

# 45# 钢的 NiCrBSi 激光涂复

徐春

(上海冶金高等专科学校, 上海 200233)

罗源英 邹至荣

(重庆大学, 重庆 630044)

**提要** 应用 2 kW-CO<sub>2</sub> 激光器在 45# 钢板上进行 NiCrBSi 合金的激光涂复处理。使用透射电镜和 X 射线衍射进行分析的结果表明整个激光区的相组成是相同的, 而在熔化区与基体交界的过渡层的相组成则与熔化区的有所不同。

**关键词** 激光涂复, Ni 基合金

## 1 试验条件

选用市售 Ni-02 合金粉末作喷涂材料, 其化学成分见表 1, 基体材料为 45# 钢板, 试样尺寸为 70×70×5 (mm), 用氧乙炔火焰喷枪将粉末均匀地喷涂到试样上, 厚度约为 0.5 mm。

表 1 Ni-02 合金粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of Ni-alloy powders

chemical composition	Fe	Cr	B	Si	C	Ni
wt-%	1.5	16	3.5	4.5	0.8	balance

用 2 kW 连续可调横流式激光器进行熔敷处理, 光束直径为 2 mm, 激光功率为 1 kW, 光束移动速度为 2 mm/s, 在空气中进行。

## 2 激光涂复区域的显微结构

### 2.1 激光涂复区的组织形貌

图 1 为激光涂复区的横断面形貌, 图 2 为其放大后的形貌, 由熔化区、熔化区与基体的交界过渡层和基体三部分构成, 熔化区内生成了细小的铸态树枝晶, 而过渡层则为一条白色光亮带组织, 基体的热影响区为淬火马氏体组织。

### 2.2 激光涂复区的元素分布

采用电子探针对激光熔化区进行线扫描分析, 见图 3。可以看出: Ni 基合金的激光涂复中, 其组成元素 Ni, Cr 在整个熔化区内的分布较为均匀, 而在过渡层附近迅速下降, 且几乎没有进入基材的热影响区, 故认为激光熔化区的组织成分均匀, 偏析较少。表 2 为电子探针测定的熔化区的化学成分。



图 1 激光涂复区的横断面形貌

Fig. 1 Cross-section of the laser cladding region

表 2 激光涂复的熔化区的化学成分

Table 2 Chemical composition of the fusing region of laser cladding

chemical composition	Fe	Cr	Si	Ni
wt-%	29.82	15.62	3.72	50.86

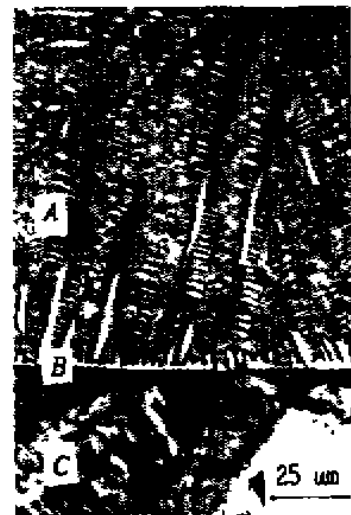


图 2 放大后的形貌图

(a) 熔化区, (b) 过渡层, (c) 基体的热影响区

Fig. 2 Amplified cross-section of the laser cladding region

(A) the fusing region, (B) the transition layer, (C) the heat affected zone of the substrate

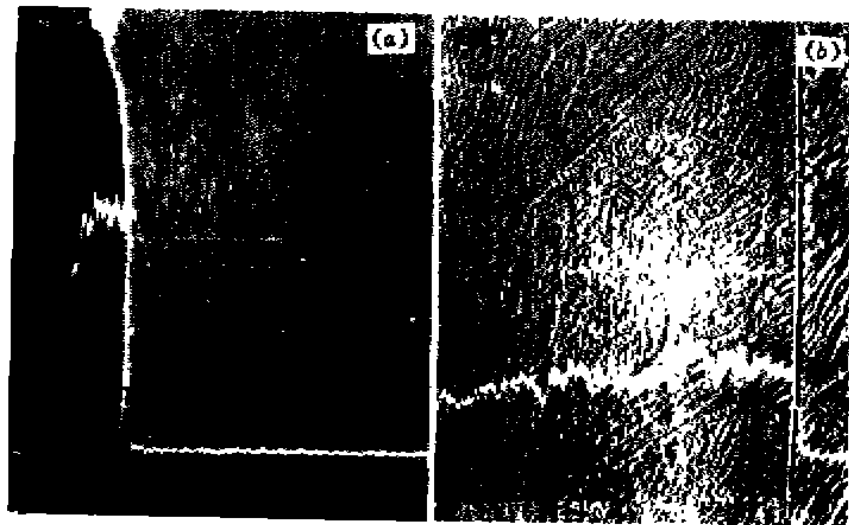


图 3 激光涂复熔化区的扫描电镜形貌

(a) Ni 的成分线分布; (b) Cr 的成分线分布

Fig. 3 SEM micrographs of the laser cladding layer of Ni-alloy

(a) line composition distribution of Ni; (b) line composition distribution of Cr

与表 1 相比, 熔化区的铁含量由原来的 Ni 基合金中的 15 wt-% 上升到 29.82 wt-%, 而 Ni, Cr, Si 的含量有所下降, 即是说基体中的铁扩散到了熔化区内, 引起了熔化区其它元素的重量的下降, 即“稀释”了 Ni 基合金粉末的涂层<sup>[1]</sup>。

### 2.3 激光涂复区的相分布

为了分析整个激光熔化区域相组成的变化, 采用 X 射线衍射图谱对激光熔化区沿熔化厚度方向上逐层进行分析, 共在 0.5 mm 涂层的厚度上进行了八次 X 射线的衍射分析, 其衍射

的位置分别为沿涂层向基体方向的厚度坐标为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.45, 0.47, 0.49, 0.5 (mm)等八个距离位置。衍射结果是前六次的 X 射线衍射图谱吻合得很好。如图 4(a) 为前六次的 X 射线衍射图谱。经鉴定分析,其主要相为  $\gamma$ -Ni, Ni<sub>3</sub>B, (NiFe)<sub>3</sub>BC, CrB 和  $\alpha$ -Fe。根据前六次的 X 射线衍射图谱吻合得很好的这个特点,利用 X 射线衍射强度理论<sup>[2]</sup>来分析,可以定性地说明:在 0.47 mm 厚度范围内,熔化区的相结构组成与数量基本上相同,在 0.49 mm 厚度处的位置上进行第七次 X 射线的衍射,这时其能谱线开始变化,出现了新峰值,如图 4(b),经

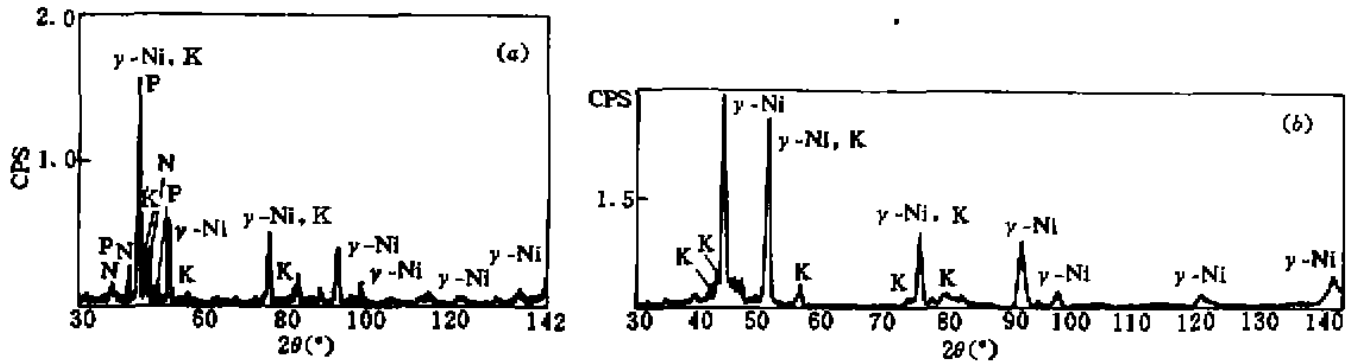


图 4 (a) 前六次的 X 射线衍射图谱; (b) 第七次的 X 射线衍射图谱

Fig. 4 (a) X-ray diffraction spectrum of the first six measurements (K; CrB; P: (NiFe)<sub>3</sub>BC; N: Ni<sub>3</sub>B)  
(b) X-ray diffraction spectrum of the 7th measurement (K; CrB)

鉴定分析,其主要相为  $\gamma$ -Ni, CrB 和  $\alpha$ -Fe,从 0.49 mm 的这个厚度位置处来看,它显然介于熔化区与基体交界的过渡层附近,峰值强度的变化可以定性地说明在整个激光熔化区上,  $\gamma$ -Ni 的数量基本相同,靠近过渡层时开始减少,故从衍射最强相降为次强相;而  $\alpha$ -Fe 的情况则正好相反,其在熔化区内的数量很少,而靠近过渡层附近,数量急剧增多,并逐渐替代为衍射峰值最强的相。另外, Ni<sub>3</sub>B 和 (NiFe)<sub>3</sub>BC 存在于熔化区内,靠近过渡层开始急剧减小并消失。这个结果同前面的化学成分的分析相呼应。由于靠近过渡层的 Ni, Cr 元素的含量的急剧下降,使得其金属化合物数量减少或消失,而金属化合物数量的减少势必会影响其硬度,从而使过渡层的硬度降低。图 5 为  $\gamma$ -Ni, Ni<sub>3</sub>B 和 (NiFe)<sub>3</sub>BC 在熔化区的变化示意图。

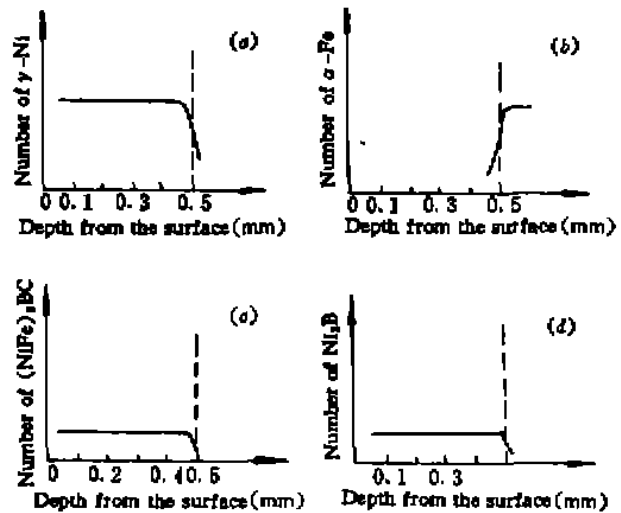


图 5 相变化分布示意图,在激光涂复区  $\gamma$ -Ni, Ni<sub>3</sub>B 和 (NiFe)<sub>3</sub>BC 含量随深度的变化

Fig. 5 The curves show the variation of quantities of  $\gamma$ -Ni, Ni<sub>3</sub>B and (NiFe)<sub>3</sub>BC with depth from the surface in the laser cladding region

从透射电镜下观察熔化区的组织形貌,发现其存在大量的黑色条状组织和一些块状组织(图 6)。在这些黑色条状组织内经能谱测定含 Cr 量高达 20.928 wt-%,含 Ni 量则为 12.153 wt-%,远低于整个熔化区内的 Ni 的平均含量的 50.56 wt-%,而在黑色条状组织外则含 Cr 量

仅为 3.530 wt-%, 图 7 为黑色条状组织的衍射花样, 经标定表明为  $\gamma$ -Ni 和  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ 。图 8 为黑色条状组织放大倍数视场下的组织形貌, 发现在这些黑色条状组织内存在着大量的层错现象, 而层错现象的出现对提高材料的强度是极为有益的<sup>[3,4]</sup>。图 9 为熔化区内块状组织的电子衍射花样, 经标定为  $\text{CrB}$ ,  $\text{Ni}_3\text{B}$  和  $(\text{NiFe})_3\text{BC}$ 。



图 6 激光涂复熔区透射电镜形貌  
Fig. 6 TEM image of the laser cladding fusing region

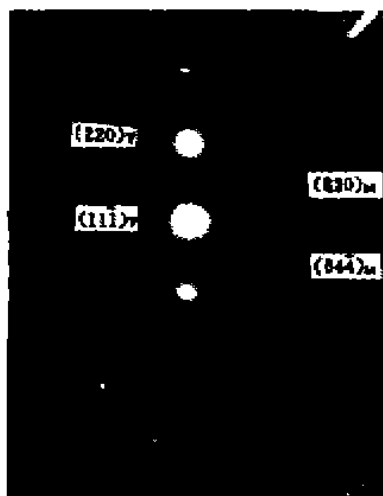


图 7 黑色条状组织衍射花样  
Fig. 7 Black stripe area diffraction pattern ( $\gamma$ :  $\gamma$ -Ni; M:  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ )



图 8 黑色条状组织的透射电镜下的组织形貌  
Fig. 8 TEM image of the black strip

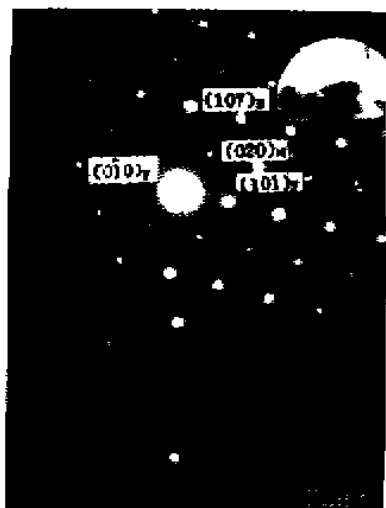


图 9 块状组织的衍射花样  
Fig. 9 Block area diffraction pattern  
(N:  $\text{Ni}_3\text{B}$ ; F:  $(\text{NiFe})_3\text{BC}$ ; K:  $\text{CrB}$ )



图 10 激光涂复过渡层的明场像  
Fig. 10 Bright field of the laser cladding transition layer

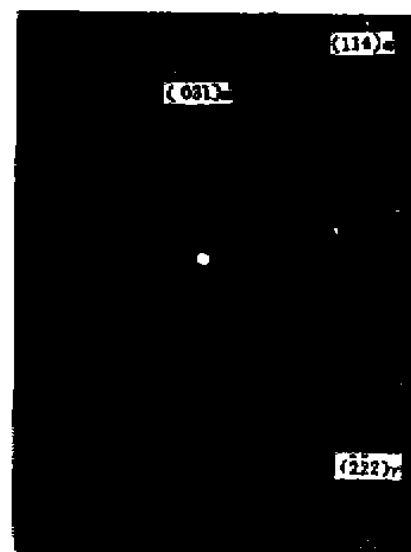


图 11 过渡层的衍射花样  
Fig. 11 The transition layer diffraction pattern ( $\gamma$ :  $\gamma$ -Ni;  $\alpha$ :  $\alpha$ -Fe)

透射电镜与 X 射线衍射的结果证明了激光熔化区是以含硅的镍基奥氏体与  $\text{CrB}$  形成共晶体, 上面弥散分布了具有复合结构的  $\text{Fe}_3\text{C}$  型的合金渗碳体  $(\text{NiFe})_3\text{BC}$ , 间隙化合物  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  以及金属化合物  $\text{Ni}_3\text{B}$  等硬质相, 由于这些硬质相的本身硬度可高达  $\text{Hv}950\sim 1050$ , 故它们的存在会提高涂层的硬度和抗磨蚀的性能。

图 10 为过渡层明场像, 图 11 为其电子衍射花样, 经标定为  $\alpha$ -Fe 和  $\gamma$ -Ni, 透射电镜与 X 射线衍射的结果表明熔化区与基体交界的过渡层的相组成为  $\alpha$ -Fe 和  $\gamma$ -Ni 共存,  $\text{CrB}$  弥散分布

在这两者之中。同熔化区相比,少了  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  和  $(\text{NiFe})_3\text{BC}$  等硬质相,因此其硬度会相应地下降。

### 3 激光涂复区的显微硬度分布

图 12 为经激光熔敷处理后的涂层表面到基体方向的显微硬度分布。其硬度分布呈三阶梯形式变化,最高为激光涂层的显微硬度,中间为激光热影响区,最低一层为基材组织。由于熔化区内存在大量的间隙化合物  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  和合金渗碳体  $(\text{NiFe})_3\text{BC}$  等硬质相,同时还存在大量的层错,故对提高激光熔化区的硬度有很大的帮助。随着 Cr 和 B 的浓度降低,过渡层内  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  和  $(\text{NiFe})_3\text{BC}$  等硬质相的消失,其硬度也会逐渐下降。

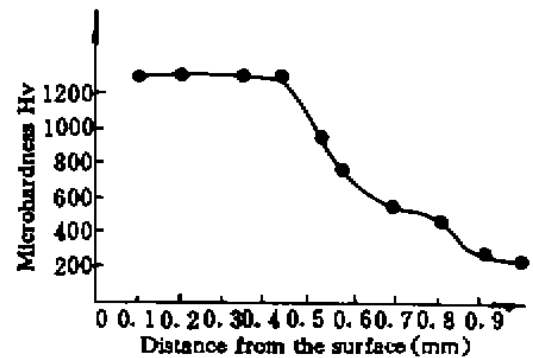


图 12 Ni-02 合金激光涂复区的显微硬度分布  
Fig. 12 Distribution of microhardness in the Ni-alloy coating

### 4 结 论

- 4.1 根据上述化学成分分布、相分布以及涂复区的硬度分布等特点可以说明经激光熔敷处理后,涂层与基体形成了良好的冶金结合。
- 4.2 根据 X 射线对涂层逐次衍射的结果鉴定分析,定性地证实了在整个激光熔化区内的相组成和数量基本相同;过渡层的相组成与熔化区的相组成有所不同。
- 4.3 根据透射电镜的分析结果证明,熔化区内存在大量的黑色条状组织,并有层错现象。
- 4.4 由于熔化区内存在合金渗碳体等硬质相和层错现象,故使得熔化区内的硬度高达 Hv1200 以上。

### 参 考 文 献

- 1 苏宝娣,黄德群. 20 号钢表面激光熔敷层的电子显微分析. 中国激光,1987,14(7): 431~435
- 2 吴远新,王昆林. 不锈钢表面镀铬激光熔敷组织与耐磨性能的研究. 中国激光,1994,A21(7): 603~608
- 3 阎毓禾,钟敏森. 高功率激光加工及应用,天津:天津科学技术出版社,1994,148~152
- 4 杨洗陈,阎毓禾,汪行恺等. FeCrBSi 合金的激光熔敷. 中国激光,1987,14(9): 548~552

## Laser Cladding of NiCrBSi Alloy on the 45 Steel

Xu Chun

(Shanghai Technical College of Metallurgy, Shanghai 200233)

Lou Yuanying Zou Ziyong

(Chongqing University, Chongqing 630044)

**Abstract** Laser cladding of NiCrBSi alloy coating on the 45 steel has been performed with a 2 kW  $\text{CO}_2$  laser. The result shows that with TEM and X-ray diffraction the phases are similar in the whole fusing region of the laser cladding. But in the transition layer the phases are different from those of the fusing region.

**Key words** laser cladding, Ni-base alloy.