

文章编号: 0258-7025(2003)12-1124-05

# 聚焦光束合金化工艺对合金化层成型及 显微组织的影响

丁建春, 单际国, 任家烈

(清华大学机械工程系, 北京 100084)

**摘要** 采用 Cr, Ni 单质粉末及 B, Si 造渣剂以聚焦光束合金化方法在 45# 钢表面合成了奥氏体型表面层。借助扫描电镜(SEM), 能谱仪(EDS), X 射线等方法研究了合金化工艺对合金化层的成型、显微组织及物相组成的影响规律。试验结果表明, 当合金化元素加入量一定时, 合金化层的成型及其显微组织不仅取决于热输入量, 还与造渣元素 B, Si 的加入量有关。为获得成型良好的合金化层, 热输入量增加时必须提高造渣元素 B, Si 的加入量。采用低热输入合成的合金化层的显微组织由大量的  $\gamma(\text{Fe}, \text{Ni})$  及少量的晶界  $\alpha(\text{Fe}-\text{Cr})$  构成, 而高热输入合成的合金化层中的  $\gamma(\text{Fe}, \text{Ni})$  晶界为  $\gamma(\text{Fe}, \text{Ni}) + \text{Cr}_2\text{B}$  双相共晶。

**关键词** 激光技术; 光束合金化; 热输入; 造渣剂; 微观组织

**中图分类号** TG 174.445; TN 249 **文献标识码** A

## Influence of Process Parameters on Appearance and Microstructure of Light Beam Alloying Coating

DING Jian-chun, SHAN Ji-guo, REN Jia-lie

(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** Austenite type surface coating was produced using pure Cr and Ni powders and slagging elements B and Si on 45# steel with light beam alloying. The effect of alloying process on appearance, microstructure and phase of alloying coating was investigated by SEM, EDS, X-ray diffraction, etc. The results show that appearance and microstructure of alloying coating are not only determined by heat input, but also relevant to dosage of slagging elements B and Si when dosage of alloying elements is invariable. Dosage of slagging elements B and Si has to be increased for good appearance of alloying coating while heat input is increased. Microstructure of alloying coating produced by low heat input is composed of the great mass of  $\gamma(\text{Fe}, \text{Ni})$  and a small quantity of  $\alpha(\text{Fe}-\text{Cr})$  at  $\gamma(\text{Fe}, \text{Ni})$  boundary while there is  $\gamma(\text{Fe}, \text{Ni}) + \text{Cr}_2\text{B}$  eutectic at  $\gamma(\text{Fe}, \text{Ni})$  boundary of alloying coating produced by high heat input.

**Key words** laser technique; light beam surface alloying; heat input; slagging elements; microstructure

## 1 引 言

利用表面合金化方法可在一些价格便宜、表面性能不够优越的基体材料上获得耐磨、耐蚀、耐高温的表面层<sup>[1~3]</sup>, 用以取代昂贵的整体合金, 节约贵重金属材料 and 战略材料, 使廉价材料获得更广泛的应用, 从而大幅度降低成本。聚焦光束合金化技术是

光束表面改性技术的一种。光束加热的显著特点是金属材料对它的吸收率高(平均波长  $1.0 \mu\text{m}$ ), 设备造价低。近年来本研究组对铸铁表面光束合金化工艺及其表面强化机制进行的探索性研究结果表明, 采用光束合金化技术在珠光体型铁碳合金表面生成奥氏体型表面层是完全可行的<sup>[4]</sup>。众多研究表明, 激光合金化层成型及显微组织与合金化工艺参数密

收稿日期: 2002-04-16; 收到修改稿日期: 2002-07-09

基金项目: 清华大学机械工程学院 985 基础研究基金(2201-12)资助项目。

作者简介: 丁建春(1977—), 男, 主要从事光束合金化技术研究。E-mail: shanjg@tsinghua.edu.cn

切相关<sup>[5,6]</sup>。本文采用光束合金化方法在 45# 钢表面合成了奥氏体型表面层,探讨了合金化工艺对合金化层的成型、显微组织和物相组成的影响规律,为光束合金化技术的工程应用提供实验基础。

## 2 试验设备及研究方法

基体材料为退火态 45# 钢,试样尺寸为 12.35 mm×12.35 mm×50 mm。合金化试验采用自行研制的聚焦光束加热装置,光斑直径为 5 mm,连续辐射的光束波长范围为 0.2~0.4 μm,光束能量呈高斯分布,有效功率为 2000 W,合金化过程中采用氩

气及 B,Si 粉末(质量比 1:1)造渣联合保护熔池。合金化材料为纯度 99.9%,粒度 200 目的 Cr 粉和 Ni 粉,采用粘结剂预涂在试样表面,预涂宽度为 5 mm,为获得奥氏体型表面层,经反复试验选择合金化粉末 Cr 和 Ni 的预涂量分别为 4 mg/mm 和 2 mg/mm。通过调节扫描速度实现对热输入的控制,试验规范见表 1。

用 JZX12 体视显微镜观察合金化层横截面形貌,在 JSM-6301F 场发射扫描电镜和能谱仪(EDS)上观察合金化层微观组织、测定合金化区及析出相的化学成分,并用 D/max-RB 型 X 射线衍射仪进行物相分析。

表 1 合金化试验规范及结果

Table 1 Alloying process parameters and experimental results

Effective power $P_E$ /W	Scanning speed $V$ /mm/s	Heat input $q$ /J/mm	Dosage of slagging elements B and Si $M$ /mg/mm	Appearance of alloying coating
2000	1.0	2000	0.5	good
2000	0.5	4000	0.5	bad
2000	0.5	4000	2.0	good

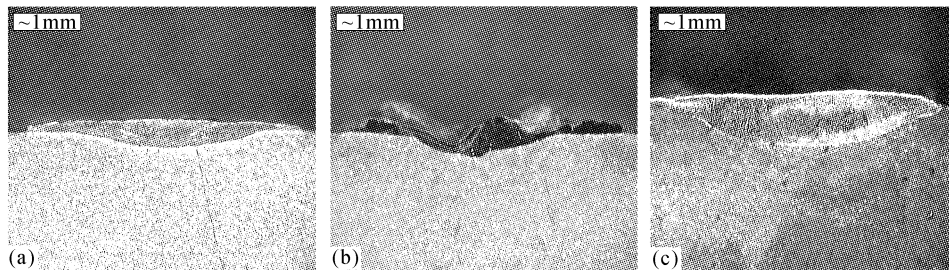


图 1 合金化层横断面形貌

Fig. 1 Cross-sectional appearances of alloying coating

(a)  $q = 2000$  J/mm,  $M = 0.5$  mg/mm; (b)  $q = 4000$  J/mm,  $M = 0.5$  mg/mm; (c)  $q = 4000$  J/mm,  $M = 2.0$  mg/mm

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 合金化工艺对合金化层成型和合金化程度的影响

采用不同的规范(表 1)进行合金化试验,结果表明,合金化层的成型不仅取决于热输入的大小,还与造渣元素 B,Si 的加入量有关。在低热输入( $q = 2000$  J/mm)情况下,采用适量的 B,Si 粉末进行联合造渣保护即能得到成型良好的合金化层(表 1,图 1(a))。但当 B,Si 造渣剂加入量不变而提高热输入( $q = 4000$  J/mm)时,合金化层成型恶化(表 1,图 1(b)),其原因在于 B,Si 造渣元素的烧损量随热输入的增加而增加,残余的 B,Si 造渣剂不足以对合金化

熔池进行可靠的保护,导致合金化元素严重烧损,液态合金对基材的润湿性也因 B,Si 元素的减少而下降。提高热输入时,若同时增加 B,Si 造渣剂的加入量,亦可获得成型良好的合金化层(表 1,图 1(c))。

在合金化层成型良好的前提下,热输入的增大将导致合金化层的形状参数(宽深比)发生显著的变化(图 1(a),图 1(c))。合金化层几何参数(表 2)测定结果表明,热输入增大时,合金化层的熔深明显提高,而熔宽没有明显增加的趋势,说明热输入对熔宽的影响很小,但对熔深的影响却很大。所以,当增加热输入时,参与合金化反应的溶剂量(即基材的熔化量)随之增大,在溶质量(即 Cr 粉和 Ni 粉的加入量)不变且不计溶质烧损的情况下,合金化程度将随之

降低。EDS 测定结果显示的合金化层的平均成分(表 3)表明,热输入提高一倍导致合金化程度降低了近 50%,B,Si 元素除了参与造渣反应外,残余部

分还参与了合金化反应(其中 B 为轻元素,无法用 EDS 法准确测定),这可能会对合金化层的微观组织和物相产生一定的影响。

表 2 合金化层几何参数

Table 2 Geometrical parameters of alloying coating

Heat input $q$ /J/mm	Width of penetration $b$ /mm	Depth of penetration $h$ /mm	Form factor of alloying coating $\eta = b/h$
2000	6.0	0.6	10.0
4000	6.7	1.0	6.7

表 3 合金化层的平均化学成分(wt.-%)

Table 3 Average chemical compositions of alloying coating (wt.-%)

Heat input $q$ /J/mm	Alloying elements					Alloying degree $\mu = [\text{CrNi}]/[\text{Fe}]$
	Fe	Cr	Ni	Si	C	
2000	66.58	22.71	9.90	0.75	0.06	0.49
4000	78.20	12.73	7.25	1.79	0.03	0.26

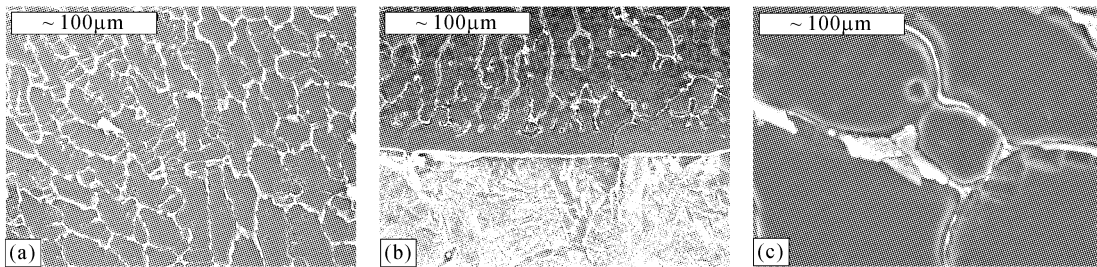


图 2 热输入为 2000 J/mm 的合金化层的显微组织形貌

(a) 合金层;(b) 过渡层;(c) 奥氏体晶界

Fig. 2 Microstructure of alloying coating,  $q = 2000$  J/mm

(a) alloying zone; (b) transition zone; (c) austenite boundary

### 3.2 合金化层微观组织及其形成机理

不同热输入条件下所合成的合金化层均由大量的枝晶及少量晶界析出相构成(图 2(a),图 3(a)),合金化层底部为平面晶,与母材半熔化区晶粒呈联生结晶方式生长(图 2(b),图 3(b)),随热输入的增加,枝晶析出量减少,晶界析出相含量增加,平面晶带的宽度增加。合金化区树枝晶晶界局部放大观察发现,晶界析出相由单相(图 2(c))变为双相共晶(图 3(c))。

合金化层 X 射线衍射结果(图 4(a),4(b))显示, $\gamma(\text{Fe},\text{Ni})$ 均占据主要峰位,说明两种热输入条件下获得的合金化层中的树枝晶均为  $\gamma(\text{Fe},\text{Ni})$ 。但在低热输入( $q = 2000$  J/mm)情况下,合金化层中的物相除  $\gamma(\text{Fe},\text{Ni})$ 外还有  $\alpha(\text{Fe}-\text{Cr})$ 析出(图 4(a)),结合析出相 EDS 分析结果(表 4)可知, $\alpha(\text{Fe}-$

Cr)相存在于晶界。而增大热输入( $q = 4000$  J/mm)后,合金化层中有  $\text{Cr}_2\text{B}$  相析出(图 4(b)),EDS 测试结果表明, $\text{Cr}_2\text{B}$  存在于晶界,结合图 3(c)中晶界析出相形态可知, $\text{Cr}_2\text{B}$  与  $\gamma(\text{Fe},\text{Ni})$ 以共晶形态在初生的  $\gamma(\text{Fe},\text{Ni})$ 晶间析出。

以上试验结果表明,由热输入及 B,Si 造渣元素加入量所决定的合金化层化学成分是合金化层显微组织和物相组成的决定因素。

在热输入较低( $q = 2000$  J/mm)的情况下,B,Si 元素由于加入量较少,大部分起造渣保护作用,合金化层中含量很低,因此,可以用 Fe-Cr-Ni 三元相图<sup>[7]</sup>推测合金化层析出相的形成机理,即从高温液相中析出单相的  $\alpha(\text{Fe}-\text{Cr}-\text{Ni})$ ,冷却至室温的过程中  $\alpha(\text{Fe}-\text{Cr}-\text{Ni})$ 绝大部分通过元素扩散转变为  $\gamma(\text{Fe},\text{Ni})$ ,剩余部分以  $\alpha(\text{Fe}-\text{Cr})$ 形式残留在  $\gamma(\text{Fe},$

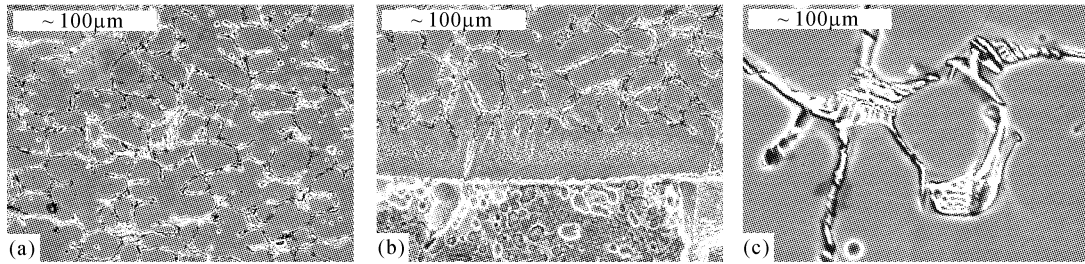


图 3 热输入为 4000 J/mm 的合金化层的显微组织形貌  
(a) 合金层; (b) 过渡层; (c) 奥氏体晶界

Fig. 3 Microstructure of alloying coating,  $q = 4000$  J/mm  
(a) alloying zone; (b) transition zone; (c) austenite boundary

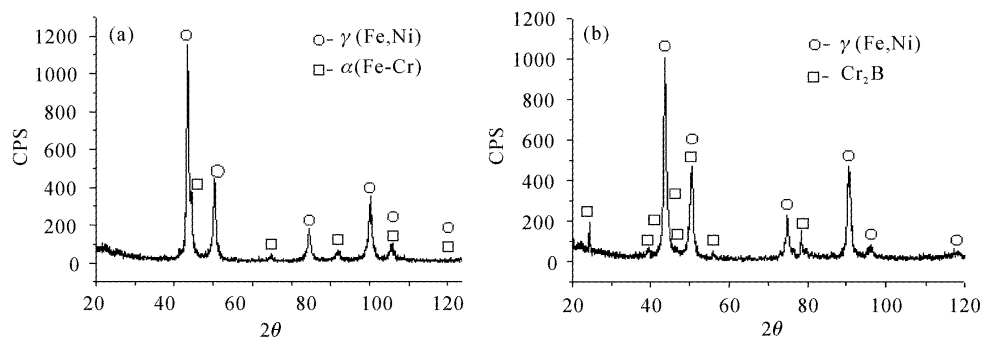


图 4 聚焦光束合金化层的 X 射线衍射结果

Fig. 4 X-ray diffraction spectra of light beam alloying coating  
(a)  $q = 2000$  J/mm; (b)  $q = 4000$  J/mm

表 4 合金化层的析出相化学成分 (wt.-%)

Table 4 Chemical compositions of precipitated phases of alloying coating (wt.-%)

Heat input $q$ / J/mm	Precipitated phase	Alloying elements				
		Fe	Cr	Ni	Si	C
2000	Dendrite	69.42	19.45	10.41	0.69	0.03
	Dendrite boundary	52.49	42.81	4.11	0.50	0.08
4000	Dendrite	81.18	9.18	7.68	1.96	0.00*
	Dendrite boundary	69.07	27.39	2.94	0.59	0.01*

Ni)枝晶间。因此,低热输入条件下形成了由大量的  $\gamma(\text{Fe,Ni})$ 枝晶及少量晶界  $\alpha(\text{Fe-Cr})$ 组成的双相组织。

当提高热输入 ( $q = 4000$  J/mm)时,合金化程度降低,即 Cr, Ni 元素在合金化层中平均含量降低,而 B, Si 造渣元素由于加入量的提高,一部分起造渣保护作用,剩余部分则参与了熔池中的合金化反应,因而在合金化层中的含量较高。由 Fe-Si 和 Fe-B 二元相图<sup>[8]</sup>可知, Si 和 B 元素在  $\gamma$ 相中的极限固溶度分别约为 2.0 wt.-%和 0.02 wt.-%,在本试验条件下 Si 元素可完全固溶于  $\gamma(\text{Fe,Ni})$ 中,而 B 元素只能在  $\gamma(\text{Fe,Ni})$ 的晶界富集,由晶界析出相的

形貌(图 3(c))可以推测, B 元素可能是在  $\gamma(\text{Fe,Ni})$ 晶间液相冷却过程中以共晶  $\text{Cr}_2\text{B}$ 形式析出。因此高热输入条件下,合金化层组织由大量的  $\gamma(\text{Fe,Ni})$ 枝晶及少量的晶间  $\gamma(\text{Fe,Ni}) + \text{Cr}_2\text{B}$ 双相共晶组成。

合金化层底部的平面晶带的宽度是由热输入条件决定的。在相同的冷却条件下,热输入越大,熔池中的过热度越大,即固液界面前沿液相中的温度梯度越大,液相中的成分过冷倾向越小,从而有利于固液前沿以平界面形式推进,因此,在高热输入情况下,获得了宽度较大的平面晶带。

## 4 结 论

1) 当合金化元素加入量一定时,合金化层的成型及其显微组织不仅取决于热输入量,还与造渣元素 B,Si 的加入量有关。热输入量较低时可采用较少的造渣元素,而为获得成型良好的合金化层,提高热输入时必须同时增加造渣元素的加入量。

2) 采用低热输入合成的合金化层的显微组织由大量的  $\gamma(\text{Fe},\text{Ni})$  及少量的晶界  $\alpha(\text{Fe}-\text{Cr})$  构成,而采用高热输入合成的合金化层的显微组织为  $\gamma(\text{Fe},\text{Ni})$  树枝晶及晶界  $\gamma(\text{Fe},\text{Ni})+\text{Cr}_2\text{B}$  共晶。

3) 合金化层显微组织和物相组成由热输入条件及 B,Si 造渣元素加入量所决定,而平面晶带的宽度则主要取决于热输入条件,热输入越大,平面晶带越宽。

### 参 考 文 献

- 1 Yu Ligen, Li Xiaoxuan, Wang Huaming. Microstructure and wear resistance of a laser surface alloyed  $\gamma$ -TiAl intermetallic alloy Ti-48Al-2Cr-2Nb [J]. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程), 2000, **29**(5):328~331 (in Chinese)
- 2 K. F. Tam, F. T. Cheng, H. C. Man. Enhancement of cavitation erosion and corrosion resistance of brass by laser surface alloying with Ni-Cr-Si-B [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2002, **149**(1):36~44
- 3 J. Dutta Majumbar, A. Weisheit, B. L. Mordike *et al.*. Laser surface alloying of Ti with Si, Al and Si+Al for an improved oxidation resistance [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1999, **266**(1~2):123~134
- 4 Shan Jiguo, Zhang Di, Yu Shunzhou *et al.*. Mechanism and brightness of light beam surface alloying [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment* (材料热处理学报), 2001, **22**(3):37~40 (in Chinese)
- 5 He Xiuli, Wang Huaming. Resistance of laser surface alloyed layer on TiAl alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报), 2000, **10**(6):790~795 (in Chinese)
- 6 Gu Weibiao, Tang Chunyuan, Luo Qifu. Study on the properties of laser surface alloyed layer on 45 steel [J]. *Materials for Mechanical Engineering* (机械工程材料), 1998, **22**(6):43~52 (in Chinese)
- 7 Hu Delin, Zhang Fan. Diagrams of Ternary Alloys [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1995. 159~161 (in Chinese)
- 8 Yu Jueqi, Yi Wenzhi, Chen Bangdi *et al.*. Diagrams of Binary Alloys [M]. Shanghai: Shanghai Science & Technology Press, 1987. 200, 375 (in Chinese)