

# 激光-TIG 电弧复合热源 熔覆 Ni 基合金组织与性能的研究

李正秋<sup>1,2,3,4</sup>, 石珏<sup>2</sup>, 张淑婷<sup>1,3,4</sup>, 杜开平<sup>1,3,4</sup>

(1. 北京矿冶研究总院, 北京 100070 2. 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050 3. 特种涂层材料与技术北京市重点实验室, 北京 102206 4. 北京市工业部件表面强化与修复工程技术研究中心, 北京 102206)

**摘要:** 研究了半导体激光与 TIG 电弧复合热源在 Q235 基体上熔覆 Ni60 金属粉末熔覆层的宏观形貌、微观组织、显微硬度、耐磨性、耐腐蚀性等性能。研究表明激光-TIG 电弧复合热源熔覆中, 引入电弧可以显著降低所需激光功率并得到与大功率激光熔覆层相近的宏观形貌, 同时复合热源熔覆层具有较好边缘铺展性; 复合热源中电弧功率不变, 随着激光功率的增加, 熔覆层中枝晶尺寸变大, 同时 Cr 的析出物数量减少、尺寸增加且分布趋向不均匀, 这导致熔覆层的显微硬度、耐磨性、耐腐蚀性均降低。

**关键词:** 激光-TIG 复合热源; 堆焊; 微观组织; 性能

中图分类号: TG174.442 文献标识码: A 文章编号: 1674-7127(2017)12-0011-05

DOI 10.3969/j.issn.1674-7127.2017.04.011

## Study on Microstructure And Properties of Nickel Base Alloy Surfacing Layer By Diode Laser-TIG Cladding

LI Zheng-qiu<sup>1,2,3,4</sup>, SHI Yu<sup>2</sup>, ZHANG Shu-ting<sup>1,3,4</sup>, DU Kai-ping<sup>1,3,4</sup>

(1. Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 100160 2. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050 3. Beijing key laboratory of special coating materials and technology, Beijing 102206 4. Beijing industrial parts surface strengthening and repairing engineering technology research center, Beijing 102206)

**Abstract:** Study on the macroscopic morphology, micro-structure micro-hardness, abrasive resistance and corrosion resistance of the Q235 which surfaced by Ni60 powder with laser-TIG cladding. The study shows the layer of diode laser-TIG cladding can get the same macroscopic morphology as the layer of diode laser which has bigger power by using a smaller power compound with arc of TIG, in addition, the layer has a better spreadability of margin. Keep the TIG power invariant in hybrid heat source, with the increase of laser power, dendrite size increases and the educts of layer are getting decreasing, the size increases, and maldistribution, lead to micro-hardness, abrasive resistance and corrosion resistance are getting decreasing in the meantime.

**Key words:** Laser-TIG cladding; surfacing; micro-structure; properties

基金项目: 国家重点研发计划资助(项目编号 2017YFB0306100)

作者简介: 李正秋, 男, (1990-), 助理工程师, 主要从事激光熔覆的研究, E-mail: lizhengqiu1990@foxmail.com

## 0 引言

现有传统的熔覆工艺如埋弧堆焊、焊条电弧堆焊, MIG/MAG (熔化极气体保护焊/非熔化极气体保护焊) 堆焊等由于有着稀释率较高, 热输入量过大, 微量元素容易烧损、工件容易变形等缺陷, 往往只适合进行一些对性能要求比较低的产品的熔覆; 采用大功率激光进行高附加值工件表面熔覆时通常存在高功率激光器的成本过高, 资金投入大; 激光对工件表面热冲击大; 工件表面的金属粉末对激光束有较高的反射率, 熔覆效率较低; 快速冷却导致熔覆层内存在一定的残余应力使熔覆层易出现裂纹等不足。因此, 结合高附加值工件对表面熔覆层性能的实际需求, 本课题组提出采用矩形大光斑激光与 TIG 电弧复合热源表面熔覆方法。利用激光和电弧两种热源各自优势, 互补各自的不足。复合热源可以降低工件表面对激光的反射率、提高熔覆效率、降低稀释率、降低所需激光功率, 从而节约人力和时间, 实现低投入、低成本运行, 可获得显著的经济和社会效益<sup>[1]</sup>。本实验对激光-TIG 电弧复合热源在 Q235 钢表面熔覆 Ni60 合金粉末的组织性能进行了研究, 为其工程应用奠定基础。

## 1 试验

### 1.1 试验器材及材料

激光-TIG 电弧复合熔覆实验系统如图 1 所示。其中激光热源采用西安炬光科技有限公司生



图 1 实验系统示意图

Fig. 1 The experimental system diagram

产的直接输出式矩形大光斑半导体激光器 (FL-DLIGHT-3000), 相比于常规 YAG、CO<sub>2</sub> 激光, 半导体激光波长更短, 更有利于金属材料对激光热量的吸收<sup>[2]</sup>。TIG 焊机为华意隆 WES315。

半导体激光-TIG 电弧复合热源装配参数如下, 钨极直径为 3.2mm, 保护气流量 8-15L/min, 钨极到工件的垂直距离为 3mm; 采用复合熔覆时电弧热源在前、激光热源在后, 钨极尖端与激光焦点的距离为 2mm, 激光束和 TIG 焊枪夹角为 30°。

熔覆材料选用 Ni60 自熔性合金粉末, 基体试板为 Q235 钢, 试板尺寸为 10 cm × 4 cm × 0.8 cm。

### 1.2 试验方法

对 Q235 基体进行除锈打磨后, 在基体上铺设厚度为 1.5 mm 的 Ni60 粉末。电流大小为 70A, 激光功率选用 200W~1800W, 功率间隔为 200W, 扫描速度 1.5mm/s。对基体进行纵向单道扫描。用线切割延激光扫描方向截取宽度为 10 mm 的金相试样。

金相试样用王水腐蚀后, 用扫描电镜观察熔敷层的显微组织, 用 EDS 能谱仪对熔覆层显微组织进行扫描。对试样进行 XRD 分析。用维氏硬度仪测定显微硬度。采用 CFT-1 型球盘往复摩擦磨损试验机检测熔覆层的耐磨性。选用 4mm 的 GCR15 钢球作为磨球, 其硬度为 HRC60。载荷为 150 N, 往复滑移距离为 5 mm, 时间为 20 min。用 LK2500A 型电化学工作站对其耐腐蚀性进行测试, 电解液为 3.5%NaCl 溶液, 极化曲线初始测量电位 -2.1v, 终止电位 2v, 扫描速度 5mm/s。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 宏观形貌

如图 2 (a) 所示为激光-TIG 复合热源单层单道熔覆层, 激光功率 1200W, 电弧功率 70A。通过与单激光熔覆形貌 (图 2b 为单激光熔覆层, 功率为 2000w) 对比可见, 复合热源能用更小的激光功率形成与高功率激光基本一致的熔覆层, 同时复合热源的边缘成形更好。这是由于采用梯形平台热源时边缘的温度梯度过大并且激光熔覆的

热影响区小，冷却速度快，边缘的温度低，表面张力大，横向扩展能力较弱，使熔化的液滴来不及铺展就凝固，单激光很难实现边缘的铺展，同时更容易产生裂纹等缺陷。而复合热源增加了边缘的温度，降低了表面张力，改善了熔覆层边缘的铺展能力。



a 激光-TIG 熔覆层宏观形貌

a Macro cladding layer of laser-TIG



b 单激光熔覆层宏观形貌

b Macro cladding layer of laser

图2 熔覆层宏观形貌

Fig. 2 Macro cladding layer

## 2.2 显微组织

图3为激光-TIG复合热源熔覆层显微组织截

面图。如图3(a)所示，在凝固刚刚开始时，熔液与基体保持接触，熔液与基体界面处的凝固速率几乎为零，由于基体温度较低，界面处熔液的温度梯度  $G$  很大，此时的  $G/R$  值非常高，凝固所释放的热量向界面后方的基体释放，使结晶面缓慢的向较热的熔液中推移，所以在凝固刚开始时易形成平面晶；随着凝固的进行，凝固速度逐渐加快，温度梯度逐渐减小，形成了垂直于接合面生长的树枝晶。在熔覆层中部，形成了块状的析出物，如图3(b)所示。对其进行EDS能谱分析可知，图3(b)中A处为富Cr，贫Fe、Ni区；B处为富Ni贫Fe、Cr区。C处Cr含量低于A处高于B处。各处主要金属元素含量如表1所示。熔覆层凝固过程中，基体相周围有大量Ni、Cr、Fe原子存在，而Ni、Cr、Fe同属Fe族元素，且原子半径相近，易形成固溶体，已有研究将Ni基合金中的固溶体归纳为(Ni-Fe-Cr)、(Ni, Fe)、Cr-Fe<sup>[3-4]</sup>。结合XRD分析认为熔覆层中存在富Ni的(Ni, Fe)固溶体。由于熔覆层中的Ni、Fe元素大多形成(Ni, Fe)、FeNi<sub>3</sub>等，剩下的Cr原子在结晶时与C、B形成Cr的C化物、B化物等物相。XRD分析如图4所示。图3(c)为熔覆层上部示意图，如图可见由于冷却速度增大，熔覆层上部形成了较为细小的树枝晶，且树枝晶的指向性不明显。这是由于此处熔覆层的热量散失是通过周围环境造成的<sup>[5]</sup>。

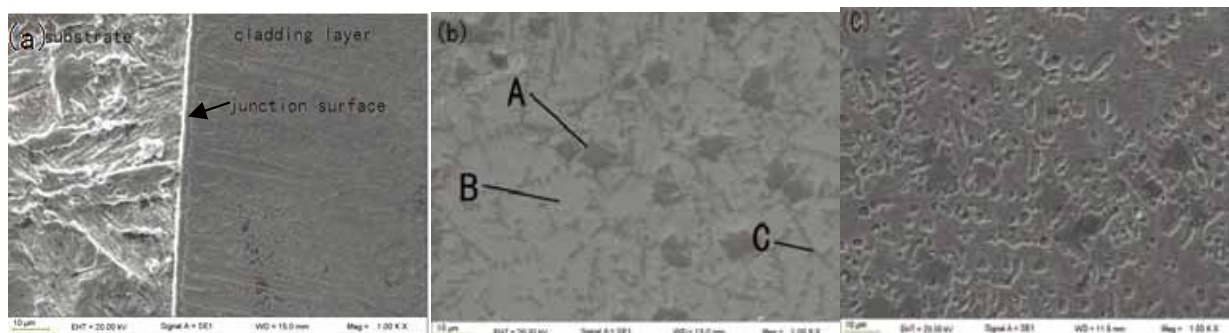


图3 激光-TIG复合热源熔覆层显微组织图

Fig.3 Microscopic structure of cladding layer

表 1 不同部位金属成分 (主要元素)

Table 1 Metal component of different part

	Si	Cr	Fe	Ni
A	2.06	83.13	8.20	6.61
B	2.93	9.95	11.32	75.80
C	1.95	63.11	10.68	24.26

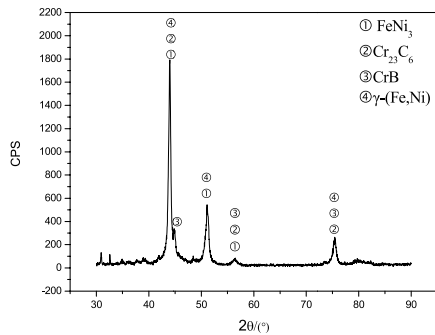
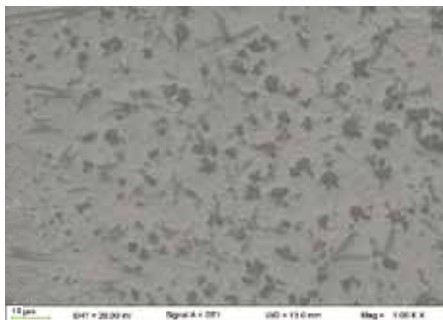


图 4 熔覆层 XRD 分析结果

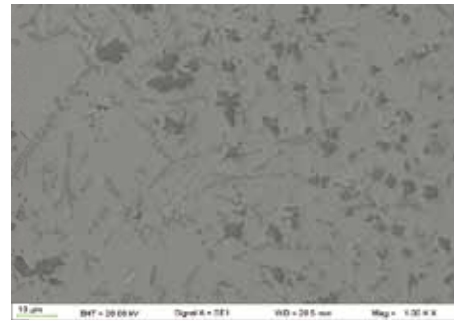
Fig.4 X-ray diffraction results of laser-TIG cladding layer

电弧功率不变, 随着激光功率增加, 熔覆层中的 Cr 的析出物数量逐渐减少, 并向一起靠拢, 但析出物的尺寸变大。如图 5 所示。这可能是由于随热输入量的增加, 熔覆层的冷却速度降低, 凝固时间变长, 析出物有足够的时间聚集、长大<sup>[6-8]</sup>。由于热输入量增加后, 析出物数量减少并且分布不均匀。而 Cr 的析出物为硬质相, 数量的减少及分布不均对熔覆层的性能产生负面影响<sup>[9]</sup>。



a 70A+200W 熔覆层析出物形貌

a precipitate in material of cladding layer with 70A+200W



b 70A+800W 熔覆层析出物形貌

b precipitate in material of cladding layer with 70A+800W

图 5 不同热输入量析出物形貌

Fig.5 precipitate in material of cladding layer with different power

2.3 显微硬度

如图 6 所示为电弧功率不变, 不同激光功率在横截面上由熔覆层顶部向基体做的显微硬度分布图。如图可见随着激光功率的增加, 熔覆层的显微硬度降低。这是由于随着热输入量增加, 温度梯度 G 与冷却速度 R 的比值增加, 熔覆层的显

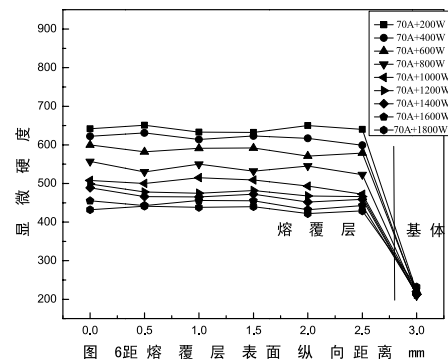


图 6 距熔覆层表面纵向距离 mm

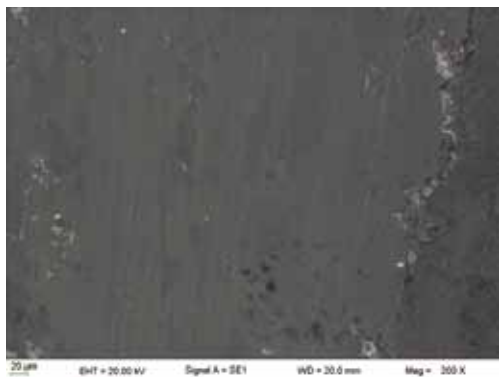
图 6 熔覆层显微硬度

Fig.6 The microhardness of the laser cladding layer

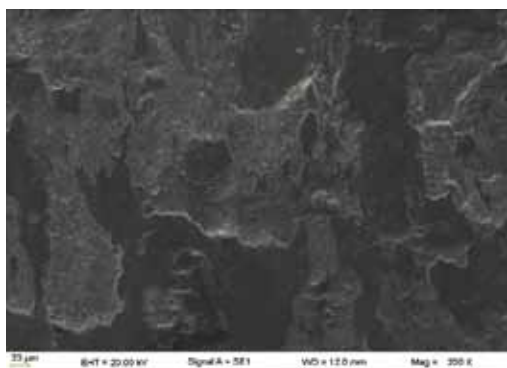
微组织特征由细小变得较为粗大,显微组织越大,晶界越少,晶界面积越小,晶界阻力减小,从而显微硬度降低。同时随着热输入量的增加,熔覆层中 Cr 的碳化物等析出物的数量减少且分布不均匀,而 Cr 的碳化物在熔覆层中为硬质相<sup>[9]</sup>, Cr 的碳化物的减少也是熔覆层硬度降低的原因之一。

#### 2.4 耐磨性

不同功率下熔覆层磨损形貌如图 7 所示。当功率为 200W+70A 时,熔覆层硬度比较高,抗磨损能力较强,磨损后熔覆层表面相对比较平整,仅出现轻微的沟痕,如图 7(a) 所示;当功率为 1200W+70A 时,熔覆层的热输入量加大,熔覆层中显微组织粗大,同时硬质相的数量减少,使得熔覆层显微硬度降低明显,相同磨损条件下熔覆层出现明显的剥落,并在熔覆层表面造成疲劳剥离坑,如图 7(b) 所示。



a 200W+70A 熔覆层磨损形貌  
a Wear appearance of 200W+70A



b 1200W+70A 熔覆层磨损形貌  
b Wear appearance of 200W+70A

图 7 不同功率下熔覆层磨损形貌

Tig.7 Wear appearance of different laser power

#### 2.5 耐腐蚀性

如图 8 所示为电弧功率为 70A 不变,激光功率分别为 800W、1400W 时,熔覆层电化学耐腐蚀极化曲线示意图。当功率为 70A+800W 时,熔覆层的腐蚀电位 -0.909V;当功率为 70A+1400W 时,熔覆层的腐蚀电位为 -0.911V。70A+800W 的腐蚀电位要高于 70A+1400W,这说明在发生电化学腐蚀时 70A+1400W 的熔覆层先被腐蚀。在功率为 70A+800W 时自腐蚀电流密度为 2.36mA/cm<sup>2</sup>;70A+1400W 时自腐蚀电流密度为 2.57mA/cm<sup>2</sup>。这说明在电解液中 70A+800W 的熔覆层腐蚀速率低。

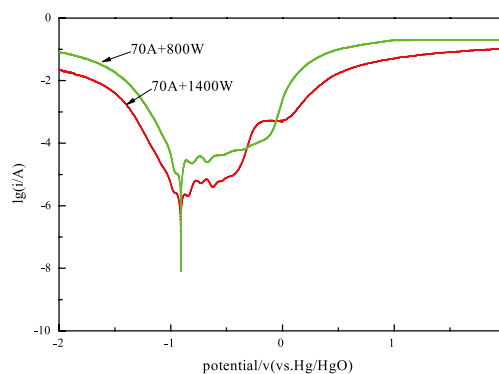


图 8 不同功率熔覆层极化曲线

Fig.8 polarization curve of different power

### 3 结论

(1) 激光-TIG 电弧复合热源熔覆层可以通过使用较小的激光功率与 TIG 电弧复合从而达到与大功率激光熔覆相近的熔覆层。

(2) 熔覆层主要由 -Ni、Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>、CrB、FeNi<sub>3</sub> 等物相组成;电弧功率不变随着激光功率的增加,熔覆层中 Cr 的碳化物等析出物数量减少、尺寸增加且分布不均匀。析出物的减少是熔覆层性能降低的原因之一。

(3) 电弧功率不变,随着激光功率的增加熔覆层显微硬度、耐磨性、耐腐蚀性降低。

#### 参考文献

[1] 顾玉芬,苏艳文,石玢,等.工艺参数对大光斑半导体激光熔覆层成形特征参数及组织性能的影响[C]//

(下转 76 页)

表 6 强化截齿性能总结  
Table 6 Summary of cutting performances

截齿型号	强化层性能	备注
U92	熔覆层硬度为 50HRC，为铁基合金粉，韧度好，强度较高	熔点高，工艺性好
U95	熔覆层硬度为 55HRC，为镍基合金粉，韧度好，强度高	耐磨，无裂纹
U135	激光强化层硬度为 55 ~ 59HRC，为钴基合金粉，韧度好，强度高	耐磨，耐蚀，不开裂

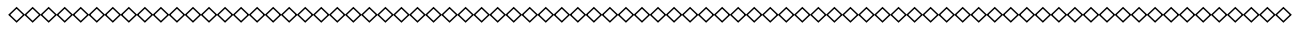
磨性达到未热处理试样的 1.6 倍数，且摩擦系数呈现减小趋势；

(4) 实际应用发现，该强化截齿使用寿命可延长 3 ~ 5 倍。

参考文献

[1] 纪朝辉. 采煤机镶铸硬质合金截齿的试验研究[J]. 铸造, 2004, 53(1): 46-48.  
 [2] 郭靖. 山特维克截齿材料工艺与应用案例研究[J]. 江苏科技信息, 2012: 34-35.  
 [3] 姚树玉, 李惠琪, 吴玉萍. 堆焊技术在截齿中的应用[J].

矿山机械, 2003: 11-12.  
 [4] 王大伟, 张伟强, 张金库, 等. 硬岩截齿钎焊-热处理一体化工艺研究[J]. 煤矿机械, 2010, 31(5): 100-102.  
 [5] 谭高旭. 42CrMo 截齿中频感应钎焊及热处理一体化工艺研究[D]. 山东科技大学, 2013.  
 [6] 孙方红, 马壮, 董世知. 矿用截齿表面强化技术[J]. 金属热处理, 2011, 36(11): 99-102.  
 [7] 赵海鸥, 李春华. 激光熔覆工艺特性及裂纹敏感性研究[J]. 金属热处理, 2001(1): 18-21.  
 [8] 从善海, 杨洪林. 矿钻轴承摩擦副 EX30 钢与 55SiMoV 钢渗碳淬火后的耐磨性能[J]. 金属热处理 2013, 35(3): 58-62.



(上接 71 页)

二十次全国焊接学术会议论文集. 2015.  
 [2] 苏国强. 大功率半导体激光表面加工技术研究[D]. 北京工业大学, 2007.  
 [3] Sun G, Zhou R, Li P, et al. Laser surface alloying of C-B-W-Cr powders on nodular cast iron rolls[J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205(8-9):2747-2754.  
 [4] Tjong S C, Ma Z Y. Microstructural and mechanical characteristics of in situ metal matrix composites[J]. Materials Science & Engineering R Reports, 2000, 29(3-4):49-113.  
 [5] 黄凤晓. 激光熔覆和熔覆成形镍基合金的组织与性能研

究[D]. 吉林大学, 2011.  
 [6] 曾大文, 夏辉, 谢长生. Ni 基合金激光熔覆层组织特征及凝固过程的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2000, 29(2):109-113.  
 [7] 于春田, 大城桂作, 山本郁, 等. 含硅量和冷却速度对中铬铸铁碳化物的影响[J]. 铸造, 2001, 20(05):258-262.  
 [8] 王明林, 成国光, 杨新娥, 等. 冷却速率对低碳钢凝固过程 Ti2O3 析出的影响[J]. 安徽工业大学学报: 自然科学版, 2003, 20(z1):29-32.  
 [9] 李泽邦. Ni 基复合粉末激光熔覆层组织与性能的研究[D]. 山东大学, 2013.