

文章编号 1004-924X(2016)增-0117-06

## 射流电沉积涂层激光重熔的力学性能强化

范 晖<sup>1\*</sup>, 赵阳培<sup>2</sup>, 王善奎<sup>1</sup>

- (1. 江苏师范大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116;
2. 江苏建筑职业技术学院 机电学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 为了提高射流电沉积层的力学性能, 研究了激光重熔对射流电沉积层性能的影响, 优化了相关工艺参数。采用射流电沉积方法在 304 不锈钢表面制备纳米结构铜沉积层后开展激光重熔工艺。采用扫描电镜和 X 射线衍射仪观察涂层表面形貌和晶粒尺寸, 并对涂层进行了力学性能测试。测试结果表明: 在优化的工艺参数下(电流密度为 200 A/dm<sup>2</sup>, 扫描速度为 10 mm/s), 射流电沉积制备铜沉积层表面较平整, 微观结构较致密, 由尺寸为 60 nm 的纳米晶颗粒组成。激光重熔后显微硬度、抗拉强度等力学性能都得到明显提高。显微硬度可以达到 816 HV, 抗拉强度可以达到 590 MPa。通过拉伸断口形貌观察表明激光重熔后材料塑性会降低, 因此激光重熔相关参数有将进一步的优化。

**关键词:** 纳米涂层; 激光重熔; 射流电沉积; 力学性能

**中图分类号:** TQ153.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0117

## Mechanical properties enhancement of laser remelting for jet electro-deposited coating

FAN Hui<sup>1\*</sup>, ZHAO Yang-pei<sup>2</sup>, WANG Shan-kui<sup>1</sup>

- (1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China;
  2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangsu Jianzhu Institute, Xuzhou 221116, China)
- \* Corresponding author, E-mail: xzfanhui@163.com

**Abstract:** In order to improve mechanical properties of the jet flow electro-deposition coating, the impact of laser remelting on performance of the jet flow electro-deposition coating was studied for process parameter optimization. The laser remelting process were realized after preparing the nano-structure copper deposition layer in the 304 stainless steel surface by the jet flow electro-deposition method. Thereafter the coating surface morphology and grain size were observed with Scanning Electron Microscope (SEM) and X-ray Diffraction (XRD), and the mechanical properties of the coating was tested. The results show that under the optimized process parameters where the operating current density is 200 A/dm<sup>2</sup> and the scanning speed is 10 mm/s, the surface of the copper deposition layer prepared by the jet flow electro-deposition method is relatively smooth and composed of 60 nm grains,

收稿日期: 2016-05-31; 修订日期: 2016-06-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51305178); 江苏省大型工程装备检测与控制重点实验室资助项目(No. JSKLEDC201405)

with relatively compact microstructure. The mechanical properties including the micro-hardness and tensile strength are obviously improved after laser remelting, where the micro-hardness can reach 816 HV and the tensile strength can reach 590 MPa. Otherwise the plasticity decreases according to the tensile fracture morphology, which means the process parameters should be further optimized.

**Key words:** nano-coating; laser remelting; jet electro-deposition; mechanical property

## 1 引言

纳米涂层技术是表面工程的研究热点。纳米涂层可赋予材料表面新的机械性能和物理性能,使服役特性得到改善,从而实现了零件材料在极端环境下进行表面改性的目的。在纳米涂层制备方法中,射流电沉积具有较高的物质传输率,在制备纳米金属材料方面具有较好的优势<sup>[1-6]</sup>。激光重熔是另一种高性能涂层的制备工艺。通过激光对材料表面的预敷涂层进行高温熔化,材料表面能够形成高硬度、高耐磨的沉积层<sup>[7-9]</sup>。本文将上述两种方式组合,即先使用射流电沉积方法在材料表面预敷沉积层,然后进行激光重熔,从而增强涂层与基体的结合,提高材料的力学性能。首先使用射流电沉积方法制备了纳米晶铜沉积层,然后对涂层进行激光重熔二次处理。使用扫描电镜(SEM)和X射线衍射(XRD)观察处理后的涂层形貌和结构观察。最后测试了激光重熔后的涂层硬度和拉伸强度等力学性能。

## 2 试验与测试

### 2.1 工艺条件

试验用基体材料为 304 不锈钢,试样尺寸为 100 mm×20 mm×2 mm。试验前需对基体材料进行如下预处理,依次用 400、800、1000 目金相砂纸研磨、抛光,然后用蒸馏水清洗,再用丙酮浸泡擦洗约 5 min 除油,最后用蒸馏水洗净晾干备用。

涂层工艺使用了自行研制的射流电沉积设备(见图 1 和图 2)及优选的电沉积工艺。射流电沉积系统由数控平台系统、电解液喷射及循环系统、射流电沉积直流电源等部分构成。电沉积参数如下:直流电流密度为 100~300 A/dm<sup>2</sup>,矩形喷嘴尺寸为 20 mm×1 mm,喷射流量为 200 L/h,扫描速率为 10 mm/s,扫描层数为 300。激光重熔采用 SLCF-X 型 CO<sub>2</sub> 激光器,参

数为:激光功率 1 500 W,光斑直径 2 mm,扫描速率 850 mm/min,搭接量 20%。

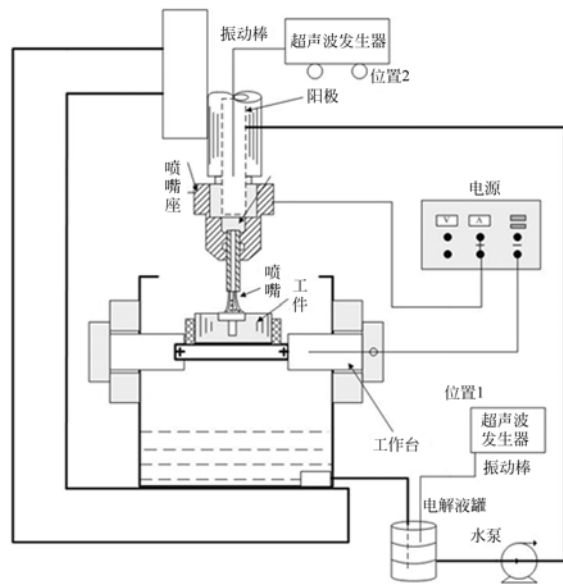


图 1 射流电沉积原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of jet electro-deposition



图 2 射流电沉积实验系统

Fig. 2 Experimental setup of jet electro-deposition

### 2.2 检测方法

(1) 微观组织检测:使用 LEO-1530 扫描电镜观察射流电沉积层表面形貌,XD-5A 型 X 射线衍

射仪表征平均晶粒尺寸。

(2)力学性能测试:硬度测试在 HVS-1000A 型数字式智能显微硬度计上进行,测量时加载载荷为 100 N,保载时间为 15 s,试样的显微硬度为 5 点平均值,测量点间距 2 mm。拉伸强度在 SANS 新三思万能电子拉伸试验机上进行测试,拉伸速度为 2 mm/min。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 射流电沉积纳米铜沉积层的组织形貌

图 3 为采用优选电沉积工艺参数下制备的沉积层表面的微观组织形貌。比较图 3(a)、(b)可以发现,电流密度为 100 A/dm<sup>2</sup>时多孔结构分布较为随机,单个孔洞为不规则的条状多边形,尺寸均不统一,颗粒间形成了明显的裂孔;电流密度为 200 A/dm<sup>2</sup>时,多孔状结构类似蜂巢结构,但分布明显均匀,独立孔洞的尺寸也较为均一细小,形状较规则。

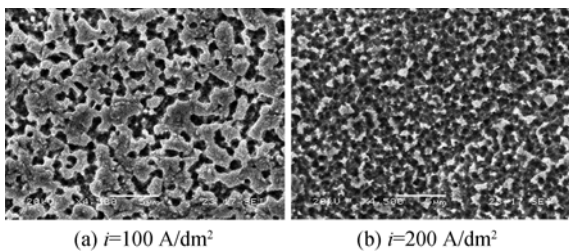


图 3 射流电沉积层在不同电流密度下的微观组织结构  
Fig. 3 Microstructure of jet electrodeposited coating at different current densities

采用谢乐公式计算沉积层晶粒尺寸,如图 4 所示。图 4 表明,如果电流密度从 100 A/dm<sup>2</sup>上升至 200 A/dm<sup>2</sup>,晶粒尺寸将从约 45 nm 增加至 60 nm,晶粒尺寸会伴随电流密度的增大而不断增加。实际上,电沉积层在晶格化形成过程中具有晶粒形核和晶粒长大两个阶段,它们同时以一定的速度发展和演变<sup>[5,10-11]</sup>。当形核的速度大于晶粒长大的速度时,沉积层的晶粒尺寸就会变得细小;反之,当形核的速度小于晶粒长大速度时,沉积层的晶粒尺寸就会变得粗大。显然,如果电流密度升高至 200 A/dm<sup>2</sup>时,晶粒长大速度就已经超过了形核速度。如果电流持续增加,那么晶粒尺寸就会进一步的增大。

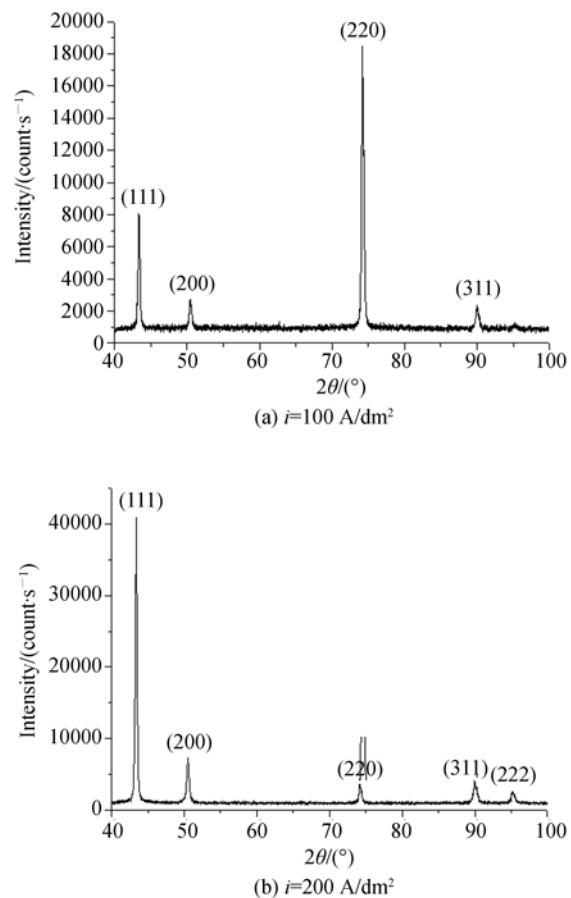


图 4 不同电流密度下沉积层的 XRD 图  
Fig. 4 XRD images of deposit material at different current densities

沉积过程中形核、长大速度与晶粒生长的特点实际上决定了图 3 中所示的多孔结构形成、分布与变化。单位时间内如成核数量多,则晶核就会表现为弥散、均匀分布的特点,具有较少的孔洞结构,形成致密的沉积层;如果单位时间成核数量较少,晶核产生的数量也会减少,容易形成不规则、分布不均的孔洞结构。形成原因如下:阴极表面过电位升高区域会在电流密度增大后不断增多,过电位升高造成阴极表面活性高、能量高,成核多易在此位置出现。因此同一区域内,晶核容易形成且数量增多,晶粒自身尺寸会得到充分的细化。

#### 3.2 激光处理后的显微硬度

硬度可反映沉积层成分和结构的变化,是材料的综合性能指标。表 1 为不同处理涂层的最大显微硬度对比,图 5 中硬度对比曲线反映了激光处理前后及电流密度对硬度的影响。

表 1 基体与涂层的显微硬度对比

Tab. 1 Microhardness comparison between substrate and coating material (HV)

处理方式	显微硬度
304 不锈钢基体	210
射流电沉积层	513
电沉积后的激光重熔	816

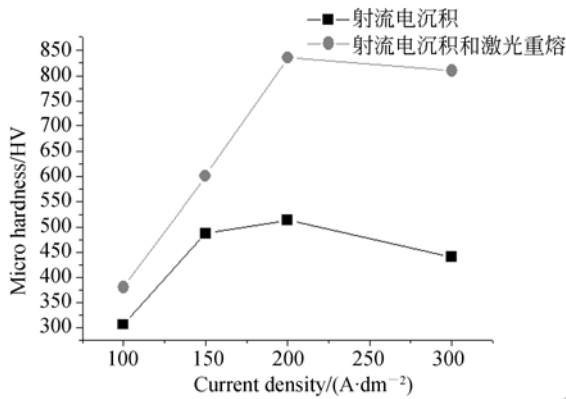


图 5 激光重熔前后的硬度变化

Fig. 5 Variation of 304 steel microhardness before and after laser remelting process

由表 1 可见,当阴极 304 不锈钢在射流电沉积涂层处理和激光重熔后,显微硬度会从 210 HV 各自增加到 513 HV 和 816 HV,具有明显的提高。这表明材料组织结构产生了较大改善。图 5 表明,当电流密度在  $100 \sim 200 \text{ A/dm}^2$  时,显微硬度会伴随电流密度的增大而持续提高;电流密度超出  $200 \text{ A/dm}^2$  时,显微硬度则随电流密度的增大而降低。由此可推断电流密度为  $200 \text{ A/dm}^2$  是较为合理的电流参数。

射流电沉积高速喷射方式的极限电流密度相比普通电沉积(多在  $10 \text{ A/dm}^2$  以下)要高得多<sup>[1,5,12]</sup>,能够提高数十倍甚至上百倍。这无疑有助于迅速提高液相传质过程,大大改善浓差极化,直接导致细小纳米晶结构的产生,使内部微观组织结构起了较大变化。而纳米晶结构在表面硬度和强度等力学性能具有公认的改善效果。

另一方面,随着电流密度的改变,形核和长大两种晶粒生长运动也在不断产生着相对变化,当二者速度达到相对平衡时晶粒尺寸比较理想,硬度易出现最优值;另一方面,激光束以其高能量密度使得沉积层和基体表面熔化,二者结合强度大大提高。激光扫描之后的快速冷却也使得沉积层

出了细晶组织,沉积层更加致密,孔隙率降低,与原沉积层相比硬度也由此提高。

### 3.3 拉伸强度分析

图 6 所示为经过射流电沉积及激光处理后试件拉伸强度的测试结果。比较后发现,进行激光处理后拉伸件的抗拉强度平均增幅约 5% 左右,有一定提高。激光处理后的最大抗拉强度可达到 590 MPa。

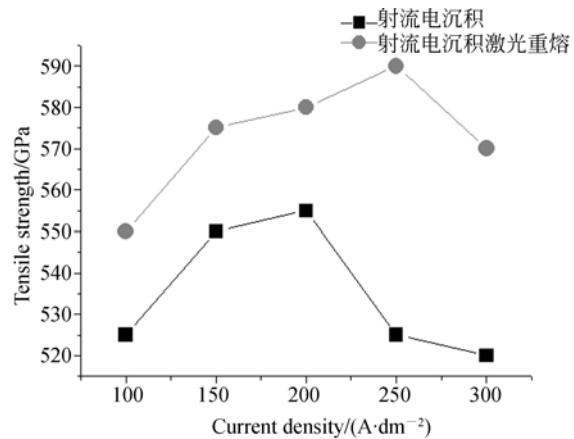
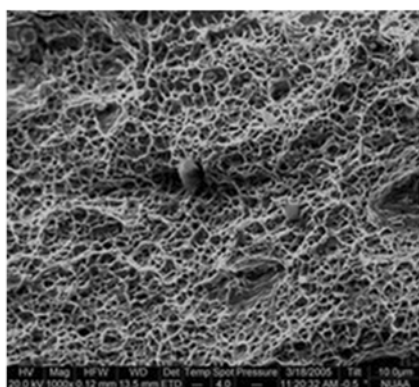


图 6 电流密度对抗拉强度的影响

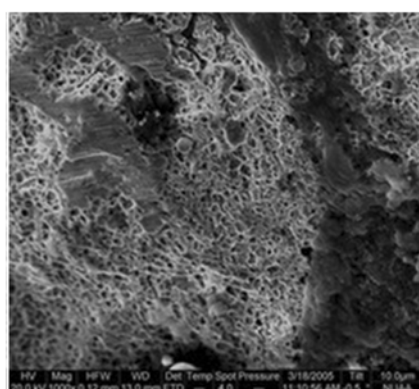
Fig. 6 Effect of current density on tensile strength

电流密度对抗拉强度曲线的影响也比较明显,在  $200 \text{ A/dm}^2$  之前,射流电沉积后材料的抗拉强度伴随电流密度的增大而升高,随后抗拉强度随之减小,可见  $200 \text{ A/dm}^2$  也是该拉伸强度曲线的拐点。而射流电沉积和激光处理的拐点则在  $250 \text{ A/dm}^2$ ,不过两条曲线的变化规律仍具有一定的相似性,这一定程度上反映了激光处理后内部组织结构随电流密度的变化趋势与处理前基本相似。激光处理不但细化了沉积层材料的晶粒组织,而且提高了其致密性,改善了沉积层与基体材料结合强度,这体现在抗拉强度的提高<sup>[10]</sup>。实验还发现拉伸强度的提高幅度并不明显,这可能是由于激光参数选择还未完全合理,需要进一步优化。此外,沉积层的激光吸收率及电沉积也会影响结果。

图 7 为激光处理前后的拉伸断口形貌。断口处韧窝的数量、形状和深浅与材料塑性有直接关系<sup>[13]</sup>。塑性较好的材料容易形成较大、较深的韧窝,而塑性较差的材料韧窝则往往比较小、浅。从比较图 7(a)和图 7(b)可知,两图都存在一定的韧窝,但韧窝的形状存在区别。图 7(a)韧窝比较明



(a)射流电沉积条件下  
(a)Under jet electro-deposition



(b)射流电沉积激光重熔条件下  
(b)Under jet electro-deposition and laser remelting

图 7 沉积层拉伸断口形貌对比

Fig. 7 Comparison of tensile fracture morphology of deposit coating

显,分布均匀,有一定的深度,表明沉积层的塑性较好。而图 7(b)中部分区域的韧窝并不明显,深度也比较浅,表明沉积层有一定的塑性但不高。这说明经过激光处理后材料的内部组织发生一定的脆化,造成了塑性的降低。

## 4 结 论

本文针对射流沉积涂层力学性能提高的要求,对预制纳米铜沉积层进行激光重熔处理。观察了制备涂层的微观组织结构和断口形貌,并进行了力学性能测试。实验结果表明:电流密度为  $200 \text{ A/dm}^2$  时制备的射流电沉积层组织较为致密力学性能较好,激光重熔后显微硬度和抗拉强度分别为  $816 \text{ HV}$  和  $590 \text{ MPa}$ 。电流密度、激光重熔等参数对沉积层组织结构和力学性能具有明显的改善作用。

拉伸强度还可进一步的优化,而塑形却存在一定的降低,未来可进一步优化激光参数,却使基体与涂层材料之间更好地互熔以提高结合效果。亦可在沉积中选择加入增强相微粒如纳米级氧化铝粉末等,增加激光重熔对组织结构的强化效果,促进重熔涂层力学性能全面提升。

## 参考文献:

- [1] 朱荻,张文峰,雷卫宁. 基于电沉积技术的纳米晶材料晶粒细化工艺研究[J]. 人工晶体学报, 2004, 33(5): 765-769.  
ZHU D, ZHANG W F, LEI W N. Study on refining grains of nanocrystalline materials based on electrodeposition[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2004, 33(2). 765-769. (in Chinese)
- [2] 马世伟,陈劲松,田宗军. 喷射电沉积技术的发展与应用[J]. 热加工工艺, 2016, 45(6): 9-11.  
MA S W, CHEN J S, TIAN Z J. Development and application of jet electrodeposition technology [J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(6): 9-11. (in Chinese)
- [3] JESWIET J, GEIGER M, ENGEL U, et al.. Metal forming process since 2000[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2008, 1: 2-17.
- [4] 兰龙,谭俊,吴迪. 喷射电沉 Ni 及 Ni-ZrO<sub>2</sub> 复合镀层的表面形貌和硬度[J]. 材料导报, 2014, 28(8): 111-115.  
LAN L, TAN J, WU D. Surface morphology and hardness of Ni and Ni-ZrO<sub>2</sub> composite coatings prepared by jet electrodeposition [J]. *Materials Review*, 2014, 28(8): 111-115. (in Chinese)
- [5] 赵阳培,黄因慧,赵剑锋. 射流电铸快速成型基础研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(4): 458-461.  
ZHAO Y P, HUANG Y H, ZHAO J H. Fundamental experiment of jet electroforming oriented by rapid prototyping[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2004, 36(4): 458-461. (in Chinese)
- [6] 兰龙,谭俊,杜军. 超声波辅助选择性电沉积技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2015, 26(9): 1261-1270.  
LAN L, TAN J, DU J. Review of ultrasonic assisted

- ted selective electrodeposition[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 26(9): 1261-1270. (in Chinese)
- [7] 李慧芳, 魏英慧, 胡兰清. 金属材料表面激光热处理的研究与应用[J]. *太原理工大学学报*, 2002, 33(2): 142-146.  
LI H F, WEI Y H, HU L Q. Research and application of laser heat treatment in metallic materials surface[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2002, 33(2): 142-146. (in Chinese)
- [8] QURESHIK A, HUSSAIN N, AKHTERB J I. Surface modification of low alloy steel by laser melting[J]. *Material Letters*, 2005, 59: 719-722.
- [9] 贾卫平, 姚井龙, 吴蒙华. 激光重熔参数对镍基纳米 TiN 复合电沉积镀层性能的影响[J]. *表面技术*, 2015, 45(3): 78-83.  
JIA W P, YAO J L, WU M H. Effect of laser remelting parameters on properties of Nickel-based nano TiN composite deposition coatings [J]. *Surface Engineering*, 2015, 45(3): 78-83. (in Chinese)
- [10] DU L Q, LI Y, LIU J F. Influence of current density on the interfacial bond strength of electroformed layers [J]. *Micro and Nano Letters*, 2012, 7(5): 402-406.
- [11] 杜立群, 鲍其雷, 赵明. 在金属基底上制作高深宽比金属微光栅的方法[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(3): 700-707.  
DU L Q, BAO Q L, ZHAO M. Fabrication of metal micro-grating with high aspect ratio on metal substrate[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3): 700-707. (in Chinese)
- [12] 刘志东. 特种加工[M]. 北京: 北京大学出版社, 2013.  
LIU ZH D. *Special Process*[M]. Beijing: Peking University Press, 2013. (in Chinese)
- [13] 李红英. 金属拉伸试样的断口分析[J]. *山西大同大学学报*, 2011, 27(1): 76-79.  
LI H Y. Fracture analysis of the metal tensile specimen [J]. *Journal of Shanxi Datong University*, 2011, 27(1): 76-79. (In Chinese)

#### 作者简介:



范 晖(1978—),男,江苏徐州人,博士,副教授,硕士生导师,2010年于南京航空航天大学获得博士学位,主要从事特种加工新技术、精密加工方面的研究。E-mail: xzfanhui@163.com



王善奎(1979—),男,山东临沂人,实验师,主要从事数控加工、设备调试方面的研究。E-mail: wsk@jsnu.edu.cn



赵阳培(1967—),男,安徽滁州人,博士,副教授,2005年于南京航空航天大学获得博士学位,主要从事特种加工新技术方面的研究。E-mail: ypzha@jsjz.edu.cn