

文章编号: 0258-7025(2003)11-1044-05

Ni 基合金/45[#] 钢宽、窄带熔覆 Co 基合金的组织

李明喜^{1,2}, 何宜柱², 孙国雄¹

(¹ 东南大学机械系, 江苏 南京 210018; ² 安徽工业大学激光加工中心, 安徽 马鞍山 243002)

摘要 利用 5 kW CO₂ 激光器在 Ni 基铸造高温合金/45[#] 钢基体上宽带、窄带激光熔覆了 Höganäs 钴基合金, 制备了无缺陷的涂层。用金相显微镜、扫描电镜和 X 射线衍射仪对比分析了熔覆层的显微组织特征和相结构。结果显示, 熔覆层均为由初生相 γ -Co 枝晶和 γ -Co + Cr₂₃C₆ 共晶组成。宽带熔覆层界面为垂直于界面生长, 窄带熔覆层界面结晶方向受热流控制, 为多方向结晶。45[#] 钢熔覆层界面具有明显的白亮过渡层且宽带熔覆比窄带宽; Ni 基合金熔覆层界面区很宽且不规则, 无白亮色过渡层。沿熔覆层中心线的纵截面取样可见平行生长的枝晶。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 钴基合金; 宽带/窄带; 显微组织

中图分类号 TG 174.44; TN 249 **文献标识码** A

Microstructure of Wide/Narrow Band Beam Laser Cladding Co-based Alloy on Ni Base Superalloy/45[#] Steel

LI Ming-xi^{1,2}, HE Yi-zhu², SUN Guo-xiong¹

(¹ Department of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210018, China
² Research Center for Laser Processing, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243002, China)

Abstract Höganäs Co based alloy coatings have been produced by using a 5 kW CO₂ laser with wide/narrow band beam on Ni based superalloy/45[#] steel. Cross-section or vertical-section of such coatings have been examined to reveal their microstructure using phase-contrast microscope, scanning electronic microscope and X-ray diffraction instrument. The results showed the primary phase γ -Co dendrite and γ -Co + Cr₂₃C₆ eutectic Co-existed in the coating. Dendrite grew perpendicularly to the interface in wide band laser beam coatings and more direction in narrow band laser coatings because of heat flux. There was a white thin layer of planar crystallizing at the interface of 45[#] steel substrate, and the width of the broad beam coatings was wider than that of narrow beam coatings. It was irregular and no sign of white thin layer at interface region of Ni-based alloy substrate. The results also showed that dendrite grew paralleling to laser scanning direction near top surface of the central line coatings (vertical section).

Key words laser technique; laser cladding; Co-based alloy; broad/narrow-band beam; microstructure

1 引言

激光熔覆是近年来材料表面处理领域非常活跃的研究方向, 主要用于大型、贵重设备的失效部位的修复和在廉价材料表面熔覆特种合金, 以获得具有

特种功能的表面, 如耐磨、耐蚀及耐高温性能。

激光熔覆材料的添加方式有多种, 如将粉末预埋在试件表面(化学粘接剂或采用热喷涂、等离子喷涂), 然后对预置合金层进行激光重熔处理^[1]; 窄带同步送粉法, 可使基体与送入的粉末同时熔化^[2]; 宽

收稿日期: 2002-06-07; 收到修改稿日期: 2002-09-23

基金项目: 中韩政府间国际合作(项目号 2002009)和安徽省科技厅中美国际合作(项目号 01088013)资助课题。

作者简介: 李明喜(1966—), 男, 东南大学博士研究生, 主要从事激光加工的基础及应用研究。通信地址: 安徽工业大学材料学院, 马鞍山 243002。E-mail: limingxi@ahut.edu.cn

带同步送粉法^[3],可使单道熔覆层的宽度增大,适用于大面积的表面激光熔覆。

与传统的激光熔覆工艺相比,宽带熔覆具有:熔覆生产效率高,便于自动化控制;零件表面的大面积激光熔覆时,可减少搭接次数,避免搭接区因重复受热,导致组织和性能及熔覆层厚度不均匀等现象。

有关 Fe, Ni, Co 基自熔性粉末的预置重熔或窄带同步送粉的研究报道很多^[4~6],然而对非自熔性 Co 基合金的宽带熔覆的研究报道不多,对其宽带熔覆凝固过程及其组织特征进行系统研究的更少。

本文采用同步送粉法,在 Ni 基高温合金和 45# 钢表面宽带、窄带激光熔覆非自熔性 Co 基合金粉末,对比分析了其凝固组织特征。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料

基体材料为热轧 45# 钢及铸造镍基高温合金,涂层材料为 Höganäs 钴基合金粉。镍基合金及钴基合金粉末的化学成分见表 1 和表 2。试样尺寸 100 mm×100 mm×10 mm,预处理后待用。

表 1 Co 基合金的化学成分 (wt.-%)

Table 1 Nominal composition of the Co-based alloy powder, in wt.-%

C	W	Ni	Fe	Cr	Si	Co
0.27	4.5	2.27	0.5	28.6	0.9	Balance

表 2 Ni 基合金的化学成分 (wt.-%)

Table 2 Nominal composition of the Ni-based alloy substrate, in wt.-%

C	Si	Cr	Fe	W	Mn	Ni
0.40	1.2	25.4	3.0	8	0.8	Balance

2.2 激光熔覆试验

在 TJ-HL-T5000 型横流 CO₂ 激光加工成套设备上,进行激光熔覆处理,该设备配有六轴四连动数控系统及同步送粉器。

在 Ni 基合金/45# 钢试样表面宽带激光熔覆,获得厚度为 2 mm,无缺陷的单道熔覆层。其熔覆工艺参数为:激光输出功率为 4500 W,扫描速度为 120 mm/min,光斑尺寸为 18 mm×2 mm,送粉速度为 25 g/min。为对比起见,同时进行窄带多道搭接熔覆,熔覆层厚度亦为 2 mm。窄带熔覆工艺参数为:激光输出功率 1950 W,扫描速度 120 mm/min,

光斑尺寸 ϕ 4.5 mm,送粉速度均为 6 g/min,搭接率为 30%。熔覆过程中用 Ar 保护熔池。

2.3 微观及 X 射线衍射分析 (XRD)

取垂直、平行于激光扫描方向的横、纵截面金相试样,经抛光后用王水深腐蚀,用 OLYMPUS PME-3 型金相显微镜,PHILIP-XL30 型扫描电镜观察及分析其组织;熔覆层表面取样,用 XD-3A 型 X 射线衍射仪分析熔覆层的相组成。

3 试验结果与分析

3.1 X 射线衍射结果

图 1 为熔覆层 X 射线衍射分析结果。钴基合金熔覆层由面心立方 γ -Co 和 Cr₂₃C₆ 组成。

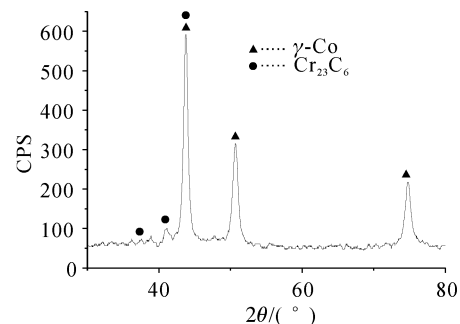


图 1 熔覆层 X 射线衍射分析结果

Fig. 1 XRD pattern of the clad

纯 Co 的 γ -Co 在 417℃ 以上为面心立方 (fcc) 结构,温度降低则转变为密排六方 (hcp) 结构 ϵ -Co。由于合金中含有 fcc 结构稳定的 Ni, Fe, C, 使 γ 向 ϵ 转变温度降低的 W 及快速冷却的共同作用,使高温状态的面心立方 γ -Co 不发生 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 相变,而保留至室温。由此可知 γ -Co 为溶有多种合金元素的 Co 基固溶体。Cr₂₃C₆ 亦为熔池快速凝固而形成的介稳相,其中溶有 Fe, Cr 等元素。

3.2 熔覆层金相组织

图 2 为钴基合金粉熔覆层与基体结合区金相组织照片。图中可见,相同的激光聚焦模式,不同的基体材料熔覆层的界面结合区的形态、结构有所不同;同种基体材料也因激光聚焦模式的不同而不同。

镍基高温合金基体上熔覆时,宽带与窄带熔覆相比,前者熔覆层界面处的结晶方向为垂直于界面、平行生长的枝晶,如图 2(a) 所示;后者则为几个方向、不平行生长的枝晶,如图 2(b) 所示。45# 钢基体上熔覆时,结晶方向与前述相近,如图 2(c), (d) 所示。

无论宽带还是窄带熔覆,45# 钢熔覆层界面为由平面结晶而形成的比较规则的、无特征结构“白亮带”过渡层^[7],依次过渡为胞状晶和树枝晶,并且明显可见平晶—胞晶及胞—枝转变;Ni 基合金界面无“白亮带”现象,而且界面区很宽,与基体交界处参差不齐。

图 3(a)为 Ni 基合金宽带熔覆层横截面上部靠近表面的组织,由于近表面过冷度大,形核率增大,

在较大范围内同时形核,形成更细小枝晶。图 3(b)为 45# 钢表面窄带熔覆层上部、靠近表面的纵截面组织,可见表面枝晶的生长方向与激光扫描速度方向一致。图 3(c)为窄带多道搭接熔覆,搭接重熔区处相当于将前一道熔覆层作为基体而进行的熔覆,即前一道熔覆层表面的细小枝晶重新熔化、重新结晶,而且重熔搭接区凝固结晶时,部分枝晶的生长方向沿着第一道枝晶的生长方向继续生长。

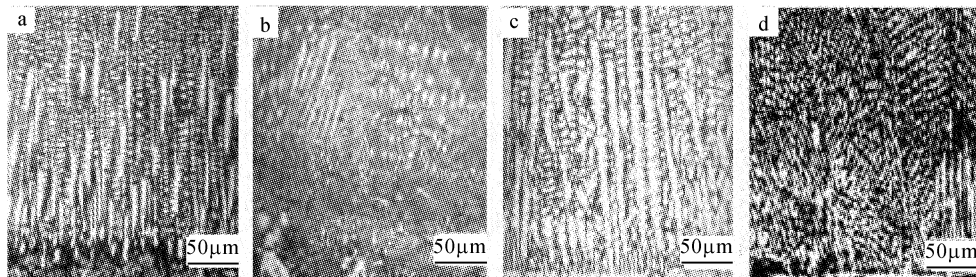


图 2 45# 钢熔覆层与基体结合区形貌

(a) 镍基合金表面窄带熔覆层; (b) 镍基合金表面宽带熔覆层;
(c) 45# 钢表面窄带熔覆层; (d) 45# 钢表面宽带熔覆层

Fig. 2 Optical morphology of bonding area between the cladding layer and the substrate

(a) narrow-band clad on Ni based alloy; (b) broad-band clad on Ni based alloy;
(c) narrow-band clad on 45# steel; (d) broad-band clad on 45# steel

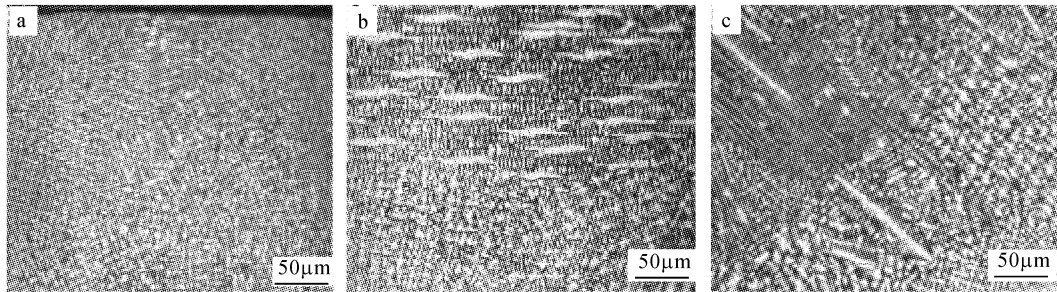


图 3 熔覆层的表面及搭接区金相组织照片

(a) Ni 基合金宽带熔覆层表面(横截面); (b) 45# 钢窄带熔覆层表面(纵截面); (c) Ni 基窄带熔覆层两道搭接(横截面)

Fig. 3 Optical morphology of near surface and bonding between two clads

(a) near top surface of broad-band clad on Ni based substrate (cross section); (b) near top surface of narrow-band clad on 45# steel (vertical section); (c) interface between two clads of narrow-band coatings on Ni based alloy substrate (cross section)

3.3 熔覆层扫描电镜组织观察

图 4 为熔覆层扫描电镜照片。图 4(a), (b) 分别为 Ni 基合金/45# 钢表面宽带熔覆层中部组织形态,图 4(c), (d) 为 Ni 基合金/45# 钢表面窄带熔覆层近表面的组织。此 4 图共同的特征是:熔覆层结晶的初生相均为 γ -Co 枝晶,枝晶间为由 γ -Co 及 Cr_{23}C_6 共同结晶形成的共晶组织;共晶组织的形貌均为层片状。不同之处在于枝晶及层片的大小与熔覆层中的相对位置有关,距界面越远,枝晶越细,共晶组织的片层间距越小。

4 分析与讨论

1) 宽带激光熔覆结合界面为垂直界面生长的平行枝晶(见图 2(a), (c));而窄带熔覆则可见几个方向生长(图 2(b), (d))。其主要原因为激光聚焦模式不同,前者为线形光斑(图 5(a)),光斑较长,单道熔覆宽度达 18 mm,激光输出的能量呈现面形高斯分布,熔覆层底部结合面约 15 mm 范围内通过基体均匀散热,故截面金相可见大面积垂直于界面、平行生长的枝晶。

窄带激光输出圆形光斑,呈现体形高斯分布(图 5(b)),光斑尺寸小,熔覆层宽度仅 4.5 mm。熔覆区宽度较小,除基体外,周围环境也将影响到熔覆层的散热,界面在很大的范围内存在不均匀散热,故呈现多方向、与界面成一定角度方向的结晶。横截面

取样,仅在界面中部很小的范围,由于受周围环境影响小,也可见到垂直于界面平行生长的枝晶;沿着熔覆层的中心纵截面截取试样,则与宽带熔覆界面相似。

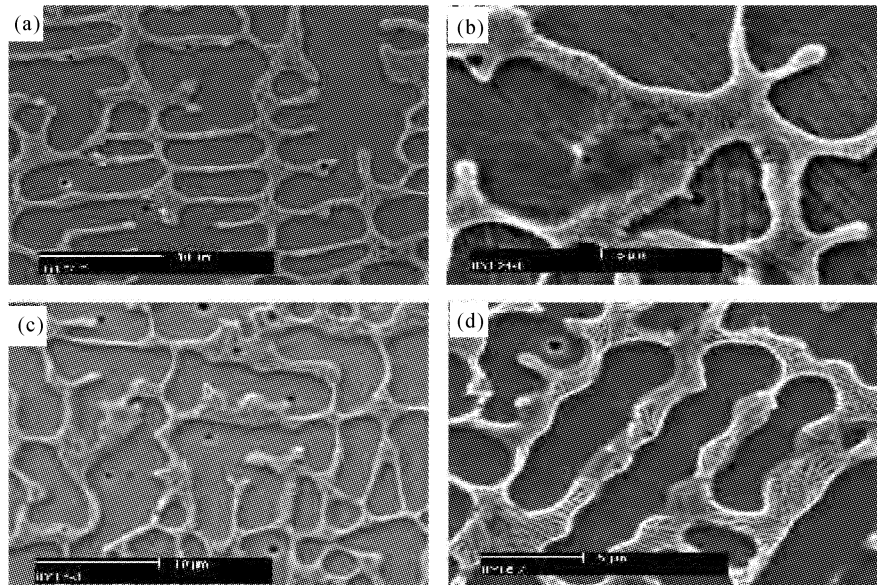


图 4 钴基合金粉末熔覆层 SEM 照片

(a),(b)分别为 Ni 合金/45# 钢的宽带熔覆层组织;(c),(d)分别为 Ni 合金/45# 钢的窄带熔覆层组织

Fig. 4 SEM microstructure of the clad (cross section)

(a) and (b) microstructure of broad-band clad on Ni-based alloy/45# steel, respectively;

(c) and (d) microstructure of narrow-band clad on Ni-based alloy/45# steel, respectively

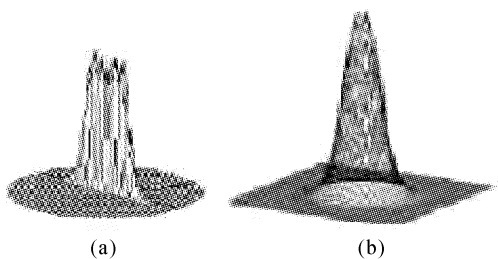


图 5 激光聚焦模式示意图

(a) 线形光斑;(b) 圆形光斑

Fig. 5 Mode of laser beam focused

(a) line shape; (b) circle shape

对于较大的工件表面,若采用窄带激光熔覆,需多道搭接,在光斑尺寸、送粉量及其他参数一定时,两道搭接之间的时间间隔、搭接率均将影响到熔覆层的均匀散热,从而影响到界面枝晶的结晶生长方向^[8]。

2) 45# 钢由于导热性能好,液态金属与大块冷基体金属接触而形成激冷,界面处温度梯度 G 很大,

结晶速度 V 很小, G/V 很大;在界面区,因熔池尺寸小和快速凝固的影响,固液界面前沿为正温度梯度,有利于界面稳定性趋向于平面结晶。由界面深入熔池,温度梯度 G 逐渐减小,结晶速度 V 加快,而出现胞状结晶,直至树枝晶。距离界面越远结晶速度越快,晶粒越细小^[9]。

对于镍基铸造合金,由于组织疏松、晶粒粗大及导热性能差,在界面处熔化的液体容易向组织粗松的基体内部渗透,甚至使基体内部的低熔点组织熔化,致使界面区很大、很宽,不能形成激冷,不具备平面结晶的形成条件,因此不出现“白亮带”。

3) 有关熔覆层近表面组织形貌说法较多,如等轴晶、准等轴晶^[10]及细小枝晶^[11]等,但以上解释均有一定的局限性。表面晶粒结晶形态与取样方法及取样位置有关,若横截面取样,一般均可见等轴或准等轴晶,如图 3(a);若纵截面取样,则可见平行于激光扫描方向生长的枝晶,见图 3(b)。

4) 搭接重熔区部分晶粒结晶方向继承前道熔覆层表面晶粒生长方向。前道熔覆层表面形成熔

池,其边缘晶粒处于半熔化状态,在随后的凝固过程中,那些半熔化的晶粒仍然以“外延式”向熔池中生长^[12]。

5 结 论

1) 熔覆层中的相组成为 γ -Co 及 Cr_{23}C_6 ; 熔覆层的组织为初生 γ -Co 枝晶及 γ -Co+ Cr_{23}C_6 层片状共晶。

2) 宽带熔覆界面处结晶方向为垂直于界面、平行生长,而窄带熔覆界面为多方向结晶,大多不与界面垂直。

3) 45# 钢表面熔覆界面为很规则的、无特征结构的过渡层,而且宽带熔覆比窄带熔覆宽,而 Ni 基铸造合金熔覆层界面过渡区很宽,而且参差不齐。

4) 熔覆层近表面横截面取样,可见细小的枝晶、等轴晶或准等轴晶;中心线处纵截面取样则为平行于激光扫描速度方向生长的细小枝晶。

参 考 文 献

- Navas Gladys, Vilorio Laura. Analysis of rotor-blade failure due to high-temperature corrosion/erosion [J]. *Surface and Coatings Technology*, 1999, **120**(2):145~150
- Song Ren-guo, He Wang-zhao, Huang Wei-dong *et al.*. Effects of laser surface remelting on microstructure and hydrogen permeation resistance of thermal spraying aluminum coatings [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报), 2000, **10**(2):179~184 (in Chinese)
- Luo Jiang-tao, Guo Hong, Liang Er-jun *et al.*. Wide-band laser cladding of Ni-based alloy [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(10):957~959 (in Chinese)
- Lim L. C., Qing Ming, Chen Z. D.. Microstructures of laser-clad nickel-based hardfacing alloys [J]. *Surface and Coatings Technology*, 1998, **106**:183~192
- C. T. Kwok, F. T. Cheng, H. C. Man. Laser surface modification of UNS S31603 stainless steel. Part II: cavitation erosion characteristics [J]. *Materials Science and Engineering*, 2000, **A290**:74~88
- Zhang Chun-liang, Chen Zi-chen. Study on microstructure and high temperature wear resistance of laser clad nuclear valve clack [J]. *Atomic Energy Science and Technology* (原子能科学技术), 2002, **36**(1):10~14 (in Chinese)
- Zhang Song, Zhang Chun-hua, Man Hau-chung *et al.*. Wear resistance and hot corrosion behavior of laser cladding Co-based alloy [J]. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2001, **11**(6):838~842
- Feng Li-ping, Huang Wei-dong, Li Yan-min *et al.*. Influences of crystal orientation of substrate on microstructures of multi-layer laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(10):949~952 (in Chinese)
- W. Kurz, D. J. Fisher. *Fundamentals of Solidification* [M]. 3rd revised edition. Netherlands: Trans. Tech. Publication Ltd, 1989
- Ana Sofia C. M. D. Oliveira, Paulo Sérgio C. P. da Silva, Rui M. C. Vilar. Microstructural features of consecutive layers of stellite 6 deposited by laser cladding [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2002, **153**:203~209
- A. Hidouci, J. M. Pelletier, F. Ducoin *et al.*. Microstructural and mechanical characteristics of laser coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2000, **123**:17~23
- Wu Xiao-lei, Hong You-shi. Microstructural evolution of laser clad coating [J]. *Scripta Mater.*, 2000, **43**:123~127