

文章编号: 0258-7025(2001)10-0957-03

# 镍基合金的宽带激光熔覆\*

雒江涛 郭洪 梁二军 杜利平 晁明举 马润香

(郑州大学河南省激光应用技术重点实验室 郑州 450052)

**摘要** 利用振荡聚焦光束和自动送粉技术,获得单道宽 12 mm 以上、组织致密无缺陷的镍基合金激光熔覆层,并对其硬度分布、组织及成分进行了分析和测试。

**关键词** 宽带激光熔覆 振荡聚焦光束 自动送粉

中图分类号 TG 665 文献标识码 A

## Wide-band Laser Cladding of Ni-based Alloy

LUO Jiang-tao GUO Hong LIANG Er-jun DU Li-ping CHAO Ming-ju MA Run-xiang

(Henan Key Laboratory of Laser Technology and Applications, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052)

**Abstract** With techniques of vibrating focusing beam and automatic powder feeding, a faultless laser-cladding layer of Ni based alloy with single-track width of 12 mm and thickness of 0.9 mm was obtained. Its hardness distribution, metallurgical structure and compositions were investigated and analyzed.

**Key words** wide-band laser cladding, vibrating focusing beam, automatic powder-feeding

## 1 引言

激光熔覆是近年激光材料处理领域非常活跃的研究方向,同时获得了一些初步的应用<sup>[1]</sup>。从应用角度来看,一方面是对大型、贵重设备进行修复;另一方面是在普通或廉价材料表面全部或大面积熔覆某种特殊功能材料。传统的解决办法,例如热喷涂,它可以在材料表面获得均匀平整的合金或陶瓷涂层,而且效率比较高,但缺点是涂层与基体仍属机械结合,结合强度不够。激光熔覆能使合金层与基体达冶金结合,并且几乎能够熔所有的合金或陶瓷,但由于激光束必须经过聚焦,与材料作用的区域很小,这样单道熔覆层的宽度非常有限。比如采用静止聚焦法时,单道熔覆宽度一般为 2~3 mm<sup>[2,3]</sup>,最多不超过 5 mm(用多模 5 kW CO<sub>2</sub> 激光器)。如果进行大面积激光熔覆,必须采取多道搭接的方法。这样带来的问题主要是效率低、缺陷倾向大。解决的办法是寻找功率密度分布均匀的宽带激光光源。获得这

种光源的方法主要有振荡聚焦和采用积分镜两种。国内在前一种方法上已做了很多工作,并且已研制出相应的宽带扫描系统,然而对该系统本身的报道很多<sup>[4,5]</sup>,但对利用该系统获得宽带熔覆结果的报道却很少。

镍基合金以其良好的润湿性和适中的价格在激光熔覆中用得最为广泛,对其进行的研究也很多<sup>[2,3,6~9]</sup>,但过去的工作主要集中在静止聚焦光束和预置粉末法,其宽带熔覆结果和性能测试的报道很少,本文利用振荡聚焦光束和同步送粉方法,对激光熔覆常用的镍基合金粉进行了大量实验,获得了单道宽达 12 mm,组织致密无缺陷的合金熔覆层,对其硬度分布、金相组织及成分进行了分析和测试。

## 2 实验方法

镍基合金粉选用 Ni02,其成分如表 1,粒度为 140~320 目,基体采用 45 # 钢(其成分如表 2),样品加工成 100 mm × 30 mm × 20 mm 立方块,待熔覆面经磨削加工。激光器为国产 5 kW 横流 CO<sub>2</sub> 激光器,输出功率( $P$ )为多模 3.3 kW,发散角 5~6 mrad,采用抛物面聚焦,焦距 315 mm,熔覆时离焦量( $\Delta f$ )为 21 mm。转镜转速 2000 r/min,折合振荡聚焦光束的扫描频率为 1000 Hz,线光斑

\* 河南省高校创新工程基金、河南省杰出人才创新基金资助项目。

收稿日期 2000-07-05;收到修改稿日期 2000-11-23

长(扫描宽度,  $sw$ ) 15 mm 工件移动速度( $v$ )为 2 mm/s。自动送粉速度( $pfr$ ) 16.0 g/min。实验系统见图 1。

表 1 NiO2 合金粉的化学成分(重量百分比)

Table 1 Chemical compositions( weight percentage ) of NiO2 powder

Chemical compositions	Fe	Cr	B	Si	C	Ni
wt-%	1.5	16	3.5	4.5	0.8	Bal.

表 2 基体材料 45 # 钢的化学成分

Table 2 Chemical compositions of the base material 45 # steel

Chemical compositions	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
wt-%	0.42 ~ 0.50	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	≤0.035	≤0.035	≤0.25	≤0.25	Bal.

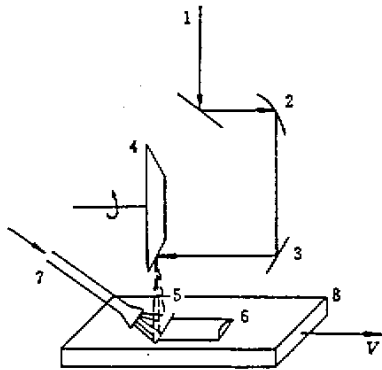


图 1 宽带扫描和自动送粉激光熔覆系统示意图

- 1 激光束 2 抛物面聚焦镜 3 平面反射镜 4 转镜;
- 5 线光斑 6 熔覆层 7 粉嘴 8 工件

Fig.1 Schematic diagram of wide-band scanning and automatic powder feeding system

- 1: laser beam; 2: parabolic focus mirror; 3: folding mirror; 4: scanning mirror; 5: linear facula; 6: cladding layer; 7: powder nozzle; 8: workpiece

实验前用砂纸擦磨试块表面,除去氧化物,然后用丙酮清洗干净,再预热约 3 min。熔覆后自然冷却。使用金相切割机把试块切开,首先对熔覆层横断面的宏观形貌进行拍照,然后分别使用 HXD-1000 数字式显微硬度计, MBA-21000 金相显微镜和 Max- $\gamma$ A<sup>2</sup> 转靶 X 射线衍射仪对熔覆层进行显微硬度、金相组织及合金成分的分析测量。

### 3 实验结果

#### 3.1 熔覆层横断面宏观形貌

图 2 为熔覆层(CL)的宏观形貌,其单道宽约 13 mm 厚约 0.9 mm。宽度为一般直接聚焦法获得熔覆层宽度的 4 ~ 5 倍<sup>[3]</sup>。通过改变线光斑长度、激光功率和

送粉量,可进一步控制熔覆层的宽度和厚度。熔覆层表面光亮,熔覆过程中和样品长时间存放后,均未发现任何裂纹或气孔。

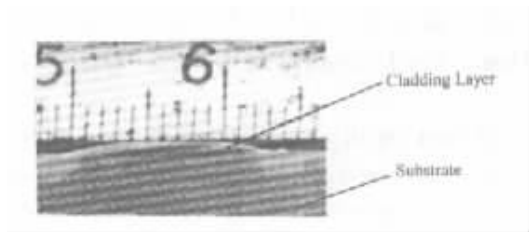


图 2 宽带激光熔覆层横断面照片

激光功率 3.3 kW 扫描速度 2 mm/s 送粉速度 16.0 g/min, 离焦距 21 mm 线光斑长度 15 mm

Fig.2 Cross-section of wide-band laser cladding layer (CL)

$P$ : 3.3 kW,  $v$ : 2 mm/s,  $pfr$ : 16.0 g/min,  $\Delta f$ : 21 mm,  $sw$ : 15 mm

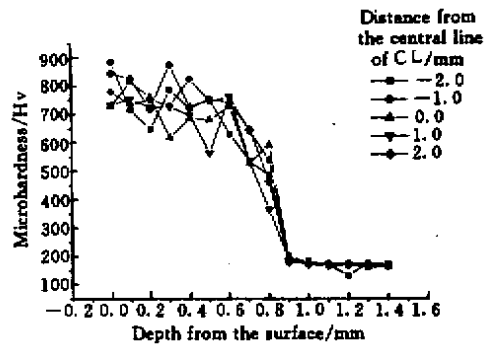


图 3 宽带激光熔覆层硬度分布

Fig.3 Hardness distribution of wide-band CL

#### 3.2 熔覆层的硬度分布

图 3 为宽带激光熔覆层的硬度分布情况。由图知,熔覆层硬度在 600 ~ 850 Hv 之间,在熔覆层内随着深度的增加,硬度略有下降,深 0.8 ~ 0.9 mm 之间为过渡区,

硬度下降剧烈,在 0.9 mm 以下硬度稳定在 200 Hv 附近,基本上等于基体硬度。不同标记的曲线代表测量点到熔覆层中线的不同横向距离(见图 3)。由图可知,在熔覆层宽度方向上,硬度测量值交错在一起,表明此方向硬度分布比较均匀。

### 3.3 熔覆区微观组织分析

熔覆区明显可以分为熔覆层(CL)、结合区(BZ)和基体热影响区(HAZ)三部分(如图 4)。熔覆层主要由枝晶和多种共晶组成,在靠近结合区,主要由一薄层胞晶组成;基体热影响区主要为细化马氏体;结合区(又称互溶区)则为二者的固溶体,呈一道亮白线,它是在高温梯度、无晶核情况下,直接在基体上通过外延附生出来的一层组织<sup>[1]</sup>。这与直接聚焦法获得熔覆层的组织特征基本一致<sup>[8]</sup>,而且在此实验条件下,未发现任何微区裂纹或气孔。

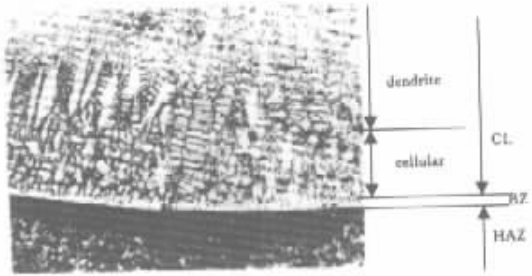


图 4 熔覆区横断面的金相组织(300×)

Fig.4 Metallurgical photograph of cladding area(300×)

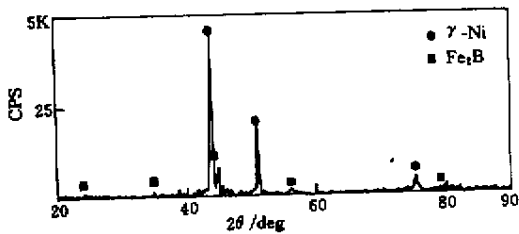


图 5 熔覆层表面 XRD 分析

Fig.5 XRD analysis of CL surface

### 3.4 熔覆层 X 射线衍射(XRD)分析

经 XRD 分析发现,熔覆层主要为  $\gamma$ -Ni 和四角结构的  $\text{Fe}_2\text{B}$  (sys: Tetragonal,  $a = 0.709300$ )。在其他工艺条件下除  $\gamma$ -Ni 外还发现有 Cr-Fe-Ni、CrB 等。文献<sup>[2,3,6~9]</sup>普遍认为 Ni 基合金熔覆层的基本组成为  $\gamma$ -Ni 与 Ni、Cr 和 Fe 的 B 及 C 化物的固溶体,但除  $\gamma$ -Ni 外,其他成分的种类及形态,各自报道的结果大不相同<sup>[2,3,6~9]</sup>。这主要是因为激光熔覆是一个快速的非平衡凝固过程,中

间有大量亚稳相、中间相生成,同时会产生晶格畸变等,这些相的形成对凝固条件非常敏感,同时采用标准衍射数据进行标定本身也会引入一定的误差。

## 4 结 论

1) 利用振荡聚焦光束和自动送粉技术,一次获得了宽 12 mm 以上、组织致密无缺陷的镍基合金激光熔覆层。这个宽度是静止聚焦法的 4~5 倍,可大大提高激光熔覆的效率;并且在熔覆过程中和样品长时间存放后,均未发现任何裂纹或气孔。

2) 熔覆层硬度在 600~850 Hv 之间,在熔覆层内随着深度的增加,硬度略有下降;在熔覆层宽度方向上,硬度分布比较均匀。

3) 熔覆层主要由枝晶和多种共晶组成,基体热影响区主要为细化马氏体,结合区为二者的固溶体。这与静止聚焦法获得熔覆层的组织特征一致。

4) 熔覆层表面 XRD 分析表明,熔覆层主要由  $\gamma$ -Ni 和 Ni、Cr、Fe 等的 B、C 化物构成。它们的出现与否、含量多少和具体形态与工艺条件密切相关。

## 参 考 文 献

- 1 R. Villar. *Laser Cladding. J. Laser Appl.*, 1999, **11**(2): 64~78
- 2 Li Qiang, Lei Tingquan, Meng Qingchang *et al.*. Transmission electron microscopy for microstructural characterization of the laser clad Ni-Cr-B-Si-C alloy. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1999, **26**(4): 372~378 (in Chinese)
- 3 Xu Chun, Lou Yuanying, Zou Zhirong. Laser cladding of NiCrBSi alloy on the 45 steel. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **24**(1): 78~82 (in Chinese)
- 4 Yang Xichen. Study of laser beam pattern for a wide-band laser heat treatment. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1990, **17**(4): 229~235 (in Chinese)
- 5 Wang Yunshan. Analysis for laser beam pattern of wide-band scanning mirror. *Optoelectronics · Laser* (光电子·激光), 1997, **8**(4): 282~283
- 6 Shang Lijuan, Zhu Jingpu, Tan Chaixin. Investigation on laser-deposition and the self-melted Co-base and Ni-base alloys. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1990, **17**(8): 491~496 (in Chinese)
- 7 Wang Anan, Yuan Bo. Microstructure and phase constitution in NiCrSiB alloy produced by laser cladding. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **24**(2): 169~173 (in Chinese)
- 8 Y. T. Pei, J. H. Ouyang, T. C. Lei. Microstructure of bonding zones in laser-clad Ni-ally-based composite coatings reinforced with various ceramic powders. *Metall. Trans. A*, 1996, **27A**: 391~400
- 9 Yang Xichen, Yan Yuhe, Wang Xingkai *et al.*. Laser cladding of NiCrSiB alloy. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1988, **15**(3): 174~178 (in Chinese)