

## 镍基合金粉末光束堆焊层的微观组织及强化机理\*

单际国 张迪 任家烈

(清华大学)

**摘要** 采用X射线衍射、SEM、EDAX及显微硬度和洛氏硬度等分析手段研究了含碳量为1.0%的NiCrBSi系自熔合金粉末光束堆焊层的微观组织及强化机理。结果表明,采用光束镍基合金粉末堆焊可在铁碳合金表面获得与基体冶金结合良好、无裂纹、轻度稀释的强化层。堆焊热输入对堆焊层稀释率及合金元素烧损的影响程度决定了堆焊层微观组织及物相组成。小热输入堆焊时,堆焊金属轻度稀释( $\eta=3.5\%$ ),其显微组织由少量初生的 $\gamma$ -Ni和大量的 $\gamma$ -Ni+Ni<sub>3</sub>B+Ni<sub>3</sub>Si三相共晶组成的亚共晶基底,以及在基底上分布着大量的Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>、(Cr, Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>高硬度相组成。采用大热输入堆焊,堆焊金属稀释率达12%,堆焊层由大量的 $\gamma$ -(Fe, Ni)枝晶和少量 $\gamma$ -(Fe, Ni)+M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>共晶组成。在堆焊层中未发现一碳化合物的析出。在光束粉末堆焊层中大量高硬度M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>、M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>型碳化物和Ni<sub>3</sub>B、Ni<sub>3</sub>Si共晶相的析出以及合金元素在 $\gamma$ 相中的过饱和固溶是其得以强化的主要原因。与TIG堆焊相比,采用相近热输入所获得的光束粉末堆焊层的耐磨性提高了3倍以上。

**关键词** 光束 粉末堆焊 微观组织 强化机理

**分类号** TG113. TG115

**文章编号** 1005-3093(2002)02-0151-07

## MICROSTRUCTURE AND STRENGTHENING MECHANISM OF Ni-BASED ALLOY POWDER SURFACING LAYER BY LIGHT BEAM

SHAN Jiguo\*\* ZHANG Di REN Jialie

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

\* Supported by The National Natural Science Foundation of China No.59905017.

Manuscript received Jan 20, 2001; in revised form Sept 3, 2001

\*\* To whom correspondence should be addressed. Tel:(010)62773798.

E-mail: shanjg@tsinghua.edu.cn

**ABSTRACT** The microstructure and strengthening mechanism of NiCrBSi system alloy powder (1.0%C, mass fraction) surfacing layer by light beam heating were investigated by means of X-ray diffraction, SEM, EDAX, microhardness, Rockwell hardness, etc.. The results showed that the light beam Ni-based alloy powder surfacing layer can metallurgically bond with the Fe-C alloy substrate. The surfacing layer has lower dilution and no cracks. The influence of heat input on dilution and burning loss of alloy elements determines the microstructure and the phase constitution of surfacing layer. When lower heat input is used, the microstructure of surfacing layer with lower dilution ( $\eta=3.5\%$ ) consists of high hardness phases (Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, (Cr, Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>) precipitated on hypoeutectic matrix composed of a little of primary  $\gamma$ -Ni and a lot of ternary eutectic of  $\gamma$ -Ni+Ni<sub>3</sub>B+Ni<sub>3</sub>Si. When higher heat input is used, the dilution of surfacing layer is as high as 12% and the surfacing layer consists of a lot of  $\gamma$ -(Fe, Ni)

\* 国家自然科学基金 59905017、清华大学 985 基础研究基金及实验室开放基金资助项目。

2001年1月20日收到初稿; 2001年9月3日收到修改稿。

本文联系人: 单际国, 北京市 100084, 清华大学机械工程系

dendrite and a little of  $\gamma$ -(Fe, Ni)+ $M_7C_3$  binary eutectic. There is no primary carbide in this kind of surfacing layer. The precipitation of carbide  $M_{23}C_6$  and  $M_7C_3$  and eutectic  $Ni_3B$  and  $Ni_3Si$ , and the oversaturated  $\gamma$  phase by alloy elements result in the strengthening of surfacing layer. Compared with TIG surfacing, the wear resistance of light beam surfacing layer is 3 times higher than that of TIG surfacing layer with the analogical heat input.

**KEY WORDS** light beam, powder surfacing, microstructure, strengthening mechanism

传统的粉末堆焊技术以电弧为热源, 由于功率密度的限制和电弧吹力的影响堆焊层很难同时达到高效和低稀释率。高效优质粉末堆焊是焊接领域的重要研究方向之一<sup>[1]</sup>。光束粉末堆焊是近年来发展起来的新堆焊技术, 其功率密度与电弧焊相当, 但加热过程平静, 对熔池无机械力作用, 可获得低稀释率的堆焊层<sup>[2]</sup>。国外在光束粉末堆焊技术领域的工作<sup>[3,4]</sup>, 仅限于工艺和堆焊层宏观质量的研究, 关于堆焊层微观组织尤其是堆焊层物相组成及其强化机制的研究尚未见报道。本文在 45# 钢基体上得到低稀释率镍基合金粉末堆焊层, 研究堆焊热输入对堆焊层微观组织和物相组成的影响, 并分析堆焊层强化机制及耐磨性。

## 1 实验方法

堆焊材料为镍基自熔合金粉末, 粒度为 40~100  $\mu\text{m}$ , 化学成分(质量分数, %)为: Cr 17.0, Si 4.0, B 3.5, C 1.0, Fe<12, 余量为 Ni。其热喷涂层的名义硬度为 HRC60。采用有机粘结剂将堆焊粉末预涂在基体表面。基材为退火态 45# 钢, 试样尺寸为 12.35 mm $\times$ 12.35 mm $\times$ 50 mm。用清华大学研制的光束加热设备进行光束堆焊, 其最小光斑直径为 5 mm, 最大功率为 5 kW。借助三维工作台光束相对于工件沿 X 方向的扫描速度在 0.2~11 mm/s 范围内可连续调节。光束堆焊工艺参数列于表 1。为评定光束堆焊层的耐磨性, 还进行了 TIG 堆焊, 规范参数为: 电弧电压 20 V, 电弧电流 80 A, 堆焊速度 0.78 mm/s。金相试样用双氧水盐酸水溶液腐蚀后在 JSM-6301F 场发射扫描电镜和能谱仪(EDAX)下分析微观组织及析出相化学成分, 用 D/max-RB 型 X 射线衍射仪进行物相分析。析出相显微硬度和堆焊层表面硬度用  $\Pi$  MT-3 型显微硬度计和 AR-10 型洛氏硬度计测量, 载荷分别为 20 g 和 150 kg。磨损实验在 MHK-500 环块试验机上进行, 上试样为淬火态 GCr15 标准环, 硬度为 HRC61.5, 下试样为堆焊试块。采用 Talysurf 5-120 表面形貌仪测量磨痕形貌, 通过曲线拟合计算磨损体积, 并以此作为评定堆焊层耐磨性的依据。

表 1 光束粉末堆焊工艺参数及堆焊层稀释率

Table 1 Parameters of light beam powder surfacing and dilution of surfacing layer

Input power /kW	Output power /kW	Coating thickness/mm	Scanning velocity/mm $\cdot$ s <sup>-1</sup>	Heat input /kJ mm <sup>-1</sup>	Dilution ( $\eta$ /%)
5	2	1	1	2	3.5
5	2	1	0.5	4	12

## 2 结果与讨论

### 2.1 堆焊层与基体的结合方式

当其它条件相同时, 随着堆焊热输入的增加, 熔池的存在时间及其在高温下停留的时间延长, 基体热输入增加, 从而导致堆焊层稀释率增加(表 1), 在轻度稀释( $\eta=3.5\%$ )和重稀释( $\eta=12\%$ )条件下, 熔合区宽度分别为 4 $\mu\text{m}$ 和 8 $\mu\text{m}$ (图 1)。在熔池结晶过程中, 基体熔化区的温度相对较低, 固液界面前沿温度梯度较大, 成分过冷度小, 因此熔合区金属以平面晶的形式由熔池底部向上生长, 远离熔合线的堆焊

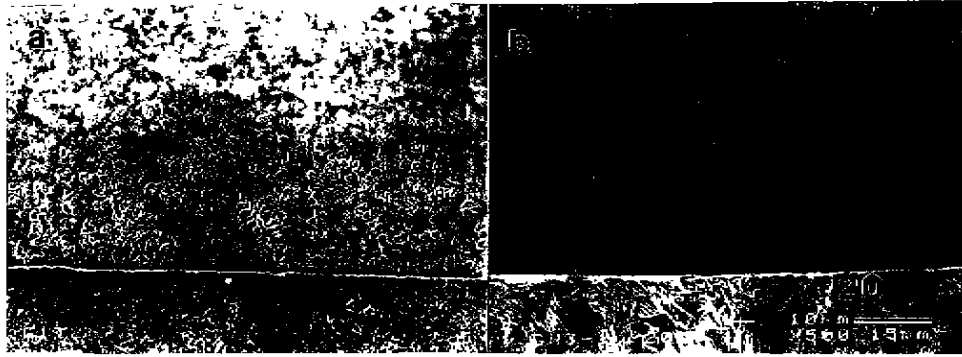


图 1 熔合线附近堆焊层微观组织 (SEM, 二次电子像)

Fig.1 Microstructure of surfacing layer close to bonding line (SEM, secondary electron image) (a) surfacing layer with lower dilution ( $\eta=3.5\%$ ), (b) surfacing layer with higher dilution ( $\eta=12\%$ )

层显微组织由平面晶过渡为树枝晶。堆焊层即使轻度稀释, 熔合线附近的堆焊金属中 Fe 元素含量仍高于 Ni60 原始粉末, 而靠近熔合线的基体中 Ni 元素含量达 7.86%(表 2), 说明基体中一部分 Fe 原子向堆焊层扩散, 而堆焊金属中的 Ni 元素向基体扩散, 堆焊层与基体形成了良好的冶金结合。

表 2 轻度稀释堆焊层析出相 EDAX 分析结果及显微硬度

Table 2 EDAX analysis results (mass fraction, %/atomic fraction, %) and microhardness ( $Hv_{0.02}$ ) of precipitations in surfacing layer with lower dilution

Precipitation	$Hv_{0.02}/MPa$	Si	Cr	Fe	Ni
Eutectic	9134	7.28/13.97	4.87/5.06	6.00/5.80	81.84/75.18
Regularly blocky phase	22501	0.10/0.18	96.31/96.56	1.51/1.41	2.07/1.84
Strip phase	17983	0.36/0.68	93.05/93.39	1.85/1.73	4.73/4.21
Dendrite	5968	5.95/11.55	6.15/6.45	8.98/8.76	78.91/73.24
Bonding zone(BZ)	2724	4.26/8.34	4.75/5.03	27.52/27.13	63.47/59.49
Substrate close to BZ	2440	1.06/2.09	1.52/1.63	89.57/88.88	7.86/7.41

## 2.2 轻度稀释堆焊层的微观组织及强化机制

采用小堆焊热输入 (2 kJ/mm) 时, 堆焊金属稀释率为 3.5%(表 1), 堆焊层中存在  $\gamma-Ni$ 、 $Cr_{23}C_6$ 、 $(Cr, Fe)_7C_3$ 、 $Ni_3Si$ 、 $Ni_3B$  等物相, 其衍射峰位及标定出的物相 (图 2b) 与 Ni60 原始粉末基本相同 (图 2a), 可见, 采用小堆焊热输入时, 在堆焊层与基体产生冶金结合的前提下, Ni60 原始粉末中的物相均可在堆焊层中析出, 有利于保证堆焊层的设计性能。Ni60 合金粉末碳当量高, 在激光堆焊中极易出现冷裂纹而导致堆焊层质量下降, 而光束粉末堆焊时, 即使堆焊热输入小, 基体不预热, 也不会产生冷裂纹 (图 3a)。

采用小热输入获得的轻度稀释光束堆焊层的显微组织为亚共晶基底上分布着大量条状相和规则块状相 (图 3a), 亚共晶基底由少量的枝晶与大量的枝晶间共晶组成 (图 3b), 图 3c~3h 为与图 3b 相同区域低放大倍数下的各元素面分布图。Cr 元素高度集中在规则块状相和条状相中 (图 3c), C 元素在上述两物相中相对集中 (图 3d), 且两物相明显不含 Ni、Si 元素 (图 3g, 3h)。此外, 条状相中含有少量的 Fe

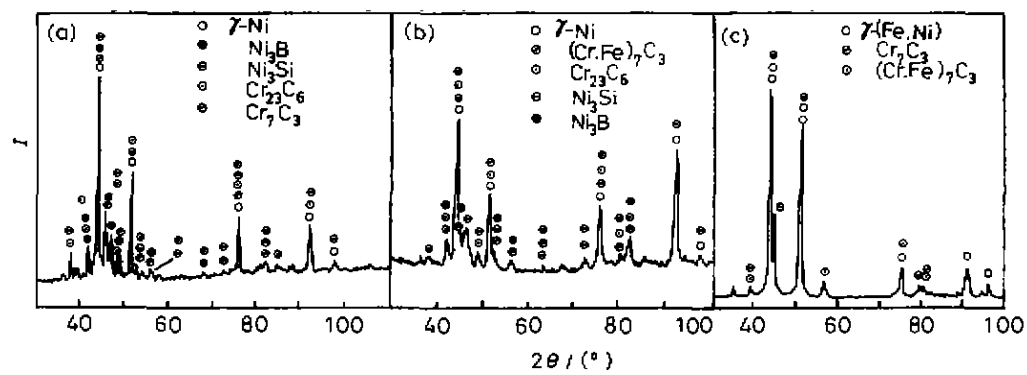


图 2 Ni60 合金粉末及其光束堆焊层的 X 射线衍射图

Fig.2 X-ray diffraction spectra of Ni60 alloy powder and its light beam surfacing layer (a) primitive powder (b) surfacing layer with lower dilution (c) surfacing layer with higher dilution

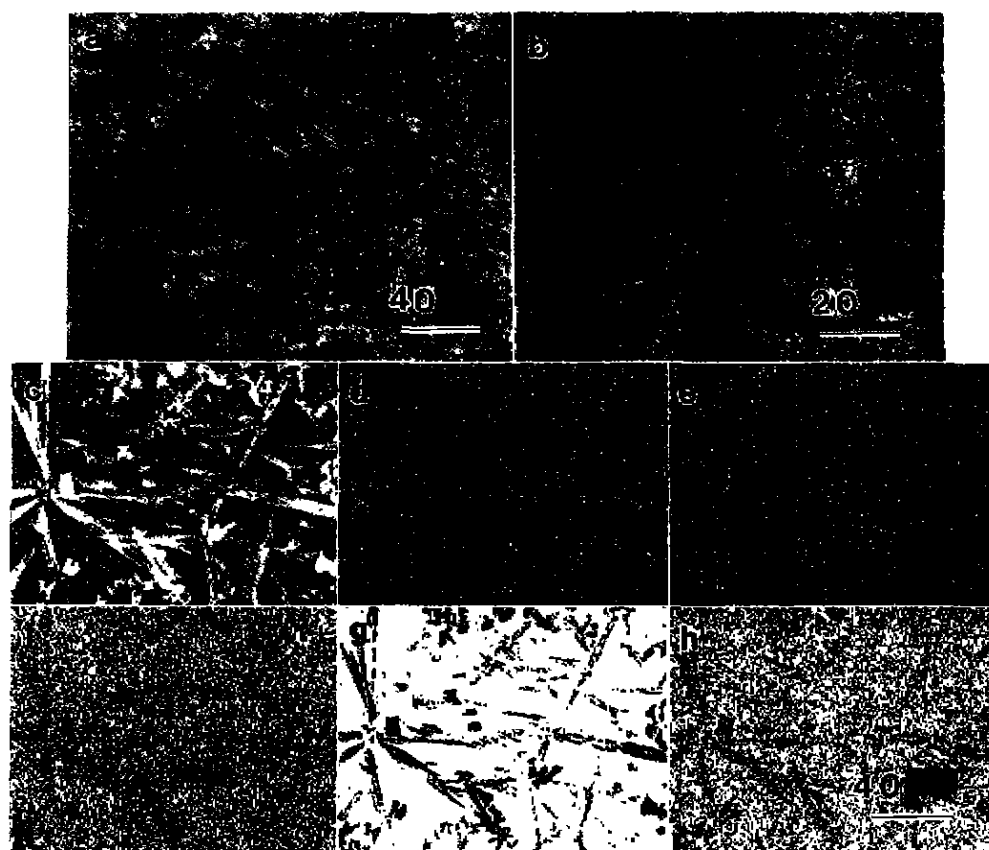


图 3 轻度稀释堆焊层显微组织 (a), (b) 及其合金元素面分布图 (c~h) (SEM, 二次电子像)

Fig.3 Microstructure (a) and (b) of surfacing layer with lower dilution and its alloy elements maps (c~h) (SEM, secondary electron image) (a) 500 $\times$  (b) 1000 $\times$  (c) Cr map (d) C map (e) B map (f) Fe map (g) Ni map (h) Si map

(图 3f). 对 X-ray 衍射 (图 2b) 和 EDAX(表 2) 实验结果综合分析表明, 堆焊层中的条状相和规则块状相应为  $(\text{Cr, Fe})_7\text{C}_3$  和  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ . B 元素面分布图表明, 规则块状相、条状相中均含有一定量的 B(图 3e), 很可能是上述碳化物中的部分 C 被 B 代替. 对于小热输入堆焊, 熔池存在时间短, C 的烧损量小且扩散不充分, 从原始堆焊粉末 Ni60 中的碳化物熔化后形成的局部 C 元素富集区中可直接析出  $(\text{Cr, Fe})_7\text{C}_3$  相, 而  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  可能以两种方式形成: 液相与  $(\text{Cr, Fe})_7\text{C}_3$  发生包晶反应生成或从液相中直接析出<sup>[5]</sup>. 但  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  具有一次碳化物的形态, 从液相中直接析出的可能性更大. 在堆焊层中大量高硬度碳化物相的析出必将提高其宏观硬度, 有利于改善堆焊层的耐磨性.

随熔池温度的降低, 一次碳化物和  $\gamma\text{-Ni}$  析出后, 剩余液相发生共晶反应. 共晶组织中深色相为 P1、次深色窄片状相为 P2(宽约 60 nm)、浅色宽片状相为 P3(宽约 200 nm). 其中 P3 相的析出量远大于 P1 和 P2(图 4a). 根据背散射像衬度可推测, P1 与  $\gamma\text{-Ni}$  为同一种相, 而 P2 和 P3 难以区分(图 4b). 根据二元合金相图<sup>[5]</sup>, Ni-B、Ni-Si 合金系中的共晶组织分别由  $\gamma\text{-Ni}+\text{Ni}_3\text{B}$  和  $\gamma\text{-Ni}+\text{Ni}_3\text{Si}$  构成. 因此, 在 Ni-B-Si 三元合金系中出现  $\gamma\text{-Ni}+\text{Ni}_3\text{B}+\text{Ni}_3\text{Si}$  三相共晶是完全可能的<sup>[6,7]</sup>. X 射线衍射结果已证实, 堆焊层中存在  $\gamma\text{-Ni}$ 、 $\text{Ni}_3\text{B}$ 、 $\text{Ni}_3\text{Si}$  相. EDAX(表 2) 结果表明, 共晶组织的平均含 Ni 量与  $\text{Ni}_3\text{B}$  中 Ni 元素含量接近, 可推测析出量较多的宽片状相 P3 为  $\text{Ni}_3\text{B}$ , 析出量较少的窄片状相 P2 为  $\text{Ni}_3\text{Si}$ . 因此, 堆焊层中的共晶组织由共晶  $\gamma\text{-Ni}$ 、窄片状的  $\text{Ni}_3\text{Si}$ 、宽片状的  $\text{Ni}_3\text{B}$  组成, 其中  $\text{Ni}_3\text{B}$  的相对析出量最多.



图 4 轻度稀释堆焊层中亚共晶基底 (SEM)

Fig.4 Hypoeutectic microstructure of surfacing layer with lower dilution (SEM) (a) secondary electron image (b) back electron image

因此, 在轻度稀释条件下, Ni60 光束粉末堆焊层的显微组织为亚共晶基底上分布着大量的条状相和规则块状相  $(\text{Cr, Fe})_7\text{C}_3$  和  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ , 亚共晶基底由少量  $\gamma\text{-Ni}$  枝晶和大量由圆块状  $\gamma\text{-Ni}$ 、宽片状  $\text{Ni}_3\text{B}$ 、窄片状  $\text{Ni}_3\text{Si}$  组成的三相共晶构成, 是高共晶度的亚共晶组织. 堆焊层中  $\gamma\text{-Ni}$  衍射峰对应的衍射角  $2\theta$  略小于标准卡片对应的  $2\theta$ , 说明  $\gamma\text{-Ni}$  存在一定程度的晶格畸变, 晶格常数变大. 这与枝晶中固溶了 Si、Fe、Cr 等合金元素有关(表 2).  $\gamma\text{-Ni}$  中 Si 含量为 25.7% (原子分数), 超过了 Si 在  $\gamma\text{-Ni}$  中的最大溶解度 (17.5%)<sup>[5]</sup>. 堆焊层中大量高硬度一次碳化物和共晶产物的析出以及合金元素在  $\gamma\text{-Ni}$  中的过饱和固溶使堆焊层得以强化.

### 2.3 重稀释堆焊层微观组织及强化机制

采用大热输入 (4 kJ/mm) 堆焊, 堆焊层稀释率高达 12%, 基体的过度熔化使 Fe 成为堆焊层中最主要的合金元素(表 3), 与 Ni60 原始粉末相比堆焊层中析出物相也发生了很大变化(图 2c).

表 3 重稀释堆焊层析出相 EDAX 结果及其显微硬度  
Table 3 EDAX analysis results (mass fraction, %/atomic fraction, %) and microhardness ( $Hv_{0.02}$ ) of precipitations in surfacing layer with higher dilution

Precipitation	$Hv_{0.02}/MPa$	Si	Cr	Fe	Ni
Upper dendrite	2528	2.69/5.27	6.07/6.40	60.90/59.66	30.83/29.67
Bottom dendrite	2058	1.60/3.18	5.32/5.70	63.64/63.62	29.44/27.80
Upper eutectic	3704	0.64/1.26	22.38/23.68	65.68/64.53	11.30/10.54
Bottom eutectic	6292	0/0	15.22/16.33	69.11/68.85	15.67/14.82

堆焊层的显微组织由少量共晶基体上分布着大量初生奥氏体枝晶组成。是低共晶度的亚共晶组织。堆焊层中未析出一次碳化物(图 5a)。X 射线衍射(图 2c)和能谱分析(表 3)证明。枝晶是以 Fe、Ni 为基。固溶少量 Si、Cr 元素的  $\gamma$ -(Fe, Ni) 固溶体。枝晶间是由  $\gamma$ -(Fe, Ni) 和  $M_7C_3$  组成的两相共晶。共晶中的  $M_7C_3$ (M 为 Fe、Cr) 在初生的  $\gamma$ -(Fe, Ni) 枝晶间相互连接成网状。共晶  $\gamma$ -(Fe, Ni) 固溶体夹在  $M_7C_3$  之间(图 5b)。采用大热输入堆焊。熔池存在时间长。C 的烧损及其在熔池中的充分扩散使 Ni60 原始粉末中碳化物熔化后形成的 C 元素富集区消失。很难在液相中直接析出一次碳化物。熔池中作为造渣剂的 B、Si 的烧损大大降低了其在堆焊金属中的含量。无法形成与  $\gamma$  共晶的硼化物和硅化物相。基体的过度熔化除向熔池中引入大量 Fe 外。也有限地弥补了熔池中 C 的烧损。从而在  $\gamma$ -(Fe, Ni) 枝晶析出后。剩余液相转变为由

$\gamma$ -(Fe, Ni) 和碳化物组成的共晶。重稀释堆焊层中共晶碳化物的存在使共晶组织的显微硬度高于初生的  $\gamma$ -(Fe, Ni) 枝晶(表 3)。  $\gamma$ -(Fe, Ni) 枝晶中虽然固溶了一定量的合金元素。但其硬度远低于轻度稀释堆焊层中的  $\gamma$ -Ni 枝晶。这与固溶的合金元素种类和固溶量小有关。由于 Ni、Fe、Cr 三者原子半径接近。Cr 对  $\gamma$ -(Fe, Ni) 的固溶强化作用并不明显。C 和 B 在  $\gamma$ -(Fe, Ni) 相中有限的固溶度也限制了它们的强化作用。只有 Si 对  $\gamma$ -(Fe, Ni) 固溶强化作用最为显著。而  $\gamma$ -(Fe, Ni) 中 Si 较低的固溶量是导致其硬度低于  $\gamma$ -Ni 的主要原因。可见。重稀释的条件下。共晶碳化物是堆焊层的主要强化相。

#### 2.4 堆焊层的硬度及耐磨性

在光束堆焊过程中。堆焊热输入对堆焊层宏观硬度和耐磨性有很大影响。大热输入堆焊时(4 kJ/mm)。堆焊层的宏观硬度远低于热喷涂层(HRC60)及小热输入光束堆焊层(HRC63.6)。耐磨性仅为小热输入堆焊层的 12%(表 4)。小热输入堆焊层耐磨性的提高充分说明了轻度稀释堆焊层中大量一次碳化物析出是堆焊层得以强化的重要原因。在堆焊热输入相近的条件下(约 2 kJ/mm)。光束堆焊层的宏观硬度及耐磨性明显高于 TIG 堆焊层(表 4)。其原因可能是在 TIG 堆焊过程中电弧吹力搅动熔池。加剧了电弧热量向熔池底部的传递。导致稀释率增加(6.6%)。堆焊层性能因此而下降。

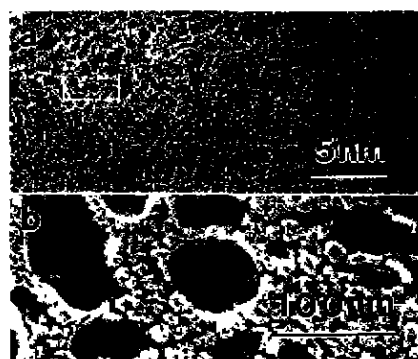


图 5 重稀释堆焊层显微组织形貌

Fig.5 Microstructure of surfacing layer with higher dilution (SEM, back electron image)

表 4 不同工艺条件下堆焊层宏观硬度和磨损体积  
Table 4 Macrohardness and wear volume of surfacing layer by different parameters

	Macrohardness/HRC	Wear volume/mm <sup>3</sup>
1	63.6	0.351
2	36.2	2.983
3	50.8	1.443

Note: 1. light beam surfacing layer,  $V_s = 1\text{mm/s}$  2. light beam surfacing layer,  $V_s = 0.5\text{mm/s}$   
3. TIG surfacing layer

### 3 结 论

铁碳合金表面光束堆焊 Ni 基自熔合金粉末, 可获得与基体冶金结合良好、无裂纹的表面强化层。大热输入堆焊时, 堆焊层是由  $\gamma-(\text{Fe}, \text{Ni})$  枝晶和  $\gamma-(\text{Fe}, \text{Ni})+\text{M}_7\text{C}_3$  共晶组成的亚共晶组织。堆焊层强化的原因是共晶碳化物的析出。小热输入堆焊时, 堆焊层是由高共晶度的亚共晶基底及大量富铬碳化物组成。而亚共晶基底由  $\gamma\text{-Ni}$  枝晶和  $\gamma\text{-Ni}+\text{Ni}_3\text{B}+\text{Ni}_3\text{Si}$  三相共晶组成。高硬度一次碳化物和共晶产物的析出、合金元素在  $\gamma\text{-Ni}$  中的过饱和固溶是强化的主要原因。在堆焊热输入相近的条件下光束粉末堆焊层的耐磨性比 TIG 堆焊层提高 3 倍以上。

### 参 考 文 献

- 1 XU Binshi(徐滨士), ZHU Shaohua(朱绍华), *Theories and Technologies on Surface Engineering* (表面工程的理论与技术), the first edition (Beijing, Defence Industries Press, 1999) p.5
- 2 SHAN Jiguo, WU Aiping, ZHANG Di, REN Jialie. *The Paton Welding Journal*, 9~10, 164(2000)
- 3 Ogino K, Kinoshita H. *Journal of High Temperature Society of Japan*, 6(4), 163(1980)
- 4 Suleimanov S, Baizakov B, Bugakov A, Alonso M, Garcia I, Vazquez A. *Journal De Physique*, 9(3), 3(1999)
- 5 YU Jueqi(虞觉奇), YI Wenzhi(易文质), CHEN Bangdi(陈邦迪), CHEN Hongjian(陈宏鉴). *Binary Alloy Phase Diagrams* (二元合金状态图集) (Shanghai, Shanghai Science and Technology Press, 1987) p.203, 242, 494
- 6 Khorunov V. F., Ukader E. M., in *Proceeding of IIW*, edited by IIW (Hague, Pergamon Press, 1991) p.357
- 7 LU Shanping(陆善平), GUO Yi(郭义), *Chinese Journal of Materials Research* (材料研究学报), 13(2), 188(1999)