

# 功率对激光熔覆 Ni 基 WC 涂层组织与硬度的影响

王开明<sup>1</sup>, 雷永平<sup>1</sup>, 符寒光<sup>1</sup>, 杨勇维<sup>1</sup>, 魏世忠<sup>1</sup>, 李庆棠<sup>1</sup>, 苏振清<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学, 北京 100124)

(2. 北京首钢机电有限公司, 北京 100043)

**摘要:** 利用 6 kW 光纤激光器在 Q235 钢板表面激光熔覆 Ni 基 WC 复合涂层。使用光学显微镜、扫描电子显微镜、能谱仪、显微硬度计, 研究了不同激光功率下熔覆层组织形态、成分和显微硬度的变化规律。结果表明: WC 部分发生溶解并与其他元素相互作用形成共晶物, 析出后以块状、条状、粒状等形态存在; 随着激光功率的增大, 熔覆层的高度、熔深和稀释率逐渐增加, 熔覆层平均硬度先增大后减小, 当激光功率为 2500 W 时能够获得最高硬度, 可达基体硬度的 5 倍左右。

**关键词:** 光纤激光熔覆; 激光功率; Ni 基 WC 涂层; 显微组织; 硬度

中图分类号: TG456.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)11-3474-05

激光熔覆是 20 世纪 70 年代随着大功率激光器的发展而兴起的一种新的表面改性技术, 它是利用高能量密度的激光束为热源在基材表面熔覆具有特定合金材料的熔覆层<sup>[1,2]</sup>。主要应用于工件表面强化以及钢材零件表面修复等方面, 可对发电机组转子、冶金轧辊、飞机发动机叶片等大型零件表面局部强化和修复, 节省大量资源<sup>[3-5]</sup>。激光熔覆技术拥有非常多的优点, 比如熔覆层与基体能够形成良好的冶金结合, 增强了熔覆层和基体之间的结合强度, 又如激光熔覆加热和冷却速度很快, 基体对熔覆层元素的稀释作用很小, 能够保持其表面合金材料优良的性能, 由于快速加热和凝固时材料的热变形量较小, 因此零件的报废率也非常低。激光熔覆技术能够从根本上改善材料的表面性能, 几乎不受基体材料的制约<sup>[6]</sup>。

金属陶瓷复合涂层是目前激光熔覆技术领域研究发展的热点。近年来, 国内外对这类涂层研究较多的是在 Fe、Ni、Co 基粉中添加 WC、SiC 等陶瓷相的硬质复合涂层<sup>[7-10]</sup>。其中, Ni 基合金粉末以其良好的润湿性、耐蚀性、高温自润滑作用和适中的价格在激光熔覆领域有着广泛的应用, WC 是耐磨性极佳的硬质材料, Ni 基合金对 WC 有很好的润湿性<sup>[11]</sup>。因此, 激光熔覆 WC 颗粒增强 Ni 基合金涂层以其优良的耐磨性能和适中的价格在工业界得到了广泛应用。

为了制备耐磨性良好的涂层, 本研究在镍基合金 Ni60A 粉末中加入 20%WC (质量分数) 粉末, 通过

改变光纤激光器的激光功率, 在 Q235 基体上进行光纤激光熔覆, 对熔覆后的涂层进行显微组织和硬度分析, 期待为工业生产应用提供指导。

## 1 实验

实验所用基板材料为 Q235 钢板, 将其加工成 110 mm×40 mm×6 mm 的试样, 激光熔覆前利用砂纸打磨并用丙酮清洗干净。所用熔覆材料是粒度为 44~105 μm 的 Ni60A 合金粉末, Ni60A 合金粉末成分如表 1 所示, 镍包 WC 颗粒的粒度为 44~105 μm, 其成分如表 2 所示。

光纤激光熔覆实验使用的激光熔覆系统主要由 YLS-6000 型光纤激光器、送粉器、水冷系统、控制系统等组成。YLS-6000 型光纤激光器的波长为 1070 nm, 最高功率 6 kW, 出光模式为连续出光, 光斑大小为 5 mm×5 mm, 光斑内能量分布均匀。六轴联动

表 1 Ni60A 合金粉末成分

Table 1 Composition of the Ni-base alloy powder (ω/%)					
C	Cr	Fe	B	Si	Ni
0.5~1.0	14~19	<8	3.0~4.5	3.5~5.0	Bal.

表 2 镍包 WC 成分

Table 2 Composition of the Nickel clad WC (ω/%)		
Ni	C	W
15.21	3.05	Bal.

收稿日期: 2016-11-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51475005, 51275006); 北京市教委科研项目 (PXM2015-014204-500170)

作者简介: 王开明, 男, 1991 年生, 硕士生, 北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100124, E-mail: kmwangbjut@163.com

机器人携带激光头按照设定程序完成光斑行走轨迹。实验采用同步送粉法送粉，激光熔覆配套送粉器为 BTSF-2 气动送粉器。粉末在气流作用下通过送粉管到达送粉喷嘴，实现了激光熔覆的自动送粉过程。实验中采用的保护气为氩气，氩气纯度 ≥ 99.9%。送粉器带有 2 个送粉仓，实验中单独选用 1 个仓送粉。

选择激光熔覆工艺参数为：激光功率分别为 1000、1500、2000、2500、3000 W，扫描速度为 240 mm/min，送粉速率为 15 g/min。为了防止氧化，熔覆时同步吹氩气进行保护，氩气流量为 15 L/min。在激光单道熔覆试样横截面截取试样并镶嵌，经磨光和抛光后用王水溶液腐蚀，腐蚀时间为 20 s。采用 OLYMPUS BX51 型金相显微镜对熔覆层的形貌进行观察与测量，采用 JSM-6510 型扫描电镜观察显微组织及 Genesis 能谱仪进行半定量分析。采用 MICROMET-5103 数字显微硬度仪对熔覆层硬度进行测试，沿层深方向每隔 0.25 mm 测一次显微硬度，试验负荷为 500 g，加载时间为 10 s。

## 2 结果与分析

### 2.1 激光熔覆层的稀释率

稀释率是指激光熔覆过程中，由于基体材料熔化进入熔覆层从而导致熔覆层成分发生变化的程度<sup>[12]</sup>。为比较不同激光功率下稀释率的大小，通过式 (1) 进行计算：

$$\eta = \frac{h}{h+H} \times 100\% \quad (1)$$

式中： $\eta$  为熔覆层的稀释率， $H$  为熔覆层的高度 ( $\mu\text{m}$ )， $h$  为基体的熔深 ( $\mu\text{m}$ )。通过测量  $H$  与  $h+H$ ，计算稀释率的大小结果如表 3 所示。由表 3 可以看出，随着激光功率的增加，熔覆层的高度  $H$  和基体的熔深  $h$  都增加，熔覆层的稀释率也增加，这是由于随着激光功率的增加，单位面积上获得的能量密度增加，导致稀释率增加。

### 2.2 激光熔覆层的微观组织

图 1 为 Ni60A+20%WC 在激光功率为 1000 W 时的 SEM 照片。由图 1 可以看出，熔覆层成形良好，熔

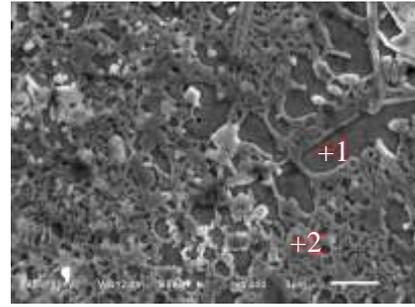


图 1 1000 W 下熔覆层显微形貌

Fig.1 Microstructure of cladding layer under 1000 W

覆层组织主要由  $\gamma$ -Ni 和 Cr 的化合物等硬质相组成，对深色块体 1，灰色枝晶 2 进行 EDS 分析，经计算得深色块体 1 的成分相对含量（主要成分的相对质量分数，%，下同）为 75.97Ni, 8.65Cr, 10.59Fe, 4.78Si, 灰色枝晶 2 的成分相对含量为：32.88Cr, 54.71Ni, 07.56Fe, 4.85Si。所以深色块体主要是  $\gamma$ -Ni 基体，灰色枝晶部分主要是 Cr、Fe 等硬质相的碳化物。利用 EDS 分析仪对放大 100 倍下熔覆层进行区域成分分析，测得其平均成分相对含量见表 4。

图 2 为 Ni60A+20%WC 在激光功率为 1500 W 时的 SEM 照片。由图 2 可以看出，熔覆层成形良好，相比于 1000 W 时熔覆层组织细化，对深色块体 1，灰色枝晶 2，白色树枝晶 3 进行 EDS 分析，经计算得深色块体 1 的成分相对含量为：62.57Ni, 5.58Cr, 27.86Fe, 3.99Si, 灰色枝晶 2 的成分相对含量为：33.94Cr, 23.32Fe, 20.94W, 20.85Ni, 0.95Si, 白色树枝晶 3 的成分相对含量为：41.53Ni, 29.32Fe, 22.03Cr, 4.84W, 2.28Si, 说明深色块体主要是  $\gamma$ -Ni 基体，基体中 Fe 元素含量增加，灰色枝晶部分主要是 Cr、W 等硬质相的碳化物，W 元素的出现说明 WC 颗粒在该功率下发生溶解，并与其他元素形成共晶物，呈粒状或块状。白色树枝晶主要是 Cr、Fe 等硬质相的碳化物。利用 EDS 分析仪对放大 100 倍下熔覆层进行区域成分分析，测得其平均成分相对含量见表 4。

表 4 各功率下熔覆层 (100×) 的 EDS 成分分析  
Table 4 EDS component analysis of the cladding layer under different laser power ( $\omega\%$ )

表 3 稀释率计算结果  
Table 3 Calculation results of dilution rate ( $\eta$ )

Power/W	H/ $\mu\text{m}$	h/ $\mu\text{m}$	H+h/ $\mu\text{m}$	$\eta/\%$
1000	1902	637	2539	25.09
1500	2108	735	2843	25.85
2000	2317	873	3190	27.37
2500	2507	1076	3583	30.30
3000	2846	1303	4149	31.41

Power/W	Ni	Cr	Fe	Si	W
1000	60.70	15.70	4.57	3.67	15.36
1500	59.78	14.85	5.16	3.03	17.18
2000	63.82	13.29	5.32	2.75	14.82
2500	58.31	12.60	6.85	3.20	19.04
3000	56.48	12.71	9.84	3.35	17.62

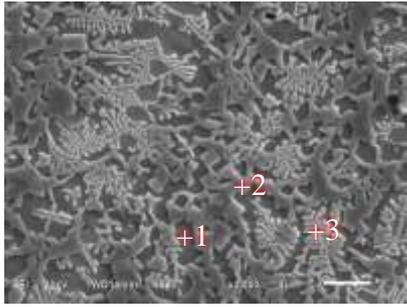


图 2 1500 W 下熔覆层显微形貌

Fig.2 Microstructure of cladding layer under 1500 W

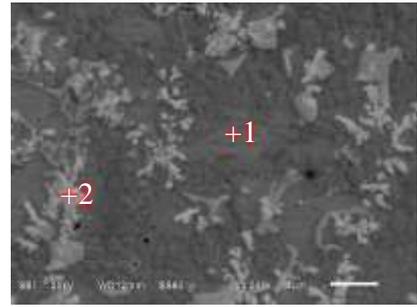


图 4 2500 W 下熔覆层显微形貌

Fig.4 Microstructure of cladding layer under 2500 W

图 3 为 Ni60A+20%WC 在激光功率为 2000 W 时的 SEM 照片。由图 3 可以看出, WC 颗粒部分发生溶解, WC 颗粒周边呈晶须状分布, 对图 3 中灰色枝晶 1 和深色枝晶 2 进行 EDS 点扫描, 经计算得灰色枝晶 1 的成分相对含量为: 86.28Ni, 6.47Cr, 5.24Fe, 2.01Si, 灰色枝晶部分主要是以  $\gamma$ -Ni 为基体的多元共晶物。图 3 中深色枝晶 2 进行 EDS 点扫描, 经计算得深色枝晶 2 的成分相对含量为: 49.82Cr, 32.80W, 9.21Ni, 5.12Si, 2.21C, 0.84Fe, 说明深色枝晶 2 主要为 Cr 和 W 的共晶物, 在 2000 W 时 WC 颗粒的溶解量进一步增大, WC 颗粒呈条状, 熔覆层中 WC 颗粒发生溶解并与其他元素形成低温共晶物, 共晶物呈条状存在。利用 EDS 分析仪对放大 100 倍下熔覆层进行区域成分分析, 测得其平均成分相对含量见表 4。

图 4 为 Ni60A+20%WC 在激光功率为 2500 W 时的 SEM 照片。由图 4 可以看出, 熔覆层成形良好, 灰色树枝晶分布更加分散, 对深色块体 1, 灰色枝晶 2 进行 EDS 分析, 经计算得深色块体 1 的成分相对含量为: 74.26Ni, 7.92Cr, 13.56Fe, 4.12Si, 灰色枝晶 2 的成分相对含量为: 43.44Cr, 42.30W, 9.25Ni, 3.66Fe, 1.36Si。灰色枝晶主要是 Cr、W 等硬质相的碳化物, 呈块状或者条状, 灰色枝晶中的 W 含量进一步增加,

说明该功率下 WC 溶解量增加。利用 EDS 分析仪对放大 100 倍下该熔覆层进行区域成分分析, 测得其平均成分相对含量见表 4。

图 5 为 Ni60A+20%WC 在激光功率为 3000 W 时的 SEM 照片。由图 5 可以看出, 熔覆层成形良好, 灰色树枝晶呈放射状分布, 灰色枝晶分布更加均匀。对深色基体 1, 灰色枝晶 2, 灰色块体 3 进行 EDS 分析, 经计算得深色基体 1 的成分相对含量为: 72.05Ni, 13.56Fe, 6.72Cr, 4.19Si, 灰色枝晶 2 的成分相对含量为: 34.42Cr, 55.74W, 5.19Ni, 3.29Fe, 1.35Si, 灰色块体 3 的成分相对含量为: 63.37W, 27.90Cr, 4.95Ni, 3.78Fe。由灰色枝晶 2 和灰色块体 3 的成分相对含量可以看出, WC 的溶解量继续增大, 灰色枝晶中的 W 含量超过 Cr 含量, 共晶物呈粒状或小条状。利用 EDS 分析仪对放大 100 倍下该熔覆层进行区域成分分析, 测得其平均成分相对含量见表 4。

由表 4 可知, 随着激光功率的增加, 测得熔覆层中 Fe 元素相对含量增加, 功率为 1000 W 时熔覆层中 Fe 元素相对质量分数为 4.57%, 当激光功率增加到 3000 W 时熔覆层中 Fe 元素相对质量分数为 9.85%, 熔覆层中 Fe 元素相对质量分数增加超过 1 倍。所以, 随着激光功率的增加, 熔覆层的稀释率增加。



图 3 2000 W 下熔覆层显微形貌

Fig.3 Microstructure of cladding layer under 2000 W

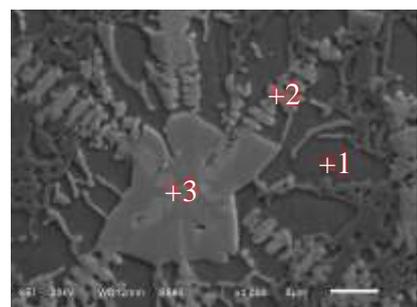


图 5 3000 W 下熔覆层显微形貌

Fig.5 Microstructure of cladding layer under 3000 W

### 2.3 显微硬度分析

图 6 为不同激光功率下激光熔覆层平均硬度曲线。从图 6 可以看出，当激光功率小于 2500 W 时，随着激光功率的增加，熔覆层的平均硬度逐渐增大，当激光功率大于 2500 W 时，随着激光功率的增加，熔覆层的平均硬度开始降低。这是由于激光熔覆过程中冷却速度可达  $10^2 \sim 10^6$  °C/s，快速凝固一方面使晶粒细化，起到细晶强化的作用，另外，熔覆层中的 WC、Cr 等硬质相的碳化物的存在能够使熔覆层的硬度提高。激光功率越高，熔覆过程中熔覆表面合金粉末所吸收到的热量越多，导致基体熔化量增多，基体中的铁元素进入熔覆层的数量就越多，即基体对熔覆层的稀释作用越强，当激光功率大于 2500 W 时熔覆层的稀释率增加过快，所以熔覆层的硬度降低。

图 7 为不同激光功率下熔覆层与基体截面的显微硬度分布图，沿着层深方向每隔 0.25 mm 测一次显微硬度。由图 7 可以看出，熔覆层上部的显微硬度略低于熔覆层下部的显微硬度。这是因为在光纤激光熔覆过程中，因 WC 密度较高，WC 颗粒有向下沉积的倾

向。此外，热影响区部分硬度显著下降。结合图 6 和图 7 可以看出，激光功率为 1000 W 时熔覆层显微硬度约为基体硬度的 4 倍，当激光功率为 2500 W 时，熔覆层的硬度最高，约为基体硬度的 5 倍。

### 3 结 论

1) 在光纤激光熔覆 Ni 基 WC 增强复合涂层的过程中，随着激光功率的增加，熔覆层的熔高和熔深逐渐增大，熔覆层稀释率增加。

2) 随着激光功率的增加，WC 溶解量逐渐增加，WC 颗粒与其他元素相互作用形成共晶物，析出后分别以块状、条状、粒状等形态存在。

3) 随着激光功率的增加，熔覆层的显微硬度先增大后减小，当激光功率为 2500 W 时，能够获得最高硬度，约为基体硬度的 5 倍。

#### 参考文献 References

[1] Zhang Dawei(张大伟), Lei Quanting(雷廷权), Li Qiang(李强). *China Surface Engineering*(中国表面工程)[J], 1999, 12(3): 1

[2] Dong Yun(董允), Zhang Tingsen(张廷森), Lin Xiaopin(林晓聘). *Modern Surface Engineering Technology*(现代表面工程技术)[M]. Beijing: China Machine, 2000

[3] Wang Aihua(王爱华), Xie Changsheng(谢长生), Li Shudong(李树栋). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 1999, 28(5): 289

[4] Wu Ping(吴萍), Jiang Enyong(姜恩永), Zhao Ci(赵慈) et al. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2003, 24(2): 44

[5] Farahmand P, Liu S, Zhang Z et al. *Ceramics International*[J], 2014, 40(10): 15421

[6] Valsecchi B, Previtali B, Vedani M et al. *Int J Mater Form*[J], 2010, 3(1): 1127

[7] Lv Xudong(吕旭东), Wang Huaming(王华明). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(10): 848

[8] Fan Ding(樊丁), Sun Ming(孙明), Sun Yaoning(孙耀宁) et al. *Journal of Lanzhou University of Technology*(兰州理工大学学报)[J], 2007, 33(3): 16

[9] Zhang Song(张松), Zhang Chunhua(张春华), Wu Weitao(吴维涛) et al. *Acta Metallurgical Sinica*(金属学报)[J], 2001, 37(3): 315

[10] Guo Chun, Chen Jianmin, Zhou Jiansong et al. *Surface & Coatings Technology*[J], 2012, 206: 2064

[11] Yang Jiaoxi(杨胶溪), Zuo Tiechuan(左铁钊), Huang Xibing

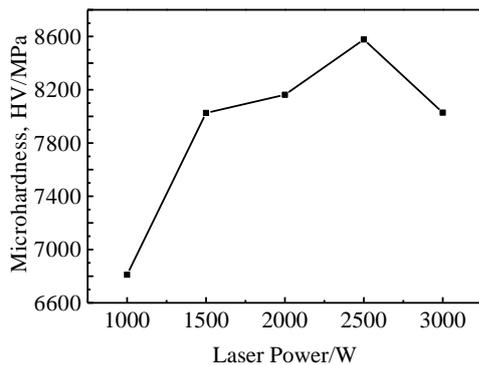


图 6 不同激光功率下熔覆层显微硬度变化

Fig.6 Cladding layer microhardness variation with different laser power

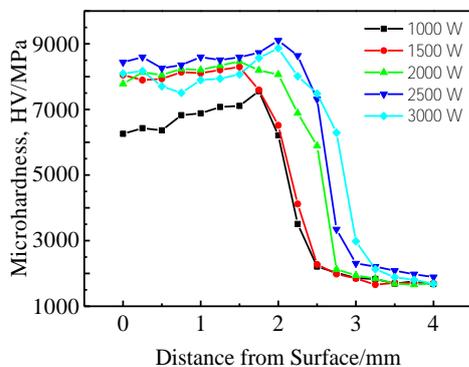


图 7 熔覆层与基体显微硬度分布

Fig.7 Microhardness distribution of cladding layer and matrix

- (王喜兵) *et al. Applied Laser*(应用激光)[J], 2008, 28(6): 450  
[12] Rong Lei(戎磊), Huang Jian(黄坚), Li Zhuguo(李铸国) *et al. China Surface Engineering*(中国表面工程)[J], 2010, 23(6): 40

## Effect of Power on Microstructure and Hardness of Laser Cladding Ni-based WC Coating

Wang Kaiming<sup>1</sup>, Lei Yongping<sup>1</sup>, Fu Hanguang<sup>1</sup>, Yang Yongwei<sup>1</sup>, Wei Shizhong<sup>1</sup>, Li Qingtang<sup>1</sup>, Su Zhenqing<sup>2</sup>

(1. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(2. Beijing Shougang Machinery Co., LTD, Beijing 100043, China)

**Abstract:** Laser cladding Ni-based WC composite coating was fabricated on the surface of Q235 steel by 6 kW fiber laser. By scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS) and micro-hardness tester, we investigated the morphology, composition, and micro-hardness of the composite coating under different laser power. The results show that WC particles partially dissolve and react with other elements to form eutectics, which exist in the shape of block, strip and grain. The cladding height, penetration and dilution of laser cladding coating increase gradually with the increase of laser power. Moreover, the average hardness of the coating increases first and then decreases. When the laser power is 2500 W, cladding coating can get the highest hardness, which is 5 times of the matrix hardness.

**Key words:** fiber laser cladding; laser power; Ni60A-based WC coating; microstructure; hardness

---

Corresponding author: Fu Hanguang, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China, Tel: 0086-10-67396244, E-mail: hgfu@bjut.edu.cn