

激光熔凝对 AerMet100 钢显微组织及性能的影响

孟云龙¹, 杨胶溪¹, 张健全¹, 王树志², 陈虹¹, 王喜兵¹, 靳延鹏¹, 张光睿¹

¹北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124;

²中国航空工业集团有限公司北京航空材料研究院, 北京 100095

摘要 利用半导体激光对 AerMet100 钢表面进行熔凝处理,研究了激光熔凝对材料结构、耐腐蚀性能以及耐磨损性能的影响。结果表明,通过激光熔凝可在 AerMet100 钢表面获得冶金质量良好、无裂纹的熔凝层;在 750~1650 W 功率范围内,随着激光功率的增大,熔凝层的厚度增大,熔凝层的硬度、耐腐蚀性及耐磨性均提高;当激光功率为 1650 W 时,其硬度、耐蚀性以及耐磨性达到最优;经过激光熔凝处理后,AerMet100 钢未产生明显的物相改变,熔凝态中奥氏体含量减少,马氏体含量增加。

关键词 激光技术;激光熔凝;半导体激光;熔凝层;AerMet100 钢

中图分类号 TG142.33

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.021414

Effect of Laser Melting on Microstructure and Performance of AerMet100 Steel

Meng Yunlong¹, Yang Jiaoxi¹, Zhang Jianquan¹, Wang Shuzhi², Chen Hong¹,
Wang Xibing¹, Jin Yanpeng¹, Zhang Guangrui¹

¹Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing, 100124, China;

²Beijing Institute of Aeronautical Materials, Aviation Industry Corporation of China, Ltd., Beijing, 100095, China

Abstract The surface of AerMet100 steel is treated by semiconductor laser melting, and the influences of laser melting on microstructure, corrosion resistance and wear resistance of materials are investigated. The results indicate that the melting layer with a good metallurgical quality and without cracks can be obtained by laser melting. In the power range of 750-1650 W, the thickness, hardness, corrosion resistance and wear resistance of the melting layer increase with the increase of laser power. When the laser power is 1650 W, the hardness, corrosion resistance and wear resistance of the melting layer are optimal. The phase of AerMet100 steel does not change significantly after laser melting, but the austenite content decreases and the martensite content increases.

Key words laser technique; laser melting; semiconductor laser; melting layer; AerMet100 steel

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 140.5960

1 引言

飞机起落架常用的高强钢有 AerMet100、300M、AF1410、AISI4340 等^[1]。其中, AerMet100 钢是由美国 Carpenter 公司在上世纪 80 年代研发制造的一类新型超高强度钢^[2]。AerMet100 钢通

过(Mo,Cr)₂C 碳化物析出强化,是当时飞机上应用的强度和断裂韧性最高的结构钢^[3]。然而,飞机起落架特别是舰载机的起落架通常曝露在海洋腐蚀环境中,同时受到各种操作因素的影响,起落架及其构件容易腐蚀失效。起落架的腐蚀失效会使飞机发生断裂故障,造成极为严重的后果^[4-5]。此外,飞机起

收稿日期: 2017-08-29; 收到修改稿日期: 2017-09-11

作者简介: 孟云龙(1991—),男,硕士研究生,主要从事激光熔覆成形方面的研究。E-mail: meng624468722@qq.com

导师简介: 杨胶溪(1971—),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事激光熔覆成形及 3D 打印方面的研究。

E-mail: yangjiaoxi@bjut.edu.cn

落架特别是支柱外筒轴颈处在运行过程中承受强大的冲击载荷,容易产生较严重的磨损^[6-7]。因此,为确保舰载机飞行的可靠性与安全性,改善起落架材料的耐磨耐腐蚀性就变得尤为重要。激光处理技术具有能量密度高、冷却速度快、易于实现自动化等特点。利用激光熔凝技术能在保持材料原有心部韧塑性的同时,得到组织均匀、晶粒细小且无气孔、裂纹等缺陷的表面熔凝层,从而显著地提高材料表面的强度及耐磨耐腐蚀性能。利用激光熔凝技术还可对形状复杂或不能用常规方法处理的零件进行局部强化处理^[8-13]。因此,利用激光熔凝技术可以改善起落架用高强钢的强度和耐磨耐腐蚀性。

针对舰载机起落架易发生腐蚀、磨损失效等问题,本文在不影响起落架基材力学性能的基础上,探究了不同激光熔凝参数对 AerMet100 钢显微组织及耐磨耐腐蚀性能的影响,实现了钢表面耐腐蚀性和耐磨性的改善。

2 实验材料与方法

采用 AerMet100 钢作为实验材料,其主要化学成分见表 1。材料的热处理为 900 °C 正火 1 h,

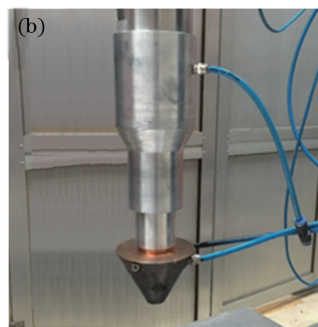
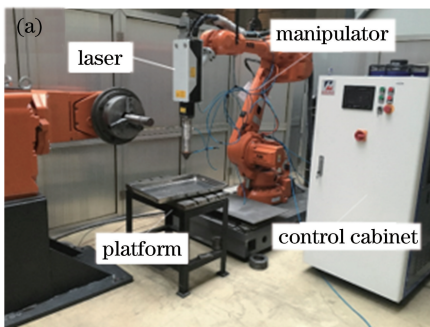


图 1 激光熔凝设备。(a)半导体激光装备;(b)熔凝工作头

Fig. 1 Laser melting equipment. (a) Semiconductor laser equipment; (b) laser melting working head

AerMet100 钢经激光熔凝处理后,采用线切割方式得到尺寸为 12 mm×12 mm×12 mm 的金相试样,经砂纸打磨后使用抛光机进行抛光,然后用王水腐蚀 15 s,最后用乙醇进行超声波清洗。腐蚀后的试样用德国里奥公司 LEO1450 型扫描电镜(SEM)观察形貌;利用德国 BRUKER 公司 D8 型 X 射线衍射仪(XRD)进行物相分析;利用北京时代山峰科技有限公司 HV-1000 显微硬度计进行显微硬度测试;利用济南翰森精密仪器有限公司 MMG-10 型高温高速摩擦磨损试验机进行耐磨性能测试;利用上海辰华仪器有限公司 CHI660D 电化学工作站对熔凝层进行极化曲

680 °C 高温回火 5 h。试样尺寸为 100 mm×40 mm×12 mm。设计的 4 种激光工艺参数见表 2,采用北京陆合飞虹激光科技有限公司 DISTA-3000 型半导体激光器进行激光熔凝处理,激光波长为 800~1100 nm,焦距为 300 mm,通过光束整形得到 4 mm×2 mm 的近矩形光斑,熔凝前对试样进行喷砂处理并用丙酮进行清洗。激光熔凝设备如图 1 所示。

表 1 AerMet100 钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of AerMet100 steel (mass fraction, %)

Element	Co	Ni	Cr	Mo	C
Value	13.42	11.28	2.93	1.20	0.23

表 2 不同激光熔凝工艺参数

Table 2 Different laser melting process parameters

Sample number	Laser power /W	Scanning speed / (mm·min ⁻¹)	Shielding gas
P-1 #	750	400	Ar
P-2 #	1050	400	Ar
P-3 #	1350	400	Ar
P-4 #	1650	400	Ar

线测试。

3 结果与分析

3.1 熔凝层组织形貌与物相结构

经不同功率激光熔凝处理的 AerMet100 钢的宏观表面形态如图 2 所示。从图中可以看出,通过激光熔凝处理,可以在 AerMet100 钢表面获得无裂纹的熔凝层。

P-4 # 试样激光熔凝层的 SEM 微观形貌如图 3 所示。图 3(a)中 a、b、c 区域分别为熔凝层的上、中、下部区域,d 区域为基体区。晶粒度、形核率和晶粒长大速度之间的关系^[14]为

$$Z = \alpha \left(\frac{N}{G} \right)^{3/4}, \quad (1)$$

式中 Z 为单位体积或单位面积中的晶粒数目; N 为形核率; G 为晶粒长大速率; α 为常数, Z 为体积时取 0.9, Z 为面积时取 1.1。在激光熔凝处理过程中, 材料的急冷急热形成了极高的温度梯度和极快的冷却速度, 因此, 材料的形核率和晶粒长大速率都会增大, 且两者的比值也会增大。由(1)式可知, 提高冷却速度会使晶粒变得更细小, 组织更致密。因此, 采用激光熔凝处理的方式可以显著地细化组织, 改善组织的表面性能。

激光熔池中的结晶形态主要取决于参数 T/R 值, T 为温度梯度, R 为凝固速度^[15]。熔池底部的 R 趋近于 0, 而此处的 T 最大, 则 T/R 值趋近于无穷大, 此时熔池内的晶粒形态主要为胞状晶和树枝晶。由图 3(b)可知, 在熔凝层底部, T 以垂直方向

为主, 因此熔凝区底部晶粒主要沿基体向熔凝层方向生长, 并且晶粒形态主要为胞状晶和树枝晶。在熔池中部, T/R 值逐渐减小, 熔池内开始趋向于以树枝晶和等轴晶的形态生长。如图 3(c)所示, 在熔凝层中部, 温度梯度为水平方向和垂直方向的混合, 因此熔凝区中部晶粒不是主要沿基体向熔凝层方向生长, 而是有一定的倾斜角度, 熔池中部熔凝层的晶粒形态主要为等轴晶和树枝晶。由于熔凝层顶部离熔池底部距离最远, 因此, 熔凝层顶部的 T 最小, 而表层受到本体和表面空气的双重冷却作用, R 最大, 则 T/R 值最小, 形成了以细晶为主的组织。如图 3(d)所示, 在熔凝层顶部, T 以水平方向为主, 因此熔凝区顶部晶粒主要沿激光扫描方向生长, 晶粒形态主要为细小的等轴晶。同时, 由于熔凝层顶部比中部的冷却速度更大, 因此, 熔凝层顶部的组织比中部的组织更加细小、致密^[16-18]。

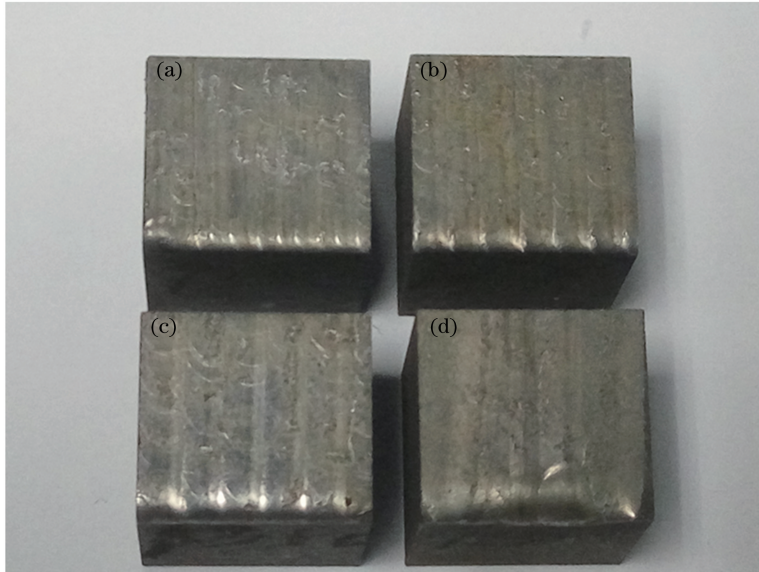


图 2 激光熔凝后 AerMet100 钢的宏观形貌。(a) P-1# 试样; (b) P-2# 试样; (c) P-3# 试样; (d) P-4# 试样

Fig. 2 Macro-morphologies of AerMet100 steel after laser melting.

(a) Sample P-1#; (b) sample P-2#; (c) sample P-3#; (d) sample P-4#

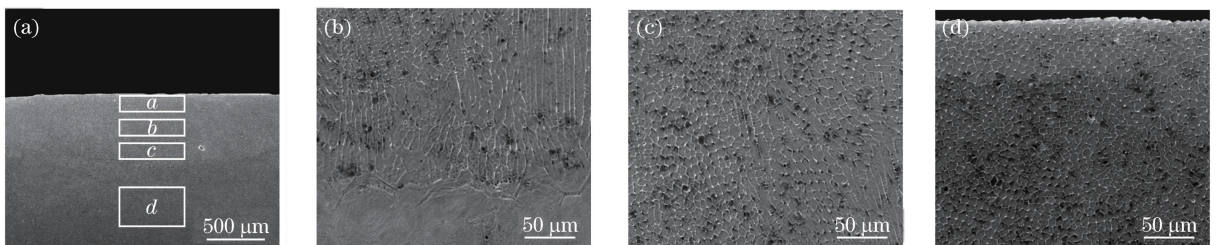


图 3 P-4# 试样的激光熔凝层微观形貌。(a) 整体; (b) 下部; (c) 中部; (d) 上部

Fig. 3 Micro-morphologies of sample P-4# after laser melting. (a) Overall; (b) lower part; (c) middle part; (d) upper part

AerMet100 钢原始态试样 (P-0 #) 和经 1650 W 激光熔凝处理的试样 (P-4 #) 进行物相分析的结果如图 4 所示。两个试样中包含的主要物相均为马氏体 (M) 和奥氏体 (A), 原始态试样组织中残余奥氏体 A(200) 面的衍射峰略高于激光熔凝态试样, 激光熔凝试样组织中马氏体 M(110) 面

的衍射峰明显高于原始态试样。这说明 AerMet100 钢经 1650 W 激光熔凝处理后, 残余奥氏体含量较原始态减小, 而马氏体含量比原始态增加。由此可见, 激光熔凝处理对 AerMet100 钢起到了快速淬火的作用, 并在其表层获得一定量高硬度的马氏体组织^[19]。

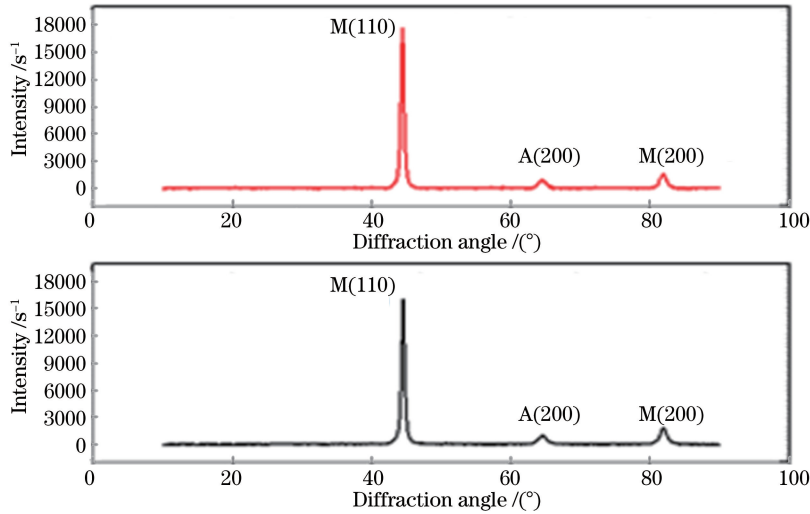


图 4 AerMet100 钢的 XRD 图。(a) P-4 # 试样; (b) P-0 # 试样

Fig. 4 XRD images of AerMet100 steel. (a) Sample P-4 #; (b) sample P-0 #

3.2 熔凝层深度及显微硬度变化

采用金相显微镜在放大 100 倍下观察经不同功率激光处理后的熔凝层整体形貌, 并对熔凝层进行深度值测量, 结果分别如图 5、6 所示。当激光功率为 750 W 时, 熔凝层深度值最小; 随着激光功率的增大, 熔凝层深度值逐渐加大; 当激光功率为 1650 W 时, 熔凝层深度达到最大值 539 μm 。这是因为在离焦量不变的条件下, 激光功率越大, 试样表面产生的能量密度就越大。

采用显微硬度计对熔凝层进行硬度测试, 所用载荷为 50 g, 加载时间为 10 s, 同一熔凝层深度进行 5 个点测试后取平均值。AerMet100 钢经不同功率激光熔凝处理后距表面 50 μm 处的显微硬度如图 7

所示。由图可知, 经 750, 1050, 1350, 1650 W 激光熔凝处理后, AerMet100 钢的显微硬度分别提高了 151.1, 192.7, 201.9, 223.6 HV。对 P-4 # 试样熔凝层表面向内部基体每间隔 50 μm 取一个硬度值, 穿过熔凝层到达基体停止, 测得其显微硬度曲线如图 8 所示。可以看到, 熔凝层硬度值均明显高于基体, 且由表及里呈整体减小趋势; 熔凝层与基体之间存在明显的硬度过渡, 且最大硬度值出现在距表面 50 μm 处。这是因为激光加工具有快速加热和快速冷却的特点, 组织晶粒得到细化, 并且更容易在快速的淬火条件下形成高硬度的马氏体组织。细晶强化和相变强化的共同作用使熔凝层整体硬度高于基体。激光熔凝的特点造成熔池的整个截面上存在不

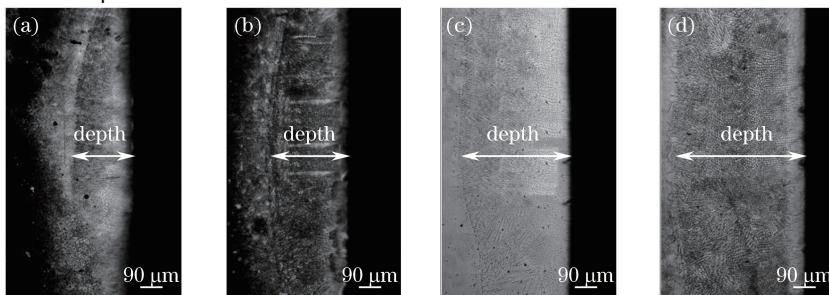


图 5 激光熔凝层形貌。(a) P-1 # 试样; (b) P-2 # 试样; (c) P-3 # 试样; (d) P-4 # 试样

Fig. 5 Morphologies of laser melting layers. (a) Sample P-1 #; (b) sample P-2 #; (c) sample P-3 #; (d) sample P-4 #

同形态的凝固组织,即由表层细小、致密的等轴晶转变为中部较大的等轴晶和树枝晶,进而到底部的树枝晶和胞状晶,因而整个熔凝层的硬度由表及里呈现为逐步减小的趋势。

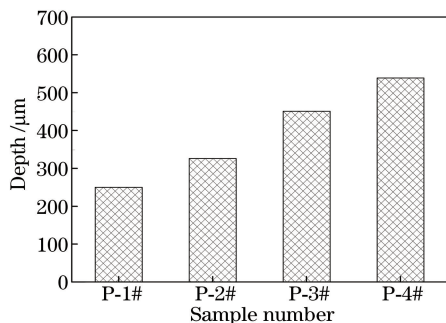


图6 激光熔凝层深度

Fig. 6 Depth of laser melting layers

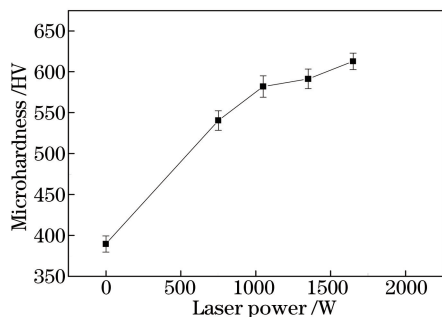


图7 激光熔凝层显微硬度

Fig. 7 Micro-hardness of laser melting layers

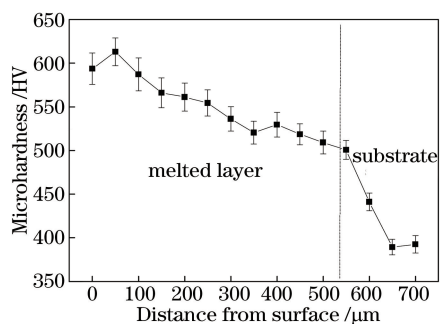


图8 P-4#试样显微硬度曲线

Fig. 8 Micro-hardness curve of sample P-4#

3.3 熔凝层耐蚀性能

采用电化学工作站进行动电位极化曲线测试。标准三电极体系中的参比电极为饱和甘汞电极,辅助电极为铂金电极,工作电极为原始态试样(P-0#)与经激光熔凝处理的 AerMet100 钢试样,电解质是质量分数为 3.5% 的 NaCl 中性溶液, pH 值为 6.5~7.2, 温度为 25 °C。电化学测试试样的工作面尺寸为 3 mm×5 mm。除工作面外,其余各面均用环氧树脂封住并用砂纸打磨。电化学测试前工作电极在

测试溶液中浸泡 10 min。动电位扫描范围为 -800~400 mV,扫描速率为 20 mV·s⁻¹,同一参数试样进行多组测试并从中优选。

经不同功率激光处理及未经处理的 AerMet100 钢的电化学极化曲线如图 9 所示,其中 I 为腐蚀电流密度。由图可知,未经处理的 AerMet100 钢的腐蚀电位为最低的一 374 mV。经 750, 1050, 1350, 1650 W 激光熔凝处理的 AerMet100 钢的腐蚀电位分别为 -323, -289, -272, -235 mV。激光熔凝处理提高了 AerMet100 钢的腐蚀电位,并且随着激光功率的增大腐蚀电位也提高。经不同功率激光熔凝处理后的 AerMet100 钢具有较强的耐蚀性,因为它们极化曲线都表现出明显的钝化,但钝化膜的生成及完善并没有改变极化的极限电流密度。以熔凝试样 P-4# 为例,在自腐蚀电位 -0.235 V 附近,随着极化电位的升高,熔凝层的腐蚀电流密度迅速增大,试样处于腐蚀活化区;当极化电位升高到 -0.219 V 以后,熔凝层的钝化电流密度趋于稳定,试样开始进入钝化区,但是熔凝层表面的钝化膜并不稳定,表现为钝化电流密度随着极化电位的升高而缓慢增大;当极化电位进一步升高至 -0.127 V 时,熔凝层的腐蚀电流密度再次迅速增大,试样进入过钝化区;当极化电位超过 -0.092 V 后,熔凝层的腐蚀电流密度几乎不再变化,达到极化的极限电流密度。总体来说,几种不同表面状态的 AerMet100 钢在中性 NaCl 溶液中的极化特性相似,但是经不同功率激光处理的 AerMet100 钢的腐蚀电位、腐蚀电流密度及稳定钝化区间等电化学特征参数稍有差异。

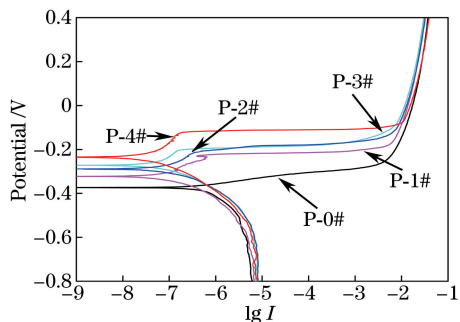


图9 极化曲线

Fig. 9 Polarization curves

试样的极化曲线塔菲尔拟合数据见表 3,其中 E_{corr} 为拟合后的自腐蚀电位, I_{corr} 为拟合后的腐蚀电流密度。由表 3 可知,试样的腐蚀电流密度从小到大依次为 P-4#, P-3#, P-2#, P-1#, P-0#, 腐蚀电流密度和腐蚀速度成正比^[20]。因此,经激光熔凝处

理的 AerMet100 钢比未经处理的具有更强的耐电化学腐蚀能力,且其耐腐蚀能力随激光功率的增大而逐渐增强。其中,经 1650 W 激光熔凝处理的 AerMet100 钢具有最强的耐电化学腐蚀能力。

表 3 极化曲线塔菲尔拟合数据

Sample	P-0#	P-1#	P-2#	P-3#	P-4#
$E_{corr} /$ V	-0.374	-0.323	-0.289	-0.272	-0.235
$I_{corr} /$ (10^{-7} A)	4.785	0.635	0.510	0.345	0.209

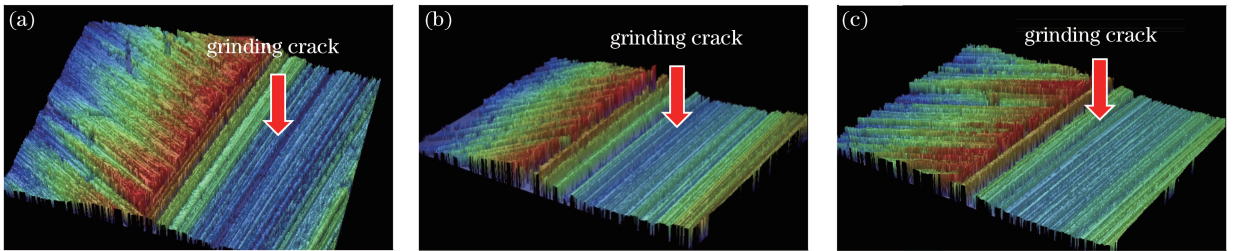


图 10 AerMet100 钢磨痕三维形貌。(a) P-0# 试样;(b) P-2# 试样;(c) P-4# 试样

Fig. 10 Three-dimensional morphologies of AerMet100 steel grinding crack.

(a) Sample P-0#; (b) sample P-2#; (c) sample P-4#

为进一步分析 AerMet100 钢表面激光熔凝层的耐磨性能,采用三维形貌仪附带软件对熔凝层磨痕深度进行测量,使用电子天平对磨损实验前后试样进行称重。P-0#、P-2# 和 P-4# 试样经摩擦磨损实验后,磨痕深度分别为 3.8272, 3.8409, 3.2479 μm ,磨损失重分别为 0.1464, 0.1388, 0.1008 g,结果如图 11 所示。由图可知,熔凝层磨损失重与磨痕深度值均减小,说明经激光熔凝处理后 AerMet100 钢表面耐磨能力得到增强,且经 1650 W 激光熔凝处理后耐磨能力得到最大增强,其磨痕深度比原始态减小了 0.5793 μm 、磨损失重减小了 31.15%。因此,对 AerMet100 钢进

3.4 熔凝层的磨损性能

选取经不同激光功率熔凝处理的 AerMet100 钢试样 P-0#、P-2# 和 P-4# 在室温下进行摩擦磨损实验。实验参数为:加载力 100 N,转速 100 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$,实验时间 3600 s。实验前对试样预磨 5 min,磨损条件为油润滑。实验结束后采用三维形貌仪对熔凝层磨损形貌进行观察,试样的磨痕三维形貌如图 10 所示。从图中可看出,三种试样经摩擦后均出现严重的磨损,磨痕边界处出现明显的台阶。

行激光熔凝处理能显著提高其表面耐磨性,并且在一定功率范围内,激光功率越大其熔凝表面耐磨性越强。

4 结 论

通过对 AerMet100 钢进行激光熔凝处理,并对熔凝层进行测试分析,得到以下结论。

1) 激光熔凝的功率越大,熔凝层深度及其表面硬度值越大。当熔凝功率为 1650 W 时,其硬度最高值较基体增大了 223.6 HV,且最高值出现在距熔凝层表面 50 μm 处。

2) AerMet100 钢经不同功率激光熔凝处理后,其极化曲线均表现出明显的钝化,但钝化膜的生成及完善并没有改变极化的极限电流密度。随着激光功率的增大,熔凝层自腐蚀电位升高、腐蚀电流密度减小,从而耐电学腐蚀性得到增强。

3) 经激光熔凝处理和未经激光熔凝处理的 AerMet100 钢主要包含的物相均为马氏体和奥氏体。激光熔凝处理使得 AerMet100 钢残余奥氏体含量减小、马氏体含量增大。

4) 激光熔凝可以显著改善 AerMet100 钢的耐磨性能。在一定功率范围内,随着激光功率的增大,熔凝层的磨损失重与磨痕深度均减小。

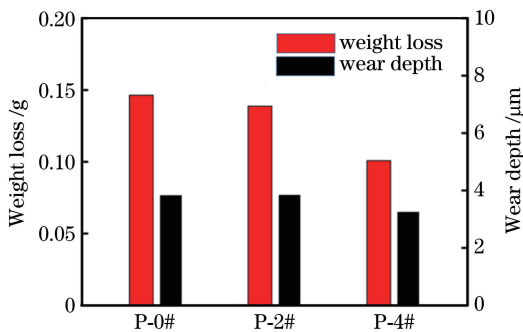


图 11 AerMet100 钢激光熔凝层磨损失重与磨痕深度

Fig. 11 Weight loss and wear depth of AerMet100 steel after laser melting

参 考 文 献

- [1] Dahl J M. 铁基航空合金的新要求[J]. 航空科学技术, 2004(6): 43-45.
- [2] Ye W B. Development of secondary hardening ultra high strength alloy A100 [J]. Special Steel Technology, 2014, 20(1): 14-16.
叶文冰. A100 二次硬化型超高强度合金研制[J]. 特钢技术, 2014, 20(1): 14-16.
- [3] Li Z, Zhao Z Y. Research and development of AerMet100 steel [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(3): 265-270.
李志, 赵振业. AerMet100 钢的研究与发展[J]. 航空材料学报, 2006, 26(3): 265-270.
- [4] Liu P, Wang X D, Cai J P, *et al.* Corrosion behaviour of low hydrogen brittleness brush plating cadmium on A100 steel in marine environment [J]. Journal of Materials Engineering, 2012(6): 54-58.
刘鹏, 王旭东, 蔡健平, 等. A100 钢低氢脆刷镀镉镀层海洋环境腐蚀行为研究[J]. 材料工程, 2012(6): 54-58.
- [5] Ran X Z, Cheng H, Wang H M, *et al.* Corrosion properties of laser melting-deposited corrosion-resistant ultrahigh strength steel AerMet100 [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(12): 126-131.
冉先喆, 程昊, 王华明, 等. 激光熔化沉积 AerMet100 耐蚀超高强度钢的耐蚀性[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(12): 126-131.
- [6] Cheng H, Liu D, Tang H B, *et al.* Effect of hot isostatic pressing on fatigue properties of laser melting deposited AerMet100 steel [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2013, 20(11): 79-84.
- [7] Hu Y B, Dong C F, Sun M, *et al.* Effects of solution pH and Cl^- on electrochemical behaviour of an AerMet100 ultra-high strength steel in acidic environments[J]. Corrosion Science, 2011, 53(12): 4159-4165.
- [8] Alenius M, Pohjanne P, Somervuori M, *et al.* Exploring the mechanical properties of spot welded dissimilar joints for stainless and galvanized steels [J]. Welding Journal, 2016, 85(12): 305s-313s.
- [9] Spalding I J. High power lasers: their industrial and fusion applications[J]. Optics and Laser Technology, 1980, 12(4): 187-197.
- [10] Loosen P, Treusch H G, Haas C R, *et al.* High-power diode lasers and their direct industrial applications[C]. SPIE, 1995, 2382: 78-88.
- [11] Yang J X, Liu F L, Miao X H, *et al.* Influence of laser cladding process on the magnetic properties of WC-FeNiCr metal-matrix composite coatings [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(9): 1862-1868.
- [12] Yang J X, Xiao Z Y, Miao X H, *et al.* The effect of Ti additions on the microstructure and magnetic properties of laser clad FeNiCr/60%WC coatings[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2015, 52: 6-11.
- [13] Guo C Y, Guo X J, Liu C, *et al.* Research on process of A-100 steel laser forming parts in the field of aircraft landing gear manufacturing [J]. New Technology & New Process, 2015(1): 71-74.
郭初阳, 郭喜军, 刘聪, 等. A-100 钢激光成形零件在飞机起落架制造领域的工艺研究[J]. 新技术新工艺, 2015(1): 71-74.
- [14] Wang Y M. Effects of laser melting on microstructure and mechanical properties of 304 austenitic stainless steel[D]. Hengyang: University of South China, 2013.
王源蜜. 激光熔凝对 304 奥氏体不锈钢组织及力学性能的影响[D]. 衡阳: 南华大学, 2013.
- [15] Li M Y, Wang Y, Han B, *et al.* Structure and properties of high-Cr steel roller by laser surface melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(2): 498-502.
李美艳, 王勇, 韩彬, 等. 高铬钢轧辊激光熔凝层组织及性能[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 498-502.
- [16] Wang Z H, Wang H M, Liu D. Microstructure and mechanical properties of AF1410 ultra-high strength steel using laser additive manufacture technique[J]. Chinese Journal of lasers, 2016, 43(4): 0403001.
王志会, 王华明, 刘栋. 激光增材制造 AF1410 超高强度钢组织与力学性能研究[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0403001.
- [17] Hou H P, Liang Y C, He Y L, *et al.* Microstructural evolution and tensile property of Hastelloy-X alloys produced by selective laser melting[J]. Chinese Journal of lasers, 2017, 44(2): 0202007.
侯慧鹏, 梁永朝, 何艳丽, 等. 选区激光熔化 Hastelloy-X 合金组织演变及拉伸性能[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0202007.
- [18] Luo K Y, Zhou Y, Lu J Z, *et al.* Influence of laser shock peening on microstructure and property of cladding layer of 316L stainless steel [J]. Chinese

Journal of lasers, 2017, 44(4): 0402005.

罗开玉, 周阳, 鲁金忠, 等. 激光冲击强化对 316L 不锈钢熔覆层微观结构和性能的影响 [J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0402005.

- [19] Sun S S, Li Z Y, Cai B C, *et al.* The influence of laser hardening on contact fatigue of hypoeutectoid steel [J]. Chinese Journal of lasers, 2016, 43(8): 0802011.

孙珊珊, 李正阳, 蔡宝春, 等. 激光相变硬化对亚共析钢接触疲劳性能的影响 [J]. 中国激光, 2016, 43

(8): 0802011.

- [20] Zhou K S, Deng C M, Liu M, *et al.* Characterizations of fatigue and salt spray corrosion resistance of HVOF sprayed WC-17Co and WC-10Co4Cr coatings on the substrate of 300M steel [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(4): 671-676.

周克崧, 邓春明, 刘敏, 等. 300M 钢基体上高速火焰喷涂 WC-17Co 和 WC-10Co4Cr 涂层的疲劳和抗盐雾腐蚀性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(4): 671-676.