

$$g(x, y) = c \cdot \cos 2\pi f_0 y \quad (4)$$

在  $P_2$  平面上得到物体的频谱

$$G(x, y) = \mathcal{F}[g(x, y)] \quad (5)$$

与复合光栅振幅分布的乘积

$$U(x_2, y_2) = G(x_2, y_2) \cdot t(x_2, y_2) \quad (6)$$

当复合光栅的莫尔暗条纹与光轴重合时<sup>[1]</sup>, 在  $P_3$  平面上得到微分结果。一级衍射处得到的一阶微分的强度为:

$$I_1 = c \left\{ \cos 2\pi f_0 y \otimes \left[ T_1 \delta \left( x + \varepsilon \lambda f, y + \frac{\Delta \eta}{2} \lambda f \right) - T_1 \delta \left( x + \varepsilon \lambda f, y - \frac{\Delta \eta}{2} \lambda f \right) \right] \right\}^2 \\ = c' \delta(x + \varepsilon \lambda f) \cdot \sin^2(\pi \Delta \eta \lambda f \cdot f_0) \sin^2 2\pi f_0 y \quad (7)$$

在复合光栅二级衍射处得到的二阶微分强度分布为

$$I_2 = c_2 \left\{ \cos 2\pi f_0 y \otimes \left[ T_2 \delta(x + 2\varepsilon \lambda f, y + \Delta \eta \lambda f) + T_2 \delta(x + 2\varepsilon \lambda f, y - \Delta \eta \lambda f) - T_{12} \delta(x + 2\varepsilon \lambda f, y) \right] \right\}^2 \\ = c_2' [\sin^2(\pi \Delta \eta \lambda f \cdot f_0) \cdot \cos 2\pi f_0 y]^2 \cdot \delta(x + 2\varepsilon \lambda f) \quad (8)$$

由式(7)、(8)式可知, 余弦函数的一阶光学微分是正弦函数, 其光强分布与原物相比衬度发生反转。

余弦函数的二阶光学微分是一余弦函数分布, 其光强分布与一阶微分衬度反转, 这一点已从图3所示的实验结果看出。

同时, 一阶和二阶微分像的亮度均与因子  $\sin(\pi \cdot \Delta \eta \lambda f \cdot f_0)$  有关, 当  $\Delta \eta \lambda f$  一定时, 微分像的亮度随物体空间频率  $f_0$  的不同而不同。只有当余弦物体的周期等于  $2\Delta \eta \lambda f$  时, 才能得到最亮的微分像。

用差分法进行光学微分, 其本质是两束位相差  $\pi$  的光的干涉, 其中  $\Delta \eta \lambda f$  是剪切量, 对于一般光分布都可以分解为若干余弦型光复振幅分布的线性组合。当微分处理系统  $\Delta \eta \lambda f$  给定时对物体不同空间频率余弦分量微分, 其微分像亮度由因子  $\sin(\pi \Delta \eta \lambda f \cdot f_0)$  决定, 当  $f_0$  接近零或等于零时, 微分像最暗, 而当  $\Delta \eta \lambda f = \frac{1}{2f_0}$  时微分像最亮。这一点说明光学微分过程类似于高通滤波。

## 参 考 文 献

- [1] 冯郁芬;《中国激光》, 1984, 11. No. 3, 131.

(收稿日期: 1986年5月23日)

## 钢和铸铁的激光表面合金化研究

郑启光 杨 扬 李再光

(华中工学院激光研究所)

曹书云

(华中工学院微观分析教研室)

## Study on laser surface alloying of steel and cast iron

Zheng Qiguang, Yang Yang, Li Zaiguang

(Laser Institute, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan)

Cao Shuyun

(Microanalysis Teaching and Research Section, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan)

**Abstract:** Alloying of the sample surface of 45# steel and high phosphorus cast iron with a high-power CW CO<sub>2</sub> laser have been studied. Our analysis shows that a uniformly dendritic structure is exhibited for the sample surfaces of 45 steel and a finer ledeburite microstructure for high phosphorus cast iron. The sample surfaces have a higher nickel content after laser alloying.

### 1. 试验条件及方法

试样材料为 45# 钢和高磷铸铁。高磷铸铁试样按空化腐蚀试验要求做成如图 1 所示的特殊试样。在试样表面采用火焰、等离子喷涂或手工涂层等方法喷涂一层厚为 0.1~0.2mm 厚的 Ni 基合金粉末, 粉末成分见表 1。

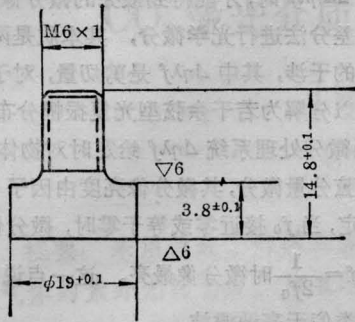


图 1

表 1

Ni 基粉末	Cr (%)	C (%)	Mn (%)	Fe (%)	Si (%)	Co (%)	Ni (%)
Ni 基 (a)	15	0.1		7.0	4		余量
Ni 基 (b)	16	0.4	—	<14	3.5	10	余量

实验是在 5 kW CO<sub>2</sub> 激光试验机上进行的, 试验时只用到 3800 W° 激光束用 80 mm 焦距的透镜聚焦, 聚焦光斑为 1.5~2.2 mm 左右。实验时通过聚焦头上的喷嘴对试件吹惰性保护气体(N<sub>2</sub>)。

用金相显微镜和扫描电镜观察了显微组织, 并用 EDAX-9100 能谱仪作了合金元素成份及含量的分析。

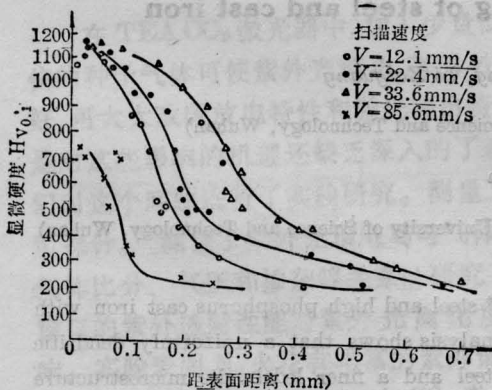


图 2 45# 钢激光表面合金化的显微硬度分布  
功率密度  $F$  均为  $\sim 6 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ , 涂层厚度  $< 0.1 \text{ mm}$

### 2. 45# 钢

图 2 示出了 45# 钢激光表面合金化的显微硬度分布。从图中看到, 在给定涂层厚度和相同的功率密度(能使材料表面的合金元素熔化的功率密度)时, 扫描速度快的, 表面熔化区硬度值高。从图中还看到, 对于一定的合金粉末涂层厚度(0.1mm 左右)和相同的激光功率密度, 扫描速度偏慢( $< 40 \text{ mm/s}$ )时所得到的熔化区硬度值比扫描速度偏快( $> 80 \text{ mm/s}$ )的要高。我们认为这是因为熔化合金区的硬度值除取决于凝固速率外, 合金元素的渗入也有很大影响。

从图中还看到, 在某一功率密度下, 扫描速度慢, 熔化合金区和相变区变宽、变深, 扫描速度快, 熔化合金区和相变区窄, 且相变区的硬度梯度大。

涂层合金粉末的厚度对激光合金化的表面硬度值也有影响, 实验发现涂层厚度厚的( $> 0.2 \text{ mm}$ )熔化合金区的显微硬度值稍低于涂层薄( $< 0.10 \text{ mm}$ )的硬度。这可能是由于在同一功率密度和扫描速度时, 涂层厚的激光熔化区容易产生合金元素的富集与偏聚, 不能充分溶解到基体中去的缘故。

对于一定的涂层厚度和功率密度, 如果继续提高激光扫描速度, 会达到一个临界值, 超过这个临界扫描速度, 只能熔化表面的涂层粉末, 而不能熔化基体, 即不能实现激光合金, 而已类似激光涂覆了。

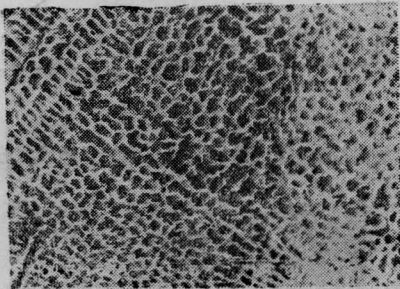
在我们的实验条件下, 较合适的涂层厚度是 0.1~0.15 mm。在此涂层厚度下, 当采用  $\sim 6 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$  的功率密度时, 所得到的合适扫描速度大致在 8~35 mm/s 范围。当采用 23.4 mm/s 的固定扫描速度时, 合适的功率密度在  $3 \sim 8 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$  范围。

图 3~4 示出了激光表面合金化试样的横截面的金相显微照片。从图 3 中看到, 激光熔化合金区的组织具有枝晶网(胞)状组织结构, 而且越靠近热影响区, 越具有明显的网状特性, 且网状逐渐变大(见图 3(b)、(c))。这是由于接近液-固界面凝固速度小, 随着向熔化表面的推移, 凝固速度  $R$  逐渐增大的缘故。在激光熔化合金区的小片状碳化物在胞状组织的枝晶区内是以不规则方式沿枝晶组织的弯曲路线分布的(见图 3(d))。显微硬度测量表明, 高功率密度、高扫描速度可得到更细的枝晶组织, 并对应着高的显微硬度值。

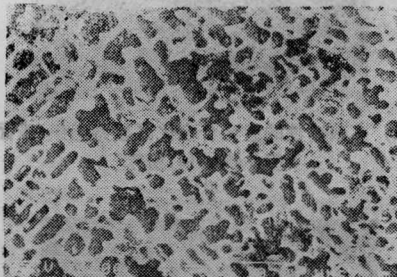
从图 4 看到, 在相变淬火区, 由于快速加热和冷却, 得到晶粒细的马氏体组织, 形状呈板条状(见图(b))。在此区有较高的硬度值。但在相变区接近熔



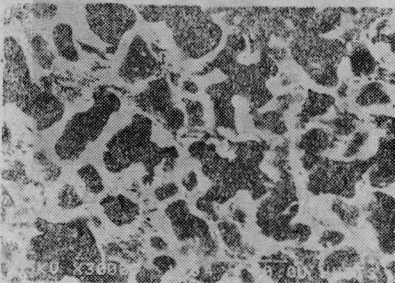
(a) 激光合金区表面(1500×)



(b) 激光熔化合合金区(靠界面,1500×)



(c) 激光熔化合合金区(靠热影响区,1000×)



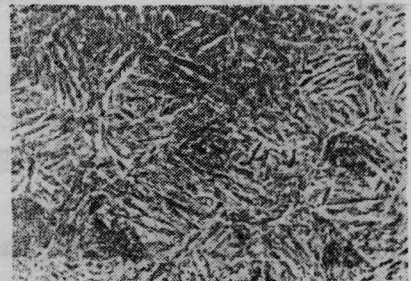
(d) 激光熔化合合金区高倍显微照片(靠热影响区,3000×)

图3 45# 钢激光表面合金化区放大显微照片(试样表面喷涂 Ni 基(b)合金粉末)

化区(液-固界面处)出现一条窄的晶粒粗大的软带区(见图4(a)L区)。此外在相变过渡区(靠近基体)也会出现硬度值下降的软带,当功率密度高、扫描速度低时此区更为明显。在该区的显微硬度为HV300以下。这是因为激光加热温度未达到奥氏体化温度

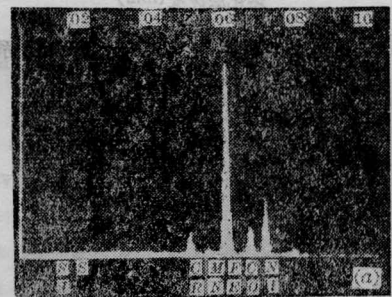


(a) 45# 钢激光合金化的热影响区(H区为淬火区, L区为软带, M区靠近熔化区,500×)

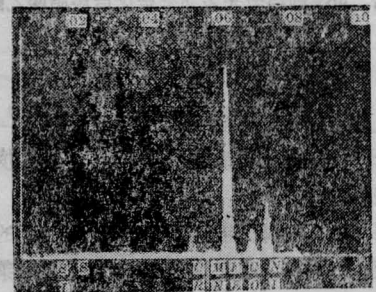


(b) 热影响淬火区的淬火马氏体组织(1500×)

图 4



(a) 距表面 0.08 mm。量子速率:692CPS;分析时间:100s;00~20keV;10eV/CH;预置活时间:100s;FS=200



(b) 距表面 0.15 mm。量子速率:243CPS;分析时间:100s;00~20 keV;10eV/CH;预置活时间:100s;FS=200

图5 45# 钢激光熔化合合金区的合金元素能谱图

所致。

用 EDAX-9100 型能谱仪测量了激光合金区的元素分布(见图 5)。

图 6 示出激光熔合金区的深度与激光功率密度、扫描速度的关系曲线。从图中看到,激光功率密度越大,扫描速度越慢,则熔合金区越深,相应地合金元素含量较低。激光功率密度小,扫描速度快时,熔合金区深度变浅,合金元素含量提高。

图 7 示出浸泡在硝酸乙醇中的试样的横截面金相照片。从图中可看到,在激光扫描带中的材料表面出现一未腐蚀的白亮层。

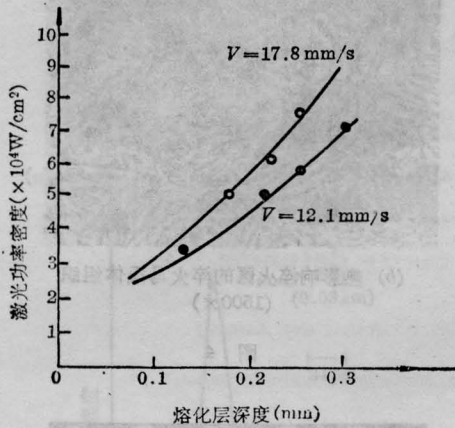


图 6 熔化深度与功率密度、扫描速度的关系

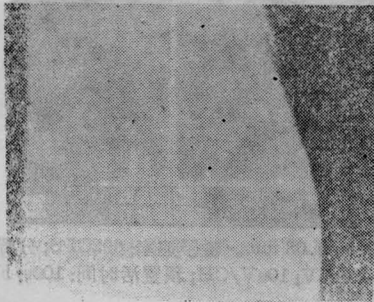


图 7 45# 钢经激光表面合金化后经硝酸乙醇浸蚀后的金相照片  
(表面喷涂 Ni 基金属粉末)

### 3. 高磷铸铁

图 8 示出高磷铸铁试样激光合金化区横截面的显微硬度分布。

图 9 示出高磷铸铁的激光熔合金区的显微组织。从图 9 中看到激光熔合金区呈现出莱氏体共晶结构。在激光熔化热影响区得到了淬火马氏体,并看到有未溶解的石墨的残痕。

对高磷铸铁激光表面合金化试样作能谱分析,

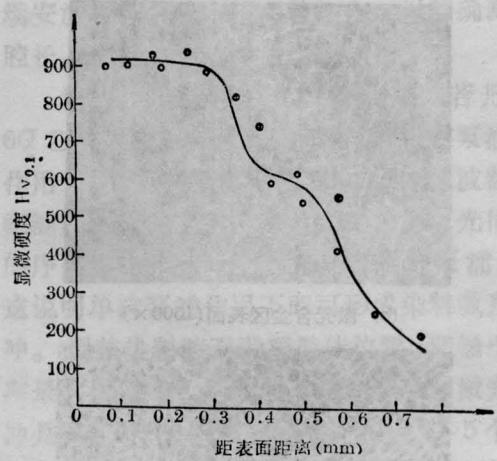
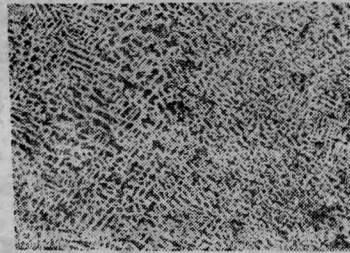
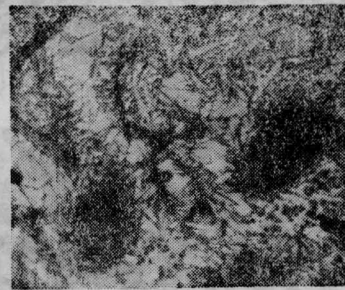


图 8 高磷铸铁的激光合金化区的显微硬度分布



(a) 高磷铸铁的激光合金化区显微组织(表面喷涂镍基(a)粉末  
500×



(b) 激光合金化热影响区  
(400×)

图 9

得到的能谱图如图 10 所示。

将激光合金化后的高磷铸铁进行抗空化腐蚀试验(磁致伸缩振动试验)。将试样浸入自来水中,水温  $85 \pm 1^\circ\text{C}$ , 超声频率为  $19 \sim 20 \text{ kHz}$ , 电流为  $280 \sim 290 \text{ mA}$ 。表 2 列出几种不同试样的空化腐蚀数据。

图 11 示出激光合金化试样和未经激光处理的试样经空化腐蚀后的横截面照片。从图 11 中看到,未经激光处理的试样表面空化腐蚀严重,而经激光

表 2

激光合金化试样	激光功率 (W)	扫描速度 (mm/s)	空化腐蚀失重 (mg)	备注
1#	2500	13.7	47.10	火焰喷涂
2#	3000	17.8	37.9	等离子喷涂
3#	3000	17.8	33.8	火焰喷涂
4#	3000	13.7	33.4	等离子喷涂
5#	2800	8.2	41.6	火焰喷涂
激光相变硬化试样			45.8	五个试样取平均
未经激光处理试样			108	三个试样取平均

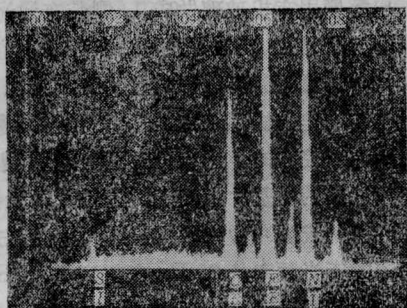
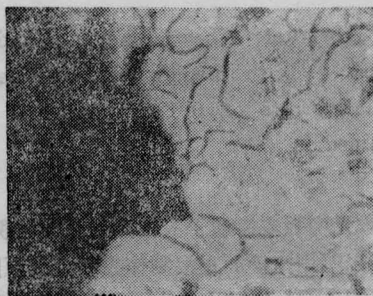


图 10 高磷铸铁激光合金区元素的能谱图  
量子速率: 1463 CPS; 分析时间: 100 s; 00~20 keV;  
10 eV/CH; 预置活时间: 100 s; FS=926

合金化的试样的空化失重比未处理试样大约小三倍。可见高磷铸铁经激光合金化后, 由于表面组织的改变和 Ni 等耐蚀元素的加入, 故具有较好的抗空化腐蚀性能。

空化腐蚀试验结果还表明, 在同一激光功率密度下, 较快的扫描速度的抗空蚀能力比慢扫描速强。

大量的空化腐蚀试验还表明, 抗空化腐蚀性除与材质有关外, 还与硬度有关, 材料表面的硬度越



(a) 未经激光处理试样(400×)



(b) 经激光合金化后的试样(400×)

图 11 高磷铸铁试样经空化腐蚀后的横截面照片

高, 抗空化效果越好。

无论是 45# 钢或是高磷铸铁的激光表面合金化, 均发现激光合金化区元素的含量与预先喷涂在试样表面的元素含量不大一致。产生这一现象的主要原因可能是: (1) 预先在材料表面喷涂的合金混合粉末不大均匀(个别甚至有杂质), 特别是手工涂层尤为如此; (2) 在激光熔化过程产生一定的飞溅, 这可能导致某些元素的损失。

在实验中, 我们还发现采用二次或多次重叠扫描(一般是先慢后快), 可增加激光合金区的厚度。

(1986年2月3日收稿)

## 激光增强电镀铜

袁加勇 李士杰 王静环 王茂鑫 秦亮 陈琪

(浙江大学光仪系)

### Laser enhanced copper plating

Yuan Jiayong, Li Shijie, Wang Jinghuan, Wang Maoxin, Qin Liang, Chen Qi

(Optical Engineering Department, Zhejiang University, Hangzhou)