

激光强化电刷镀技术试验研究

梁志杰, 闫 涛

(1. 装甲兵工程学院 装备再制造工程系, 北京 100072; 2. 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

摘要: 系统研究了激光强化电刷镀技术的原理、特点、设备、工艺、镀层性能及强化机理。结果表明: 激光强化电刷镀 Ni 镀层与普通电刷 Ni 镀层相比, 显微硬度提高了 200 HV, 耐磨性是普通电刷镀层的 1.5 倍, 表面残余应力降低了 200 MPa, 与基体结合强度高且可靠, 是装备再制造工程中可广泛应用的一种新技术。

关键词: 激光强化; 电刷镀; 再制造

中图分类号: TG174.441; TN249 文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2006)05⁺-0190-05

Research on Experiments of Laser Enhanced Electro Brush Plating Technology

LIANG Zhi-jie, YAN Tao

(1. Department of Equipment Remanufacture Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072 China; 2. National Key Laboratory for Remanufacturing, Beijing 100072 China)

Abstract: In this work, Principle, characteristics of Laser Enhanced Electro Brush Plating Technology (LEBP) was introduced and equipments was practiced. Coating's capabilities were surveyed, and its mechanisms were researched. Conclusions were got as: Compared to ordinary brush plated Ni coating, LEBP Ni coating promoted capabilities in micro-hardness (200 HV higher), wear resistance, surface residue stress (200 MPa lower). LEBP as a new remanufacturing technology would be widely used in the future.

Key words: laser enhanced; electro brush plating; remanufacturing

0 引言

激光强化电沉积技术是利用激光的热效应及光效应来增强或激发电沉积过程, 从而获得优异镀层的一种先进表面镀覆技术。20世纪70年代末, 美国IBM公司GutFeld首次报道了激光照射到阴极某点上可引起局部电流密度急剧增加的实验事实, 又根据这一现象研究了用Ar⁺激光增强Ni、Au、Cu的电沉积过程。由于激光强化电沉积技术制备的镀层具有晶粒细小, 耐磨性和减摩性好以及与基体结合强度高等特点^[1], 因而引起了人们的研究兴趣和重视。美国、英国、俄罗斯等工业发达国家都对激光沉积进行了探索性研究, 而且发表了不少专利。

本文通过激光强化电刷镀Ni镀层试验研究, 创新性地提出了具有应用价值的激光强化电刷镀工艺, 初步探讨了激光在电沉积技术中的强化机理。

1 激光强化电沉积技术

在激光强化电沉积过程中, 激光的热效应可使离子运动速度加快, 激光的局部瞬时高温使得镀层和基体之间形成一个“互融层”, 从而提高镀层与基体的结合强度。而且, 激光可以有效地降低镀层的孔隙率, 对镀层进行表面改性, 改善晶界状态, 实现镀层孔隙、裂纹等缺陷的愈合。激光电沉积技术具有以下特点:

- (1) 沉积速度快;
- (2) 一次镀厚能力强;
- (3) 镀层硬度高, 镀层表面平整, 缺陷少;
- (4) 镀层与基体结合强度高。

2 激光强化电刷镀技术试验研究

2.1 试验装置设计

激光强化电沉积系统包括激光系统(激光器及其控制系统等)、电沉积系统、机械系统、控制系统等。

收稿日期: 2006-08-10 修回日期: 2006-09-15

作者简介: 梁志杰 (1952-), 男 (汉), 陕西扶风人, 高级工程师。

2.1.1 激光系统

激光在电沉积过程中主要有两个作用：辐射作用和光作用。而激光的辐射作用既与激光波长有关，还与被照射镀液的吸收能力有关。因为镀液的温度不能过高，即激光的吸收率不能太高，所以在选定激光器时不能选用液体吸收率较高的准分子激光器。而 CO₂ 激光器具有体积大的特点，权衡利弊，决定采用 YAG 固体激光器。

激光控制系统的自动化程度和精度一般根据镀覆部位控制精确度来决定。

激光工艺参数包括激光波长 (nm)，脉冲激光的脉冲宽度 (ms)、单脉冲能量 (J)、脉冲频率 (Hz) 以及由此计算得出的激光的平均功率 (W) 和功率密度 (W/m²) 等^[2]。

试验装置采用连续 Nd³⁺:YAG 激光器，波长 1 062 nm，最大输出功率 1000 W。采用激光直射式即将激光直接照射到电沉积表面。

2.1.2 电沉积系统

主要包括电刷镀设备，本试验采用装甲兵工程学院新工艺办公室生产的 DSD-75 电源，镀笔和转台。工艺参数选择常规电沉积工艺参数，如电压 (V)、电流 (A)、温度 (°C)、相对运动速度 (m/min)、压强 (Pa)，镀液的性质如成份和浓度等。

试验系统设备简图如图 1 所示。

2.2 试验材料

试验所用镀液包括通用镀液和专用镀液，其中专用镀液加入了热稳定剂和光敏感剂。

前处理液：电净液，2#、3# 活化液。

镀液：特殊镍镀液，快速镍镀液。

基体：45 钢。

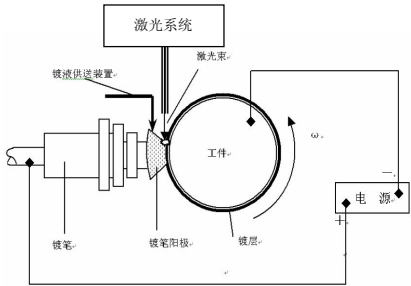


图 1 激光电刷镀工艺装置图

Fig.1 Instruments of Laser enhanced brush plating

2.3 工艺流程及参数

试验的工艺流程为：镀前表面准备—电净—去离子水冲洗—2#活化液活化—去离子水冲洗—3#活化液活化—去离子水冲洗—无电擦拭—镀打底层—激光刷镀工作层—镀后处理。电刷镀工艺参数见表 1~2。

表 1 镀前处理工艺参数

Table 1 Parameters of Processing before Plating

工序	镀液	电源极性	操作时间/min	工作电压/V	运动速度/(m/min)
电净	电净液	正接	0.5	10	9
活化	2#活化液	反接	1	10	9
	3#活化液	反接	1	18	9
打底	特殊镍	正接	1	12	9

表 2 激光电刷镀参数

Table 2 Parameters of Continue Laser Brush Plating

激光功率/W	运动速度/(m/min)	电压/V	镀覆时间/min	光斑直径/mm	镀液温度/°C
200	9	12	20	5	43.5
400	9	12	20	5	65

2.4 试验结果

2.4.1 镀层组织形貌

图 2 是在 Quant 200 扫描电镜下观察到的激光强化电刷镀 Ni 镀层与普通电刷镀 Ni 镀层的表面形貌。可以看出,激光强化电刷镀得到的镍镀层的晶粒团半径比普通镀层的小。激光功率 200 W 时,镀层表面比较平整,晶粒团主要呈土豆状,各晶粒团之间的孔隙较小,其间也充斥着由未长大的晶粒团,而且晶粒团的排列方向与激光扫描方向呈现出一致性。激光功率 400 W 时,镀层表面比 200 W 时稍显粗糙,但其表面组织仍较平整,且呈土豆状。

当激光功率较大时 (600 W),镀层表面晶粒团

之间出现了较小的球状物。利用 EDS 能谱分析得知,此微小独立球为为激光作用下铁和镍的合金,主要成份为铁。如图 3 所示。

对不同工艺条件下的镀层进行了 XRD 衍射,如图 4 所示。激光强化条件下得到的 Ni 刷镀层仍为晶体,即激光的加入没有对晶粒的生长方式产生影响。

根据晶粒度计算公式: $D_{hkl} = \frac{K\lambda}{\cos\theta\beta_{hkl}}$, 其中: θ 为掠射角, β_{hkl} 为半峰宽, $K=0.87$, λ 为 X 射线波长: $\lambda=0.15406\text{ nm}$ 。得出不同工艺条件下的镍镀层晶粒度如表 3 所示。

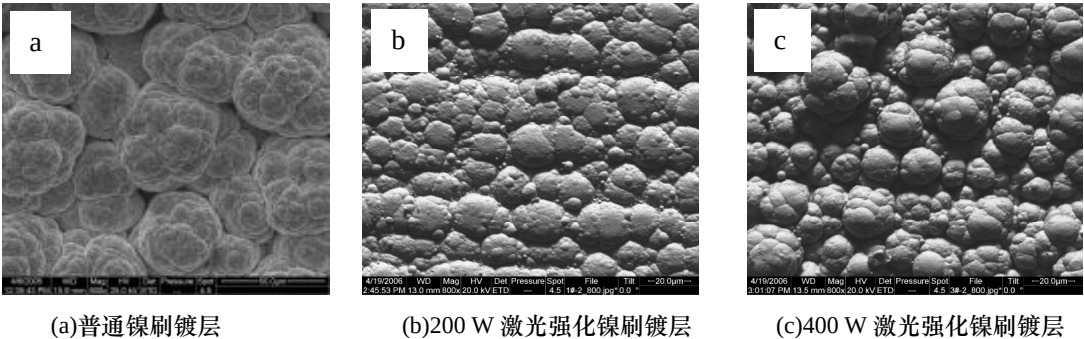


图 2 激光电刷镀与普通电刷镀镍镀层表面形貌 SEM 照片
Fig.2 SEM morphologies of surface of Ni coating through laser brush plating and ordinary brush plating (a) Ordinary brush plating Ni coating (b)200W Laser brush plating Ni coating (c)400W Laser brush plating Ni coating

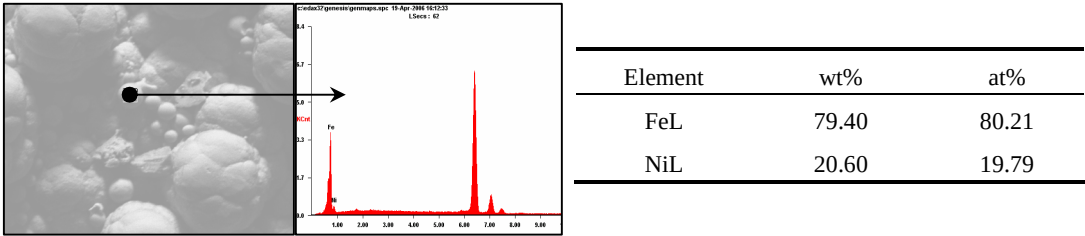


图 3 600 W 激光电刷镀 Ni 镀层 EDS 能谱图
Fig.3 Energy spectrum of EDS of LEBP Ni coating

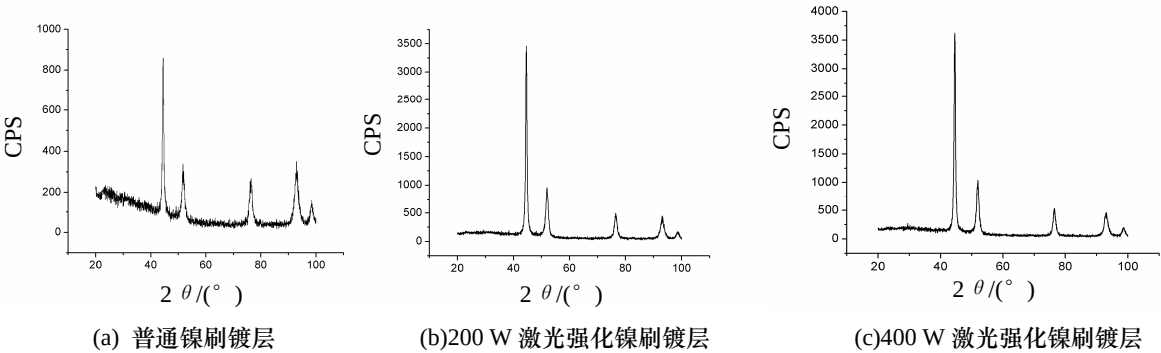


图 4 激光强化电刷镀镍镀层 XRD 图

Fig.4 XRD of Ni coatings through various processing (a) Ordinary (b) 200 W laser (c) 400 W laser

表 3 镀层的晶粒度比较

Table 3 Crystallization parameters of various Ni coating

镀 层	D_{hkl}/nm
普通 Ni 镀层	21.9
200W 激光 Ni 镀层	20.2
400W 激光 Ni 镀层	19.6

上述结果表明，激光的加入使得镍刷镀层的晶粒比普通刷镀镍镀层的要小。而且当激光功率较大时，镀层的晶粒度呈减小趋势。

2.4.2 显微硬度

试验在 HVS-1000 显微硬度计上完成，测试载荷 50 g，加载时间 15 s，测试部位为试样抛光后的表面，每个试样均取 5 个点求平均值。

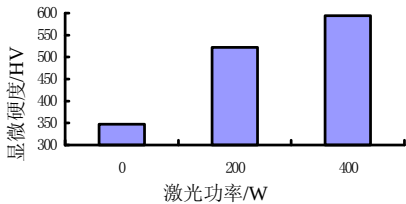


图 5 激光电刷镀单镍镀层显微硬度图
Fig.5 Micro-hardness of LECP Ni coatings through various processing

图 5 显示了激光电刷镀 Ni 镀层的显微硬度随激光功率变化的情况。在本试验中，随着激光功率的增加，镀层表面的显微硬度呈上升趋势，且均比普通刷镀层硬度高。激光功率为 400 W 时镀层的显微硬度最高，达 595 HV，比普通电刷镀 Ni 镀层高约 250 HV。

2.4.3 镀层的摩擦磨损性能

利用 MM200 摩擦磨损试验机，在转速为 200 r/min，载荷为 300 N，摩擦副为 45 钢、边界润滑试验条件下，试验时间为 1 h，测试了不同激光功率条件下 Ni 刷镀层的减摩性和耐磨性。试验前后，均将试样进行了超声波清洗，吹干后用分析天平称重。所得数值与原样重量之差即为磨损量，分别取相同条件下 5 个镀层磨损量的平均值。取普通镍刷镀层的耐磨性为 1。

图 6 表示了激光电刷镀 Ni 镀层减摩性和耐磨性的测试结果。可以看出，随着激光功率的增加，镀层的摩擦因数逐渐减小，在激光功率为 400 W 时，其摩擦因数最小 (0.14)，约为普通 Ni 刷镀层的 1/2。由于激光的加入，激光电刷镀 Ni 镀层的相对耐磨性也有了不同程度的提高。当激光功率为 400 W 时，镀层耐磨性最好，其相对耐磨性为 1.56。

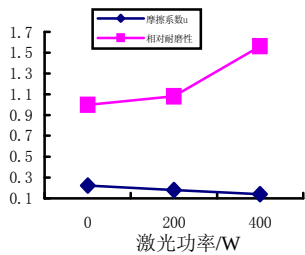


图 6 激光电刷镀 Ni 镀层摩擦因数、相对耐磨性
Fig.6 Friction coefficients and relative wear resistance of Ni coatings through various processing

虽然镀层在激光功率为 200 W 时其表面形貌较为平整，但经试验得知，其摩擦因数并不是很小，而在 400 W 激光照射时，表面略显粗糙的镀层却表现出了良好的耐磨和减摩性。因为镀层的耐磨性不仅与表面粗糙度有关，而且还与材料的硬度有关。当进入稳定磨损阶段后，镀层的硬度对镀层的耐磨和减摩性起了决定性的作用。

2.4.4 镀层的结合强度测定

采用锉削法来定性评价镀层与基体之间的结合强度。试验采用粗扁锉刀，将试样用台钳固定，用锉刀由基体锉向镀层，锉刀与镀层面约成 45°角。测试结果表明，在镀层与基体交界处未发现分层、崩落和起皮脱落现象，表明镀层与基体结合牢固。

2.4.5 激光功率对镀层表面残余应力的影响

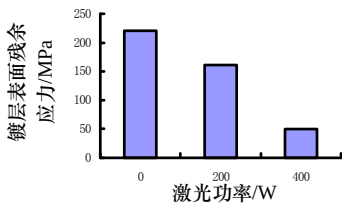


图 7 激光 Ni 刷镀层表面残余应力
Fig.7 Surface residual stress of Ni coatings through various processing

图 7 是采用 D8 DISCOVER With GADDS 面探测器 X 射线衍射仪对不同激光功率照射下电刷镀 Ni 镀层表面残余应力的检测结果。由图可见，激光强化电刷镀镀层表面仍然存在拉应力。未加激光照射时，同样厚度的 Ni 刷镀层的残余应力为 230 MPa。随着激光功率的增加，残余应力值呈现减小的趋势。当激光功率为 400 W 时，残余应力值变为 50 MPa，约是普通 Ni 刷镀层的 1/5。刷镀层的残余应力与镀液成份、工艺参数等都有重要关系。本试验在其他条件相同，只改变激光功率条件下得出上述结果，说明激光对刷镀过程中残余应力的变化起到了关键作用。

3 激光强化电沉积机理浅析

国内外目前还没有对成熟的激光强化电沉积理论。根据本试验结果分析认为,在电沉积过程中主要有以下激光强化机理:

3.1 光热效应

(1) 激光对固/液界面行为的热紊流效应

热效应产生明显的紊流和微区搅拌效果,导致界面扩散层厚度的降低,界面消耗的镍离子浓度能得到及时补充。故从热力学角度,激光通过热效应,促进了传质过程,降低了浓差极化,有利于改善界面因为电极反应引起的镍离子贫乏现象。另外,由于激光的作用时间极短,界面所吸收的光能转变为热能后,热量来不及向材料表面传输,使界面区域的温度急剧增高以致形成蒸汽导致产生反冲压力波,即激光的力作用。力作用引起的微搅拌也可加速电荷的转移,使镀液的浓度梯度减小。

(2) 激光光子强化机理

激光光子一部分被镀液吸收,在激光强度不完全破坏晶体结构时,入射到金属晶体的光子将与共有化电子发生非弹性碰撞,使光子被电子吸收。吸收了光子处于高能级状态的电子强化了晶格的震荡,使金属表层温度迅速增加,活性增大,利于形核。同时,镀液中的镍离子吸收的光子能量可在很大程度上满足离子结晶成原子所需的能量,使得晶粒的形成不必非要在表面活性点上或位错、缺陷的露头处,因而,在激光的作用下,镍离子在镀层表面各处的形核几率大致相同,所以晶粒团大小较为均匀。

3.2 光化学效应

首先某些化合物在特定波长的激光照射下会激发分解,从而实现金属化学沉积。其次是激光对电极反应过程的促进与催化作用。激光导致水合金属离子的结构变形或脱水,促进离子的界面放电,加快界面反应过程,因而降低了电化极化。而且,激光催化可能包含温度催化和活性基团催化两个方面。^[3-6]

4 激光强化电沉积技术的应用和发展方向

我军装甲车辆每年都有大量的关键零部件因磨损等原因导致失效,如坦克发动机缸套、曲轴、密封环配合面、滚柱配合面、大制动鼓密封盖、主动齿轮轴、凸轮轴等,从而降低了车辆的整体战斗性能。局部电沉积技术如普通电刷镀等在装备维修过程中修复了大量零部件。但由于现有普通镀层与基体结合可靠性较差,表面残余应力较大等缺陷使得一些零部件无法修复或修复标准较低。然而在激光强化电沉积过程中,激光的热效应可提高镀层与

基体的结合强度,有效地改善镀层的力学性能。因此,激光强化电刷镀镀层在装备再制造过程中具有比普通镀层更大的性能优势。

但由于激光强化电沉积技术还在不断地研究过程中,还有许多原理和工程应用问题值得探讨。

(1) 激光强化电沉积微观机理研究。主要包括激光强化单一金属电沉积机理研究和激光强化复合镀层电沉积机理研究等方面。

(2) 激光对镀层的表面改性机理研究。主要包括激光对单一镀层表面改性机理研究、激光对复合镀层表面改性机理研究、激光对合金镀层表面改性机理研究等方面。

(3) 激光敏感因子在镀液中的强化机理研究。研究内容主要是如何选择合适的光敏感材料作为添加剂,配制新型镀液,从而提高沉积效率。在此基础上对其强化机理进行研究。

(4) 激光替代光源研究。如果仅仅利用激光的热效应,激光是一种利用效率极低的能源。因此,结合光敏感试剂,研究利用一种操作简便,经济性好的光源具有重要意义。目前,装甲兵工程学院已经对紫外光强化电沉积进行了研究,取得了初步效果。

5 结 语

试验证实,激光强化电刷镀镀层的性能比普通刷镀层更优异,可以应用于常规技术无法修复的磨损量大且对表面性能要求苛刻的关键零部件的修复和强化。但激光强化电沉积技术还处于研究和开发的初步阶段,因此,随着科技的发展和研究的深入,进一步提高该技术的实用性并应用在装备再制造过程中,对避免资源浪费,提高装备的维修率和再制造率具有重要意义。

参考文献:

- [1] Von Gutfeld RJ, Vigliotti DR. High-speed electroplating of copper using the laser-jet technique [J]. Appl Phys Lett 1985,46(10):15.
- [2] 梁志杰, 闫涛. 激光强化电沉积技术研究 [J]. 电镀与精饰, 2006, 28 (3):27-30.
- [3] 闫涛, 梁志杰, 谭俊, 等. 激光强化电刷镀 Ni 镀层试验研究 [J]. 中国表面工程, 2006, 19 (2):39-42.
- [4] 梁志杰. 现代表面镀覆技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005:23-78.
- [5] Kordás K, Remes J, Leppävuori S, et al. Laser-assisted selective deposition of nickel patterns on porous silicon substrates [J]. Applied Surface Science, 2001,178: 93-97.
- [6] 董允, 贾艳琴. 电沉积及激光辅助电沉积镍基镀层表面形貌研究 [J]. 河北工业大学学报, 2001,30(1): 89-93.

作者地址: 北京丰台杜家坎 21 号 100072

Tel: (010) 66718476 Email: yantao2005001@sina.com