

文章编号: 0258-7025(2004)07-0879-04

# 激光熔敷生成碳硅钛化合物及其组织性能研究

田永生, 陈传忠\*, 王德云, 王振林

(山东大学材料科学与工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要** 利用 CO<sub>2</sub> 连续激光对预涂石墨和硅混合粉末的 Ti-6Al-4V 合金进行了熔敷处理。金相分析发现熔敷层内形成了大量的化合物, X 射线衍射分析证实形成的化合物主要为 SiC, Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> 和 TiC 等。电子探针分析表明熔敷层内的初晶化合物主要由 SiC 和 TiC 组成, 共晶化合物则主要是 Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>。熔敷层与金属基体呈良好的冶金结合, 其硬度可达 2000 Hv<sub>0.1</sub>, 摩擦系数约为 0.3, 而基体的硬度约为 320 Hv<sub>0.1</sub>, 摩擦系数约 0.55。可见熔敷层较基体的硬度大为提高, 且其耐磨性能较好。激光工艺参数的改变影响着熔敷层的组织和性能, 调整工艺参数可获得无气孔和裂纹的熔敷层。

**关键词** 粉末冶金; 钛合金; 激光熔敷; 原位生成化合物; 组织结构; 摩擦系数

**中图分类号** TG 665 **文献标识码** A

## Study on Microstructures and Mechanical Properties of in-situ Formed Multiphase Coatings Produced by Laser Cladding of Titanium Alloy with Silicon and Graphite Mixed Powders

TIAN Yong-sheng, CHEN Chuan-zhong, WANG De-yun, WANG Zhen-lin

(School of Materials Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

**Abstract** A wear resistance multiphase coatings is fabricated by laser cladding of silicon and graphite mixed powders on the substrate of titanium alloy (Ti-6Al-4V). The microstructures and phases in the coatings are investigated by means of electron probe microanalysis (EPMA) and X-ray diffraction (XRD). The results show that a lot of compounds are formed in-situ in the coatings, which are metallurgically bonded to the substrate. The compounds in the coatings are chiefly composed of pre-eutectic SiC, TiC and eutectic Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>. The test results show that the hardness of the coatings is up to 2000 Hv<sub>0.1</sub>, much higher than that of the Ti-6Al-4V substrate (about 320 Hv<sub>0.1</sub>) and the friction coefficient of the coatings is about 0.3, lower than that of the substrate (about 0.55). Changing the parameters of laser cladding has an effect on the properties and microstructures of the claddings. Thus an ideal claddings freeing from the pores and cracks can be obtained by optimizing the cladding parameters.

**Key words** powder metallurgy; Ti alloys; laser cladding; in-situ forming compound; microstructure; friction coefficient

## 1 引 言

钛合金具有较高的比强度和良好的耐蚀、耐热等性能, 因而在航天、航空、海洋和化工机械等领域中得到了越来越广泛的应用。但钛合金的硬度相对较低而且摩擦系数也较大, 因而易产生粘着磨损等

弊病, 使它的潜在性能不能充分发挥。

利用激光对材料进行表面改性是近几十年新兴的技术, 并在表面熔凝处理、表面合金化和表面熔敷等方面取得了较大的进展。激光熔敷工艺主要是通过控制激光光束尺寸、能量密度及辐照时间以达到

收稿日期: 2003-07-22; 收到修改稿日期: 2003-12-11

作者简介: 田永生(1958—), 男, 山东人, 山东大学材料科学与工程学院副教授, 硕士, 现主要从事金属材料激光表面改性的研究。E-mail: tianyongsheng875@sohu.com

\* 通信联系人。E-mail: czchen@sdu.edu.cn

熔化涂层材料并使基材表面微熔,力求使涂层与基体呈冶金结合状态。前人所做的工作表明<sup>[1,2]</sup>,激光熔敷较喷涂有着较高的界面结合强度,并使工件耐磨和耐蚀性能有较大的改善。

在钛合金激光表面改性的研究方面,R. L. Sun等<sup>[3]</sup>在Ti-6Al-4V合金上预涂NiCrBSiC粉末后进行激光表面熔敷处理,制得以金属间化合物TiB<sub>2</sub>和TiC及M<sub>23</sub>(CB)<sub>6</sub>为增强相的表面改性层,使Ti-6Al-4V的表面硬度达到1000Hv。H. M. Wang等<sup>[4]</sup>在BT9钛金属基体上激光熔敷TiSiNi混合粉末,其表面形成Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>/NiTi<sub>2</sub>熔敷层,耐磨性大为提高。孙荣禄等<sup>[5,6]</sup>在Ti-6Al-4V合金表面激光熔覆NiCrBSi-TiC混合粉末,结果表明,在优化工艺参数下可获得连续、均匀、无裂纹和气孔的熔覆层。熔覆层由TiC,γ-Ni,M<sub>23</sub>(CB)<sub>6</sub>,CrB和Ni<sub>3</sub>B等相组成,其显微硬度平均值为980Hv,磨损率较基

体低一个数量级。

本试验通过在钛合金表面预涂碳、硅混合粉末,以期在激光处理后原位生成碳、硅和钛的化合物熔敷层,进而探讨熔敷层的硬度及抗磨性能。

## 2 试验方法

基体材料采用TC4(Ti-6Al-4V)合金,将试样的待熔敷表面用汽油及酒精清洗。熔敷材料为200目左右的碳粉和硅粉,按质量比1:2混合,使用前在研钵中研磨30min。采用聚乙烯醇将待熔敷材料调成糊状均匀涂覆于TC4表面,控制其厚度为0.5mm左右,晾干。

采用功率为5000W的横流式CO<sub>2</sub>连续激光器对试样(1~3)进行扫描,并同时吹入氩气保护。试验工艺参数见表1。

表1 激光熔覆试验参数

Table 1 Experimental parameters of laser cladding

Sample number	Sample specification /mm	Beam size /mm	Power /kW	Scanning speed /(mm/s)
1	9×9×10	φ4	2.0	15
2	9×9×10	12×2	3.0	3
3	9×9×50	12×2	2.5	5

## 3 试验结果与分析

### 3.1 组织分析

图1是对垂直于试样1的熔敷层表面所做的金相分析。图1(a)为熔敷层形貌,表明试样在断面上形成三个区:熔敷区、过渡区和热影响区。图1(b)为熔敷区表层组织,主要由大量的块状晶和共晶组织构成。图1(c)为熔敷区内层组织,主要由枝状晶和共晶组织构成。熔敷层内组织较为致密,未发现

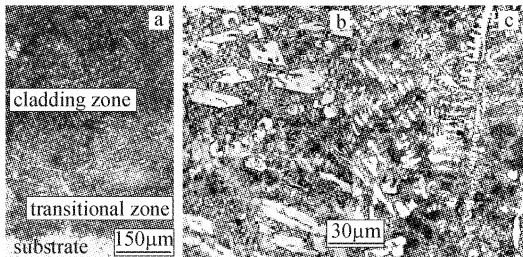


图1 试样1的金相组织

(a) 熔覆层全貌;(b) 熔覆区表层;(c) 熔覆区内层

Fig. 1 Microstructure of specimens No. 1

(a) whole morphology of coating;

(b) near surface; (c) near substrate

有裂纹和气孔产生。

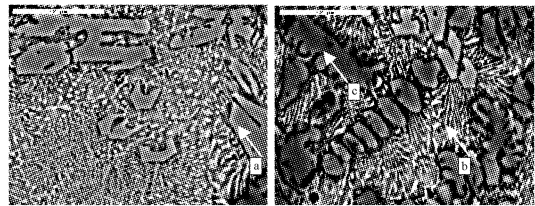


图2 试样1的二次电子形貌像与成分定点分析位置(箭头所示)

Fig. 2 Secondary electron imaging of cladding zone of specimen No. 1

图2是采用JXA-8800R电子探针对试样1的熔敷区表层和内层所做的二次电子像,可看出组织中的化合物共有三种类型:块状、树枝状和菊花状。表层组织由块状晶和细小的菊花状晶组成,而内层组织由较粗大的树枝晶和细小的菊花状晶组成。

蒋平等<sup>[7]</sup>曾在Ti-6Al-4V合金上预涂Si粉并进行激光表面合金化处理后,形成了以金属间化合物Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>为增强相的表面改性层,亦得到了菊花状的Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>/(β-Ti)共晶组织。

图 3 是利用 JXA-8800R 电子探针对试样 2 的过渡区所做的形貌及成分面分布像。可看出在过渡区中化合物的含量逐渐递减,然而组织致密均匀,即

熔敷层和基体呈现良好的冶金结合。另一方面分析图 3 的(b)和(c)可知,粗大的枝晶中含有较高的 C;细小的共晶化合物中含 Si 较高,但含碳量很低。

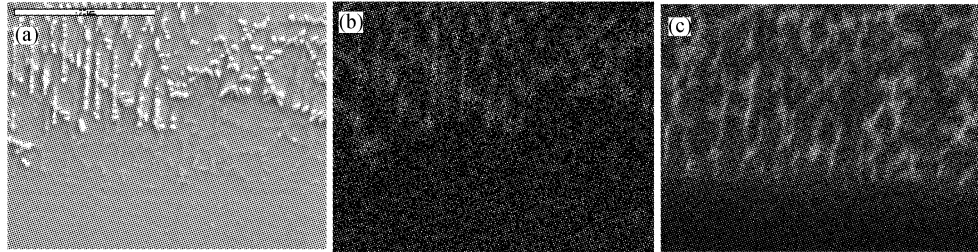


图 3 试样 2 过渡区的电子探针形貌和成分面分布

(a) 过渡区二次电子形貌像;(b) C 的面分布;(c) Si 的面分布

Fig. 3 Morphology and distribution of elemental maps taken by EPMA from transitional zone of specimen No. 2

(a) secondary electron imaging of cladding zone; (b) distribution of element C; (c) distribution of element Si

### 3.2 物相分析

图 4 是采用 D/max-rC 型 X 射线衍射仪对试样 1 和试样 2 表面所作的物相分析,可看出 SiC, Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> 及 TiC 的衍射峰值较高,表明在熔敷层中生成了较多的 SiC, Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> 和 TiC 等化合物。

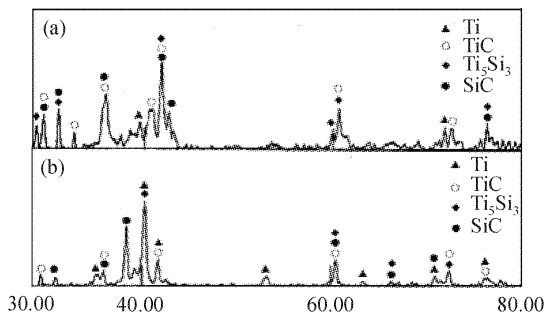


图 4 X 射线衍射图谱

(a) 试样 1;(b) 试样 2

Fig. 4 X-ray diffraction spectrum of specimens

(a) No. 1; (b) No. 2

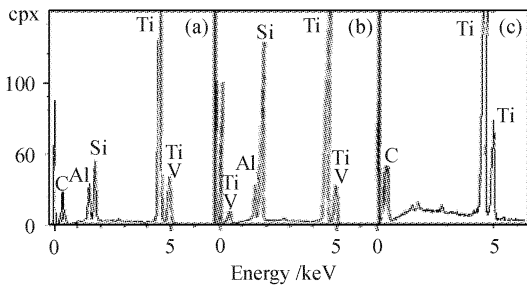


图 5 试样 1 中化合物的定点成分分析能谱图

Fig. 5 Energy spectrum microprobe analysis of composition of specimen No. 1

图 5 是用电子探针对试样 1 的熔敷区表层块状

化合物和内层树枝状化合物及细碎的菊花状化合物所作的成分定点能谱分析(分析定点见图 2 箭头所示)。图 5(c)中只有 C 和 Ti 的能谱峰值,可知树枝状化合物应是 TiC;图 5(b)中 Si 的峰值很高且不含 C(与图 3 所示相同),可知菊花状化合物中应为 Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>;而图 5(a)表明 C 和 Si 的能谱峰值较高,故可推知块状化合物应为 SiC。

### 3.3 性能分析

图 6 是对试样所作的硬度测试。可知熔敷区的厚度大约为 0.5 mm,其表层硬度可达 2000 Hv<sub>0.1</sub>;过渡区的硬度约为 1000 Hv<sub>0.1</sub>。试样 2 的过渡区较宽,即表明试样 2 熔敷层中的合金元素向基体内的扩散程度较大。从表 1 可看出试样 1 激光扫描速度较快,而试样 2 的较慢,这表明激光工艺参数影响着基体对熔敷层稀释度的大小。

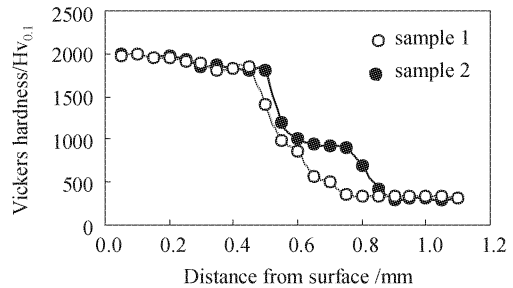


图 6 试样 1 和试样 2 的熔覆层显微硬度

Fig. 6 Microhardness of cladding of sample No. 1 and No. 2

图 7 是采用 M200 摩擦试验机对试样 3 所作的摩擦系数测定数据绘制的时间关系曲线。试验载荷为 10 kg,转速为 400 r/min,时间为 30 min。可看

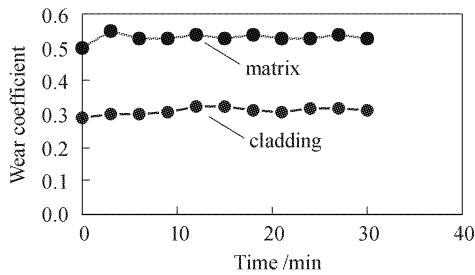


图7 摩擦系数与时间的关系曲线

Fig. 7 Relationship between friction coefficient and time

出熔敷层的摩擦系数相对较小,仅 0.3 左右,而基体的摩擦系数大于 0.5,且均随时间变化不大。

## 4 结 论

1) 对预涂石墨粉和硅粉的 TC4 合金进行激光熔敷处理后,熔敷层原位生成了大量的块状晶、枝状晶和菊花状共晶化合物,采用 X 射线衍射和电子探针等分析方法知形成的块状晶化合物为 SiC,枝状晶为 TiC,而细小的菊花状共晶则主要由  $Ti_5Si_3/(\beta-Ti)$  等组成。

2) 激光工艺参数的改变影响着熔敷层的性能,调整工艺参数可获得组织致密、无裂纹和气孔的熔敷层。激光熔敷可使涂层与金属基体实现冶金结合。

3) 熔敷层比基体有着较高的硬度,且熔敷层的摩擦系数较小。

## 参 考 文 献

- 1 Y. T. Pei, J. H. Ouyang, T. C. Lei. Laser cladding of  $ZrO_2$ —(Ni alloy) composite coating [J]. *Surface and Coatings Technology*, 1996, **81**(2~3):131~135
- 2 A. H. Wang, T. M. Yue. YAG laser cladding of an Al-Si alloy onto an Mg/SiC composite for the improvement of corrosion resistance [J]. *Composites Science and Technology*, 2001, **61**(11):1549~1554
- 3 R. L. Sun, D. Z. Yang, L. X. Guo *et al.*. Microstructure and wear resistance of NiCrBSi laser clad layer on titanium alloy substrate [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2000, **132**(2~3):251~255
- 4 H. M. Wang, Y. F. Liu. Microstructure and wear resistance of laser clad  $Ti_5Si_3/NiTi_2$  intermetallic composite coating on titanium alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2002, **338**(1~2):126~132
- 5 Sun Ronglu, Guo Lixin, Dong Shangli *et al.*. Study on microstructure of laser-clad NiCrBSi-TiC coating on the surface of titanium alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(3):275~278  
孙荣禄,郭立新,董尚利等. 钛合金表面激光熔覆 NiCrBSi-TiC 复合涂层的组织研究[J]. 中国激光, 2001, **A28**(3):275~278
- 6 Sun Ronglu, Liu Yong, Yang Dezhuan. Microstructure and tribological properties of NiCrBSi-TiC clad layer on titanium alloy substrate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7):659~662  
孙荣禄,刘勇,杨德庄. 钛合金表面激光熔覆 NiCrBSi-TiC 复合涂层的组织和摩擦磨损性能[J]. 中国激光, 2003, **30**(7):659~662
- 7 P. Jiang, J. J. Zhang. Wear-resistant  $Ti_5Si_3/Ti$  composite coating made by laser surface alloying [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2000, **29**(4):269~272  
蒋平,张继娟. Ti-6Al-4V 合金化制备  $Ti_5Si_3/Ti$  耐磨复合材料涂层研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2000, **29**(4):269~272