

激光熔覆 SiC/不锈钢粉末复合涂层的 组织与性能*

杨永强

(华南理工大学机电系 广州 510641)

文效忠

(香港理工大学制造工程系 香港九龙)

提要 用 2 kW Nd:YAG 激光在 40Cr 钢基体上制取了 SiC 强化的 Fe 基复合材料涂层,并对熔覆层进行了显微组织结构和性能测试. 加入的 SiC 包括颗粒状和纤维状两种形态,通过调整颗粒状 SiCp 和纤维状 SiCf 的加入量,研究了 SiC 在激光熔覆过程中的演变、存在形式及对熔覆层硬度的影响. 结果表明,随着加入量的增加,熔覆层中未熔 SiC 含量增加,熔覆层硬度也随之提高;对比加入颗粒状和纤维状 SiC 的熔覆层的显微硬度表明,同含量情况下纤维状 SiC 的强化效果更显著;造成熔覆层硬度显著提高的原因是未熔 SiC,析出相 FeSiC 的弥散强化和熔入的 Si, C 元素引起的固溶强化作用.

关键词 激光熔覆, SiC 强化铁基复合材料涂层, 组织性能

1 引 言

作为新兴的表面强化技术,激光熔覆具有快速熔化快速凝固的特点,可在普通金属材料表面原位制取高合金、高性能的表面涂层,越来越受到人们重视,是目前表面改性研究热点之一. 碳化硅(SiC)作为增强相,以颗粒、纤维形式与金属基材料制成复合材料,具有高耐磨性、高比强度、高模量、高韧性及高的耐热等优异综合性能,可用于模具、汽车摩托车活塞环、汽缸等部件,是目前复合材料研究和应用开发的前沿课题. 自 80 年代末以来,国内外有人开始进行激光处理含有 SiC 的材料研究^[1~4].

SiC 具有高熔点(2500℃),高硬度(2700 kg/mm²)等特点,可以制成颗粒、纤维、晶须来增强金属基体. 其中, SiC 颗粒由于价格低,作为增强相最具吸引力. 激光与材料发生作用时,材料依次经历加热、熔化、气化,然后凝固. 激光对 SiC/金属基材料加热时,由于热传导作用,基体金属首先熔化,随着温度升高, SiC 必然也会发生熔化. 可以通过调整激光功率和扫描速度,使材料处于发生 SiC 熔化前温度. 理想情况下在熔体凝固时,金属相开始结晶,并将 SiC 粒子包裹. 然而,实际激光处理时,由于 SiC 在熔化之前会首先发生部分分解, SiC 粒子在高温下与液相金属中元素可能发生界面反应,以及环境气氛中氧、氮可能与 SiC 及金属元素发生化学反应,熔体凝固时会析出,形成某些非平衡相.

本文拟分别以颗粒状、纤维状 SiC 为增强相,以不锈钢为基体相,用激光熔覆方法在普碳

* 广东省自然科学基金资助项目(970459).

收稿日期: 1999-07-11; 收到修改稿日期: 1999-09-27

钢上制取金属基复合材料涂层;研究激光熔覆过程中 SiC 在激光束作用下的不熔化或少熔化的工艺条件,研究不同 SiC 加入量对熔覆层金相组织和显微硬度的影响规律及机理等。

2 实验方法

2.1 激光熔覆工艺参数

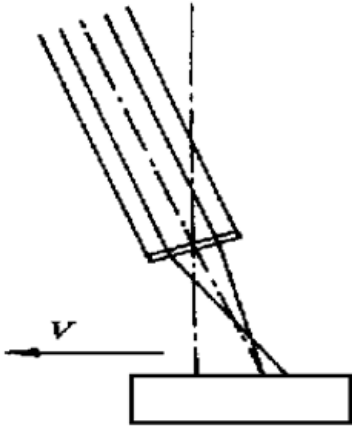


图 1 Nd·YAG 激光熔覆装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser cladding by Nd·YAG laser

采用 2 kW Nd·YAG 激光器,光纤传输. 激光头由 ZnSn 透镜聚焦,焦距长度 100 mm. 激光功率 $P = 1.6$ kW, 扫描速度 20 mm/s, 熔覆区光斑尺寸 2 mm, Ar 气保护. 图 1 为 Nd·YAG 激光熔覆示意图. 为了防止反射的激光对聚焦镜的影响,激光头倾斜 13° . 由于单次激光熔覆宽度较窄,故采用多道搭接工艺,即在前次熔覆层基础上,横向搭接 50%,依次下去,最终得到较大面积熔覆层(见图 2(b)).

2.2 实验材料

基体试件为圆饼形,尺寸 $\phi 38$ mm \times 9 mm,材料为 40Cr 钢. 熔覆材料的化学成分及形态见表 1. SiC 有两种形态,颗粒状和纤维状,其颗粒状尺寸为 5~ 15 μ m,纤维状直径为 2~ 5 μ m,长约 20~ 60 μ m 的晶须. 晶系为

具有立方晶系结构的 α -SiC.

表 1 激光熔覆材料的化学成分及形态

Table 1 Composition and size of the materials used in laser cladding

	Composition/wt-%	Size
SiC particle	100% SiC	5~ 15 μ m
SiC fibre	100% SiC	diameter: 2~ 5 μ m, length: 20~ 60 μ m
Stainless steel powder (KF126)	Ni: 8, Cr: 16, Mo: 6, Al: 6, C: 0.1, bal. Fe	15~ 30 μ m
Substrate (40Cr steel)	C: 0.4, Cr: 1, bal. Fe	$\phi 38$ mm \times 9 mm

SiC 粉末和纤维按重量百分比与不锈钢粉末配好后,机械混合,然后将混合粉末用水玻璃调成稠糊状,涂在 40Cr 钢基体表面. 厚度 0.85 mm. 40Cr 试件提前去油,并经喷砂,使表面毛化,以便于粉末涂覆和激光熔覆.

2.3 测试方法

激光熔覆试件经线切割加工,各制成单面为熔覆层的 10 mm \times 10 mm \times 9.6 mm 或 10 mm \times 10 mm \times 9.3 mm 的试件两个,一个作金相试件,另一个作硬度, X 射线测试试件. 金相试件用砂纸从粗至细磨制. 然后用金刚石研磨膏抛光. 再经 4% 硝酸酒精腐蚀.

显微硬度测试在 D-72 型显微硬度计上进行. 测量熔覆层横截面从熔覆层表面到基体的硬度分布曲线,方法是每隔 50 μ m 测量一个硬度值.

X 射线衍射分析在 D/MAX- γ 型 X 射线衍射仪上进行.

3 结果与分析

经对激光熔覆试件横断面分析,测得加颗粒状 SiC_p 的试件熔覆层厚度为 0.6~ 0.7 mm; 加纤维状 SiC_f 的试件熔覆层厚度为 0.3~ 0.4 mm. 同样预制厚度条件下,加 SiC 粒子和纤维所得到的熔覆层厚度相差一倍,其原因是 SiC 纤维松装密度较小,体积大. 低倍观察发现,熔覆层多道搭接痕迹清晰可辨,搭接区与其他区域颜色有明显差异. 观察还发现,所有试件均无气孔,但 60% SiC_p 熔覆层发现有裂纹存在,其他试件均未发现裂纹.

3.1 熔覆层的显微组织

3.1.1 颗粒状 SiC 强化熔覆层的显微组织

颗粒强化激光熔覆层显微组织由枝晶状基体相和分布其上的未熔颗粒及细小点状物组成(图 2). 经 X 射线衍射分析可知(图 3),熔覆层由面心立方的 γ 相(主要成分为 Fe, Ni, Cr),未熔 SiC 颗粒和析出相 FeSiC 组成. 图 3 中出现 α -Fe 的衍射峰是由于 40Cr 基体被分析在内. 未熔 SiC 分布于晶内和晶界. 在相同腐蚀条件下,熔覆层基体相颜色有较大差异,如图 2(a), (b). 这是由激光熔覆多道搭接造成的. 由于有 50% 的搭接,搭接部分由于重新加热出现回火,并使基体相析出 FeSiC 相,故呈深灰色(图 2(b)),而未搭接区则呈白色. 金相观察表明,靠近熔覆层基体一侧由于激光加热和快速冷却的影响,形成板条马氏体组织. 马氏体组织在 X 射线衍射图谱中以 α -Fe 形式被检出.

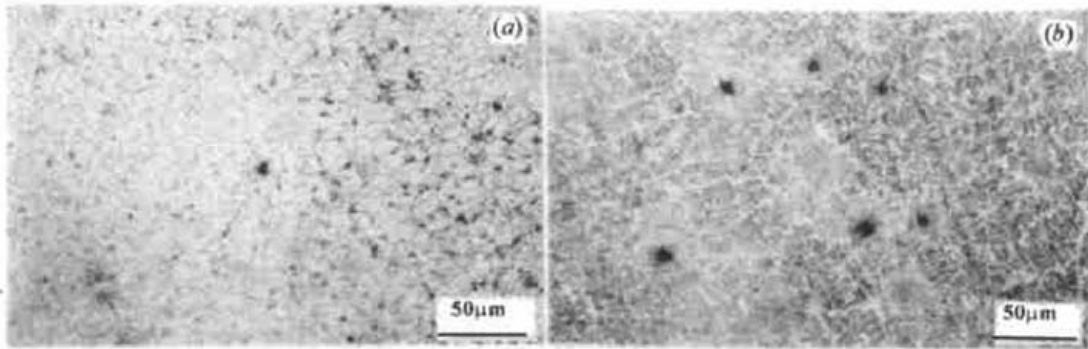


图 2 50% SiC_p+ 不锈钢激光熔覆层横断面显微组织(500 \times)

(a) 未搭接区;(b) 搭接区

Fig. 2 Optical photos of microstructure of cross section of the clad layer of 50% SiC_p+ stainless steel (500 \times)

(a) un-overlapped zone; (b) overlapped zone

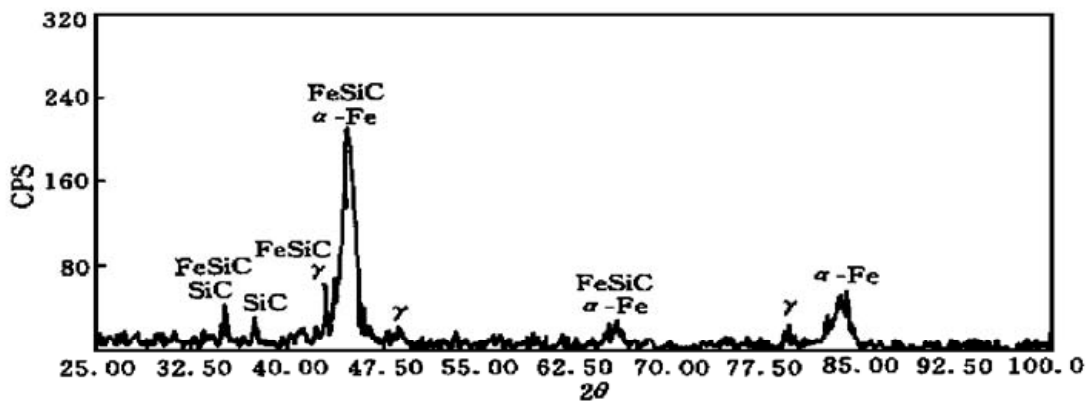


图 3 50% SiC_p+ 不锈钢激光熔覆层 X 射线衍射图谱

Fig. 3 X-ray diffraction spectra of laser clad layer of 50% SiC_p+ stainless steel

3.1.2 纤维状 SiC 强化熔覆层的显微组织

SiC 纤维强化熔覆层的显微组织见图 4. 可见, 熔覆层由枝晶和纤维及分布在枝晶上的细小颗粒组成. 经 X 衍射分析可知, 枝晶是主要成分为 FeNiCr 的不锈钢基体相 γ , 未熔纤维状 SiC 和析出相 FeSiC 组成.

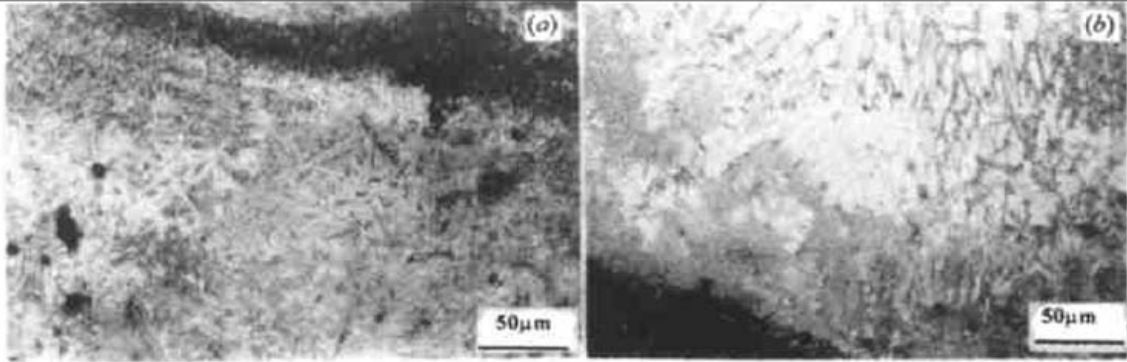


图 4 50% SiCf+ 不锈钢激光熔覆层显微组织(500×)

(a) 靠近表面组织; (b) 靠近交界区组织

Fig. 4 Optical photos of microstructure of laser clad layer of 50% SiCf+ stainless steel (500×)

(a) near surface; (b) near interface between the clad layer and substrate

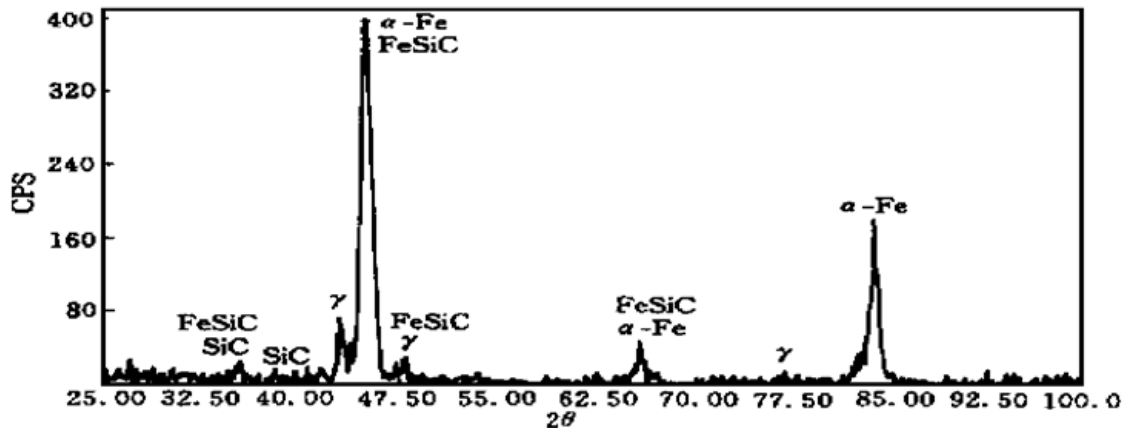


图 5 50% SiCf+ 不锈钢激光熔覆层 X 射线衍射图谱

Fig. 5 X-ray diffraction spectra of laser clad layer of 50% SiCf+ stainless steel

3.2 熔覆层的显微硬度

经对分别加入 5%、20%、30%、40%、50%、60% SiC_p 的激光熔覆层进行显微硬度测试, 得到各熔覆层从表面到基体的硬度分布曲线, 见图 6 (a). 由不同 SiC_p 加入量的激光熔覆层硬度曲线可见, SiC_p 的强化效果是很明显的. 随着 SiC_p 加入量的增加, 熔覆层硬度明显增高. 加入 5% SiC_p 可使单纯不锈钢熔覆层硬度从 220 Hv0.2 提高到约 400 Hv0.2; 当 SiC_p 加入量达到 30% 时, 熔覆层显微硬度大幅度增加. 30% SiC_p 熔覆层平均硬度达到 750 Hv0.2, 40% SiC_p 熔覆层达到 840 Hv0.2, 50% SiC_p 熔覆层达到 950 Hv0.2, 而 60% SiC_p 达到 1100 Hv0.2 (见图 6 (a)). 熔覆层显微硬度大幅度提高的原因是未熔 SiC_p 粒子增多, 其弥散强化作用增强. 同时由于 SiC_p 加入量增大, 熔入基体相的 Si, C 也增多, 固溶强化效果也有提高, 故熔覆层具有较高的硬度. 然而, 当 SiC_p 加入量达到 60% 时, 熔覆层出现开裂现象, 并呈现明显脆性特征. 由于不锈钢基体相对加入的 SiC_p 粒子有较好的相容性, 加入量低于 60% 时 SiC_p 均匀分布在晶

内和晶界, 不会引起开裂; 而当达到或高于 60% 加入量时, SiC_p 会发生聚集而不能与基体相很好地溶合, 出现孔洞及裂纹, 在热应力作用下极易发生开裂.

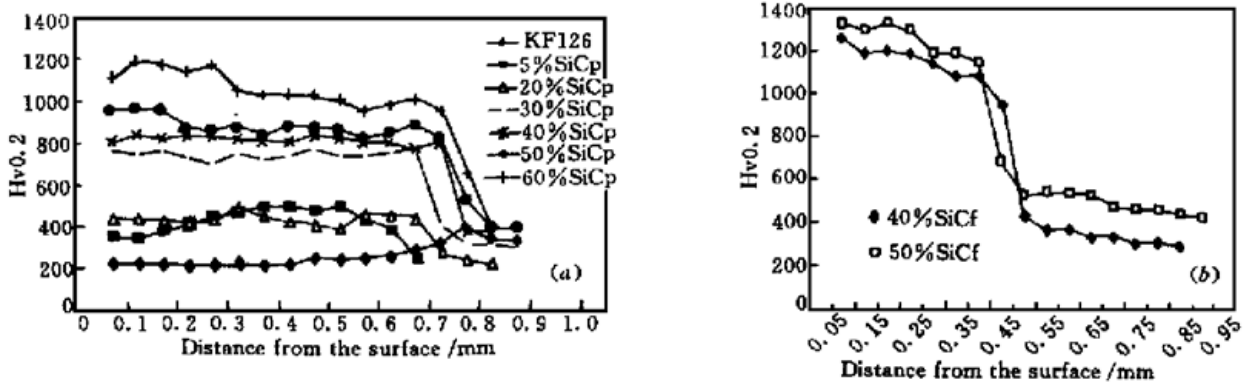


图 6 SiC_p (a) 和 SiC_f (b) 加入量不同时激光熔覆层的硬度分布

Fig. 6 Hardness of laser clad layers of different SiC_p contents (a) and of different SiC contents (b)

图 6 (b) 为加入纤维状 SiC_f 的熔覆层硬度曲线. 可见, 纤维状 SiC_f 的加入使熔覆层硬度大大提高, 其中 40% SiC_f 熔覆层硬度达到 1000~ 1250 Hv0.2, 50% SiC_f 达到 1100~ 1320 Hv0.2. 随着 SiC_f 加入量的增加硬度增大明显. 与颗粒状 SiC_p 熔覆层的硬度相比, 相同加入量条件下, 纤维强化效果更好. 如同样加入 40%, SiC_f 熔覆层硬度比 SiC_p 熔覆层高 200~ 400 Hv0.2, 加入 50% 时, SiC_f 熔覆层硬度比 SiC_p 熔覆层高 200~ 300 Hv0.2. 然而, 由于预置的 SiC_f 与不锈钢粉末是采用平涂的, 无振动夯实, SiC_f 松装密度低, 因此激光熔覆后, 熔覆层厚度较小, 约为 0.4 mm, 而粒子强化熔覆层由于 SiC_p 松装密度高, 熔覆厚度达到 0.6~ 0.7 mm.

3.3 熔覆层的强化机理分析

选用的不锈钢粉末是等离子喷涂用合金粉末, 由于含碳量较少(0.1%), 所获涂层硬度较低(一般在 300 Hv 左右), 主要用于耐腐蚀涂层. 本实验选用这种粉末作涂层基体相的目的是突出 SiC 的强化作用, 减少其他脆性相的出现. 由实验结果可见, SiC 加入的强化效果非常显著, 其强化机制表现在两个方面: 固溶强化和弥散强化.

熔覆层基体相为面心立方的奥氏体相. 由于 SiC 在激光加热过程中分解出的 Si 和 C, 并在随后的冷却中熔入基体相, 使基体相晶格产生了晶格畸变. 由于 Si, C 的原子尺寸与基体相中的 Fe, Ni, Cr 等元素相差较大, 其引起的畸变量也较大, 从而造成结构位错和层错等缺陷, 使奥氏体晶粒变形困难, 表现在滑移阻力大和孪晶生成困难, 造成了基体相的固溶强化. 另外, 激光熔覆过程是一个快速加热、快速冷却的过程, 熔入液相的元素可获得超固溶度的熔入量, 从而加大了固溶强化的效果. 当熔覆层被重新加热, 如搭接区, 超固溶的基体相就会析出碳化物, 以获得平衡. 故在搭接区会出现 FeSiC 析出相.

析出相 FeSiC 和未熔 SiC 造成了熔覆层的弥散强化. 而未熔 SiC 是熔覆层硬度显著提高的主要原因. 在激光熔覆过程中, 部分 SiC 熔化并熔入基体相, 其他未熔 SiC 在随后冷却中部分作为基体相的形核质点, 基体相由未熔 SiC 处向外生长, 构成了晶内的未熔 SiC; 还有部分未熔 SiC 存在于基体相的晶界处. 由于 SiC 硬度较高(2700 Hv), 而其周围基体相较软, 形成软基体上细小硬质点弥散分布的弥散强化效果.

参 考 文 献

- 1 A. Hirose, Y. Matsuhiro, M. Kotoh *et al.*. Laser-beam welding of SiC fibre-reinforced Ti-6Al-4V composite. *J. Materials Science*, 1993, **28**(2): 349~ 355
- 2 A. Bylica, J. Polit, I. Stefaniuk *et al.*. Creation of films enriched with SiC in steel by laser treatment. *SPIE*, 1994, **2202**: 552~ 555
- 3 Y. T. Pei, J. H. Ouyang, T. C. Lei *et al.*. Microstructure of laser-clad SiC-(Ni alloy) composite coating. *Materials Science & Engineering*, 1995, **A194**(2): 219~ 224
- 4 Zhang Siyu, Wang Biben, Zheng Kequan. A study on the laser cladding of WC-TiN-SiC-Co hard alloy and their strengthening mechanism. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1994, **43**(4): 678~ 682 (in Chinese)

Microstructure and Performance of the SiC/Stainless Steel Composite Coating Produced by Nd·YAG Laser Cladding

Yang Yongqiang

(Department of Mechatronic Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641)

Hau Chung Man

(Department of Manufacturing Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Kowloon, H.K.)

Abstract SiC reinforced iron matrix composite coatings have been successfully produced by using a 2 kW Nd·YAG laser on a 40Cr steel substrate, and microstructure analysis and performance testing of the coatings are carried out. There are two forms of SiC in the experiment: particle and fiber. By adjusting the adding content of SiC_p and of SiC_f, evolution of SiC of different forms during laser cladding, existing forms of SiC in cladding layers and affection on hardness of cladding layers are studied. The results show that during laser cladding, SiC of different forms is decomposed partially; with the increasing of the SiC adding content, the quantity of un-melt SiC increases and hardness of cladding layers improves. Comparing the hardness of SiC particle reinforced coating with the SiC fiber reinforced coating, the reinforcing effecting of SiC fiber is higher; the main reasons bring hardness remarkable improvement are disperse reinforcement of un-melt SiC and propitiation FeSiC, and solution reinforcement of decomposed Si, C.

Key words laser cladding, SiC reinforced iron matrix composite coating, microstructure and performance