验机上进行,采用球盘往复磨损方式. 上试样为直径 5 mm 的 GCr15 钢球(HRC55),下试样为激光熔凝样品. 实验中,上试样所加法向载荷为 5 N,滑移距离 5 mm,时间 30 min. 腐蚀实验在 Potentiostat/Gaivanostat Model 273 上进行,参比电极为甘汞电极,腐蚀介质为 3.5% NaCl 溶液.

表 1 AZ91HP 镁合金的化学成分
Tab. 1 Chemical composition of AZ91HP magnesium alloy %

w(Al)	w(Zn)	w(Mn)	w(Si)	w(Fe)	w(Cu)	w(Ni)	w(Be)	w(Mg)
8.89	0.562	0.204 1	0.044 3	0.003 0	0.003 4	0.000 9	0.001 2	bal

收稿日期: 2006-01-05; 修回日期: 2007-05-28.
基金项目: 大连理工大学青年教师培养基金资助项目.
作者简介: 高亚丽^{*} (1978-), 女, 博士生, E-mail: dehuigy@126.com.
1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2 实验结果与分析

2.1 激光功率对熔凝层 U 相含量的影响

不同激光功率下熔凝层中 U 相含量发生明显的变化,图 1 所示为不同功率下熔凝层 X 射线分析结果. 可见随激光功率增加,U 相衍射峰增强. 由图 1 所得半定量分析结果如图 2 所示,在扫描速度一定情况下,随激光功率的增加,U 相和 T 相主强峰的强度比 I_U/I_T 逐渐增加. 这主要由于激光熔凝过程中,高能量密度的激光束使低熔点的镁合金表层 Mg 发生烧损,导致熔凝区镁元素含量降低,铝元素的相对含量升高,合金成分点向富铝区偏移. 另一方面由于激光熔凝过程具有远离平衡态的动力学转变特征,改变了 $U-Mg_{17}Al_{12}$ 相在平衡相图中的位置,即可能由于熔凝过程中的非平衡转变而导致该相含量相对铸态材料有所增加.

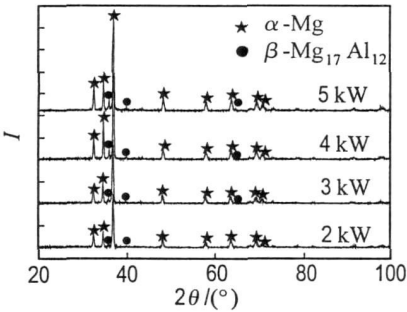


图 1 不同功率下熔凝层 X 射线分析
Fig. 1 X-ray diffraction spectrums of the melted layers under different powers

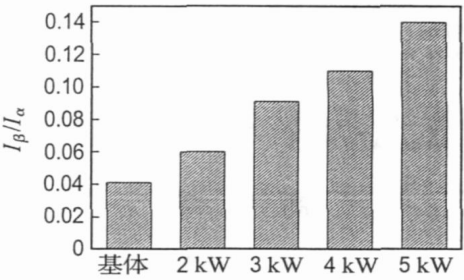


图 2 半定量分析结果
Fig. 2 Results of the semi-quantitative assessment

2.2 激光功率对熔凝层组织的影响

在扫描速度和光斑直径固定的情况下,不同激光功率下熔凝层显微组织如图 3 所示,分析可知,其均为显著细化的树枝晶,且随激光功率的增加,枝晶尺寸增加. 这主要由于激光热源的快速加热、快速冷却特性,当激光功率较小时,形成的熔池较浅,周围基体散热条件较好,使得在随后的凝固过程中晶核在长度和宽度方向都没有充分时间长大,形成的枝晶尺寸较细小;随着激光功率的增大,形成的熔池较深,枝晶生长空间增大,温度梯度增加,枝晶的生长更易进行,枝晶尺寸随之增大.

进一步分析发现,随功率增加,枝晶尺寸在长度上增加幅度远大于宽度上的增加幅度. 据测定,激光功率由 2 kW 增加到 5 kW 时,枝晶长度方向的增加幅度约为宽度方向上增加幅度的 10 倍. 这是由于在激光加热过程中,熔池中散热主要依靠基体反向向外排出,熔池具有定向凝固的

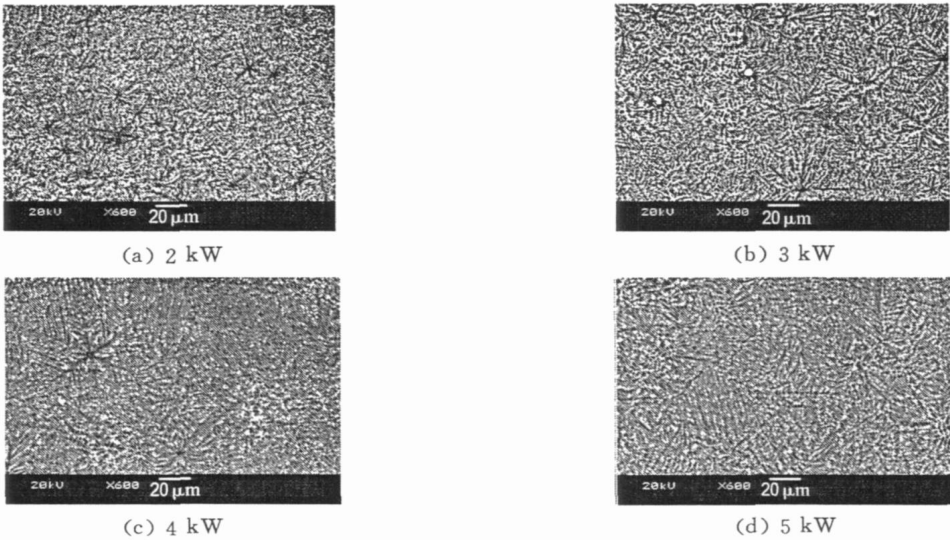


图 3 不同功率下熔凝层显微组织
Fig. 3 Microstructure of the melted layers under different powers

特征,使得枝晶长度方向生长远远大于宽度方向生长.

2.3 激光功率对熔凝层硬度的影响

图 4 为不同激光功率下熔凝层横截面硬度分布曲线,由此可见,不同功率下熔凝层硬度曲线均呈台阶形,即熔凝层表层元素烧损及枝晶略微粗化,使其硬度最大值出现在亚表层,过渡到枝晶粗大的热影响区硬度则陡降,直到镁合金基体时硬度降为最低 (80 HK). 然而随激光功率的增加,熔凝层硬度呈现先增加后降低的趋势,这主要由于熔凝层的硬度受枝晶细化程度、硬质相 $U-Mg_{17}Al_{12}$ 的含量及其在熔凝层中的分布所影响,通常枝晶越细小,硬质相含量越高,硬度越高. 在本研究中,随激光功率增加,熔凝层组织逐渐粗化,但硬质相 $U-Mg_{17}Al_{12}$ 的含量逐渐增加,两者的综合作用在激光功率为 3 kW 时为最佳,从而使其硬度值最高,而后随着功率增加,硬度下降.

2.4 激光功率对熔凝层耐磨性的影响

不同功率下熔凝层磨损体积 V_w 如图 5 所示. 由图可见,经不同功率处理的熔凝层耐磨性均较

原始镁合金有很大提高. 而且随着激光功率增加,熔凝层耐磨性的变化趋势与硬度变化趋势相一致,即在激光功率为 3 kW 时熔凝层耐磨性最好,而后随着激光功率增加,耐磨性降低.

在干滑动磨损试验条件下,镁合金的磨损特征主要以磨粒磨损为主,图 6 为不同功率下激光熔凝层磨痕形貌,可见熔凝层表面出现了作为磨粒磨损特征的犁沟,且在激光功率为 3 kW 时,磨痕宽度最小. 在磨粒磨损条件下,耐磨性与硬度存在相对应的关系,硬度越高,耐磨性越好,熔凝层的硬度结果表明在激光功率为 3 kW 时硬度最高,相应地其耐磨性也最佳,而后随功率增加,硬度降低,耐磨性下降.

2.5 激光功率对熔凝层耐蚀性的影响

图 7 所示为原始镁合金和激光熔凝处理镁合金的阳极极化曲线,自腐蚀电位和自腐蚀电流密度如表 2 所示. 经高功率激光熔凝后,熔凝层中腐蚀电流密度与原始镁合金相比有所降低,腐蚀电位略微升高,熔凝层耐蚀性有所提高. 而且随

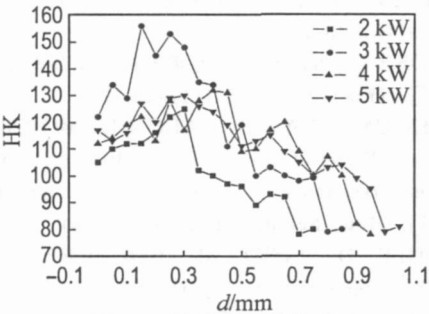


图 4 熔凝层显微硬度

Fig. 4 Microhardness of the melted layers

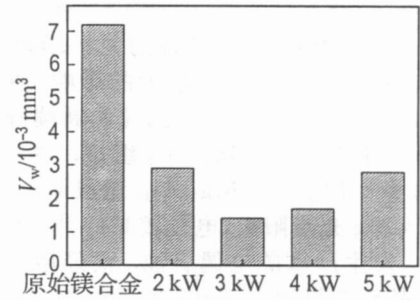


图 5 不同功率下熔凝层磨损体积

Fig. 5 Worn volume of melted layers under different powers

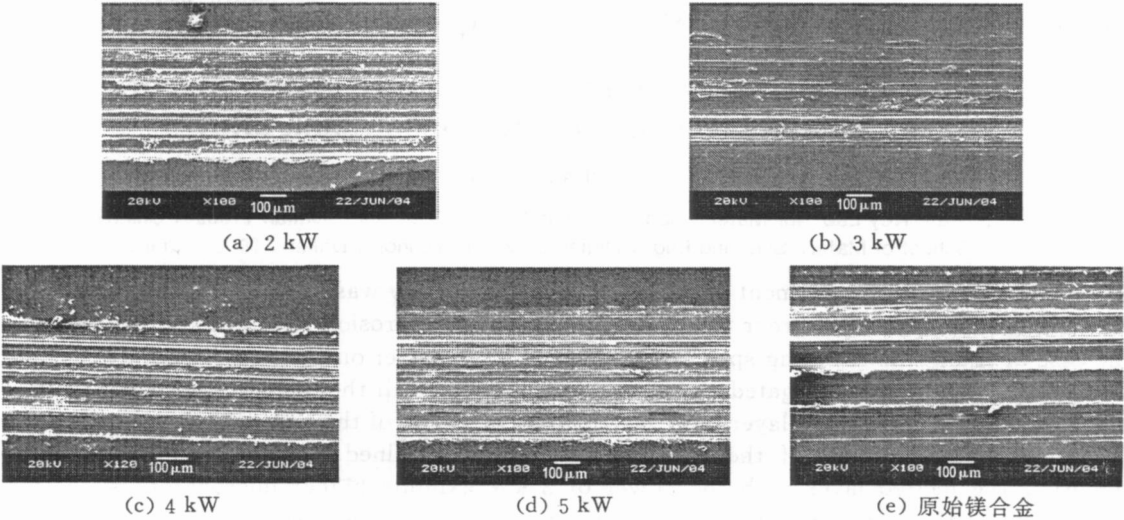


图 6 不同功率下熔凝层磨损形貌

Fig. 6 Worn morphology of the melted layers under different powers

激光功率增加,耐蚀性提高显著.

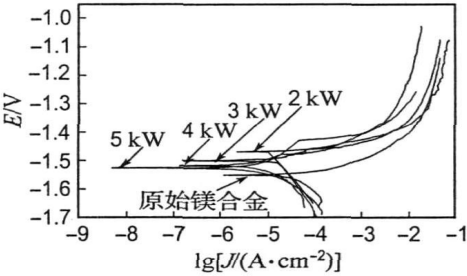


图 7 原始镁合金和熔凝层的极化曲线
Fig. 7 Potentiodynamic polarization curves of as-received Mg alloy and the melted layers
表 2 原始镁合金和熔凝层的腐蚀电位和腐蚀电流密度
Tab. 2 E and J of as-received Mg alloy and the melted layers

	E/V	$J/(\mu A \cdot cm^{-2})$
原始镁合金	- 1. 54	65. 2
2 kW	- 1. 46	31. 6
3 kW	- 1. 50	19. 9
4 kW	- 1. 51	10. 0
5 kW	- 1. 52	3. 59

镁合金的显微组织(T 晶粒的大小、 U 相的数量与分布)对其腐蚀行为有很大的影响,原始镁合金显微组织由粗大的 $T-Mg$ 晶粒和断续分布在晶界处呈骨骼状的 $U-Mg_{17}Al_{12}$ 组成. 在 3. 5% $NaCl$ 溶液中 $T-Mg$ 和 $U-Mg_{17}Al_{12}$ 组成原电池,电位较低的 $T-Mg$ 充当阳极,电位较高的 $U-Mg_{17}Al_{12}$ 充当阴极,发生严重的电偶腐蚀. 而经激光熔凝处理后, T 晶粒变得细小,同时 $U-Mg_{17}Al_{12}$ 含量有所增加,在熔凝层中的分布形式也由处于晶界处的恶化耐蚀性的骨骼状组织变为枝晶间组织, T 相含量的增加及均匀连续的分布对易受侵蚀的 T 晶粒起到了保护作用,而且熔凝层中 $U-Mg$ 所固溶 Al 含量也增加,所以熔凝层的耐蚀性得以提

高. 随激光功率增加, Al 在 $T-Mg$ 中的固溶度增加, $U-Mg_{17}Al_{12}$ 相含量增加且分布更加均匀,对 T 晶粒的保护作用增大,耐蚀性提高更加显著.

3 结 论

- (1) 熔凝层相组成为 $T-Mg$ 和 $U-Mg_{17}Al_{12}$,随激光功率增加, $U-Mg_{17}Al_{12}$ 的含量增加.
- (2) 熔凝层组织为典型细化的树枝晶,随功率增加,枝晶尺寸增加.
- (3) 熔凝层硬度和耐磨性随激光功率增加有所变化,在枝晶细化和 $U-Mg_{17}Al_{12}$ 硬质相的综合作用下熔凝层在激光功率为 3 kW 时硬度最高,磨损体积最小,耐磨性最好.
- (4) 激光熔凝后,镁合金的耐蚀性较原始镁合金有所提高,而且随激光功率增加耐蚀性提高显著.

参考文献:

[1] 翟春泉,曾小勤. 镁合金的开发和应用 [J]. 机械工程师材料, 2001, 25(1): 6-10
[2] 王之清. 国外镁合金压铸技术的发展 [J]. 铸造, 1997(8): 48-50
[3] COKE C. 由欧洲和北美两大汽车发展起来的镁研究 [J]. 铸造世界报, 2001(1): 16-17
[4] MAJUMDARA J D, GALUN R, MORDIKE B L, et al. Effect of laser surface melting on corrosion and wear resistance of a commercial magnesium alloy [J]. Mater Sci and Eng, 2003, A361 119-129
[5] DUBE D, FISET M, COUTURE A, et al. Characterization and performance of laser melted AZ91D and AM60B [J]. Mater Sci and Eng, 2001, A299 38-45
[6] ABBAS G, LIU Z, SKELDON P. Corrosion behaviour of laser-melted magnesium alloys [J]. Appl Surf Sci, 2005, 247: 347-353

Effect of laser power on microstructure and properties of melted layer of AZ91HP magnesium alloy

GAO Ya-li^{* 1}, WANG Cun-shan¹, LIU Hong-bin¹, YAO Man²

(1.State Key Lab. for Mater. Modif., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China;
2.School of Mater. Sci. and Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China)

Abstract Laser melting treatment of AZ91HP magnesium alloy was carried out under vacuum with a CO_2 laser continuous wave in order to improve the wear and corrosion resistance of magnesium alloy. In the case of fixing the scanning speed, the effect of laser power on the microstructure and property of the melted layer was investigated. The results show that with the increasing of laser power, hard phase $U-Mg_{17}Al_{12}$ of the melted layer increases, and the dendrite of the melted layer is gradually coarse and becomes long. Because of the recombination action of fined dendritic grain and hard phase $U-Mg_{17}Al_{12}$, the melted layer with the power of 3 kW exhibits higher microhardness, better wear resistance. With the increasing of the power, the corrosion resistance of the melted layer increases.

Key words magnesium alloy; laser power; microstructure; property