

文章编号: 0258-7025(2003)07-0659-04

# 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

孙荣禄<sup>1</sup>, 刘勇<sup>2</sup>, 杨德庄<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 天津工业大学机械电子学院, 天津 300160; <sup>2</sup> 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 在 Ti-6Al-4V 合金表面激光熔覆 NiCrBSi-TiC 复合涂层, 利用扫描电镜和透射电镜分析了熔覆层的微观组织, 测试了熔覆层在大气和真空 ( $P = 10^{-5}$  Pa) 环境中的摩擦磨损性能。结果表明, 熔覆层的组织是在  $\gamma$ -Ni 树枝晶和  $\gamma$ -Ni +  $M_{23}$ (CB)<sub>6</sub> 共晶的基体上弥散地分布着未熔 TiC 颗粒和液析 TiC。未熔 TiC 颗粒与基体  $\gamma$ -Ni 之间具有外延生长的结合界面, 液析 TiC 与基体  $\gamma$ -Ni 结合界面干净、光滑。熔覆层在大气环境中的摩擦系数在 0.3~0.4 之间, 磨损率比 Ti-6Al-4V 合金降低约一个数量级, 在真空环境中的摩擦系数在 0.4~0.5 之间, 磨损率比 Ti-6Al-4V 合金降低约一倍。

**关键词** 激光技术; 钛合金; 激光熔覆; NiCrBSi-TiC 复合涂层; 显微组织; 摩擦磨损性能

**中图分类号** TG 665 **文献标识码** A

## Microstructure and Tribological Properties of NiCrBSi-TiC Laser Clad Layer on Titanium Alloy Substrate

SUN Rong-lu<sup>1</sup>, LIU Yong<sup>2</sup>, YANG De-zhuang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Mechanical and Electronic Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China

<sup>2</sup> School of Material Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

**Abstract** Laser cladding of NiCrBSi-TiC composite coatings on Ti-6Al-4V alloy substrate was carried out, and the microstructure of the clad layer was characterized by SEM and TEM. The friction and wear properties of the clad layer were examined in atmosphere and in vacuum ( $10^{-5}$  Pa). The results showed that in the clad layer, the dispersive undissolved TiC particles and liquid-precipitated TiC were distributed in the matrix consisting of  $\gamma$ -Ni dendrites and  $\gamma$ -Ni +  $M_{23}$ (CB)<sub>6</sub> eutectics, the liquid-precipitated TiC having a clear and smooth interface with matrix. The epitaxial growth of TiC was found at the interface of undissolved TiC particles with  $\gamma$ -Ni matrix. In atmosphere, the friction coefficients of the clad layer were ranged from 0.3 to 0.4, and the wear rate of clad layer was a magnitude lower than that of Ti-6Al-4V alloy. In vacuum, the friction coefficients of clad layer varied from 0.4 to 0.5, and the wear rate of clad layer was half as that of Ti-6Al-4V alloy.

**Key words** laser technique; titanium alloy; laser cladding; NiCrBSi-TiC composite coatings; microstructure; friction and wear properties

## 1 引言

钛合金具有比强度高、耐腐蚀性好等优点, 不仅是航天、航空工业中十分重要的结构材料, 而且在汽

车、船舶和化工等行业中也得到了广泛的应用。但是, 钛合金的耐磨性能较差, 限制了它在摩擦构件上的应用。

激光熔覆陶瓷颗粒增强的金属基复合涂层将陶

收稿日期: 2002-12-19; 收到修改稿日期: 2003-01-27

基金项目: 天津市高等学校科技发展基金资助项目(项目编号: 020418)。

作者简介: 孙荣禄(1964—), 男, 天津工业大学机械电子学院副教授, 博士, 主要从事材料激光加工技术研究。E-mail: rlsuntjpu@vip.sina.com

瓷材料的高硬度、高化学稳定性和金属材料的高延性、高强度有机地结合在一起,可以显著提高金属材料表面的耐磨性能<sup>[1~4]</sup>。本文作者曾采用 9 kW CO<sub>2</sub> 激光在 Ti-6Al-4V 合金表面获得了与基底结合良好的 NiCrBSi-TiC 熔覆层<sup>[5]</sup>,并分析了熔覆层的微观组织特征<sup>[6]</sup>。报道了熔覆层在不同环境气氛压力下的摩擦磨损性能,讨论了熔覆层的磨损机制。

## 2 试验方法

基底材料采用 Ti-6Al-4V 合金,试样尺寸为  $\phi 30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。熔覆材料采用 TiC:NiCrBSi=1:2(体积比)的机械混合粉末,其中 NiCrBSi 合金粉末的化学成分(wt.-%)为:17.0Cr, 3.5B, 4.0Si, 1.0C, <12Fe, 余为 Ni;粒度为-140~+320。TiC 粉末的化学成分(wt.-%)为:总含碳量 19.85,游离碳小于 0.2;颗粒直径为 1~10  $\mu\text{m}$ 。采用粘结法将熔覆材料预置在基底试样表面,预置厚度为 1 mm。

激光熔覆试验采用 ML-108 型 9 kW 横流 CO<sub>2</sub> 激光器。激光熔覆工艺参数为:激光功率  $P = 3 \sim 5 \text{ kW}$ ,扫描速度  $V = 5 \sim 15 \text{ mm/s}$ ,激光束斑直径  $D = 6 \text{ mm}$ ,即激光比能在  $3.3 \sim 16.7 \text{ kJ/cm}^2$  之间。多道搭接激光熔覆的搭接率为 30%。

利用 Hitachi S-570 型扫描电镜和 Philips CM12 型透射电镜分析熔覆层的微观组织。利用 УТИ TB-100 型销-盘式真空摩擦磨损试验机测试

熔覆层在大气和真空 ( $P = 10^{-5} \text{ Pa}$ ) 环境中的摩擦磨损性能。销为多道搭接激光熔覆试样,对磨盘为 YG8B 硬质合金。摩擦工作参数为:法向载荷  $N = 50 \text{ N}$ ,滑动速度  $V = 0.8 \text{ m/s}$ ,滑动距离  $L = 500 \text{ m}$ 。用感量为  $10^{-5} \text{ g}$  的分析天平测量磨损失重量  $\Delta m$ ,并依此计算磨损率  $I = \Delta m/L$ 。

## 3 试验结果

### 3.1 熔覆层的显微组织

图 1 示出了不同激光比能熔覆层的抛光表面形貌。由于 TiC 颗粒的硬度 ( $H_v = 3000 \sim 3200$ ) 远高于熔覆层基体 NiCrBSi 合金的硬度 ( $H_v = 650 \sim 800$ ),TiC 颗粒显露在熔覆层抛光表面。从图中可以看出,TiC 颗粒均匀地分布在熔覆层中,但当激光比能不同时,TiC 颗粒的尺寸和形貌存在明显的差别。当激光比能较小时,TiC 颗粒尺寸较大,且具有棱角特征。随激光比能的增加,TiC 颗粒的尺寸减小,边缘变得圆滑,同时熔覆层中出现了一些白亮的质点状颗粒和细小的树枝晶(如图 1(b)和(c)中箭头所示)。图 2 示出了熔覆层中质点状颗粒和树枝晶的 TEM 形貌及其选区电子衍射斑点。标定表明,质点状颗粒和树枝晶为 TiC 相。上述分析表明,在激光熔覆加热过程中 TiC 颗粒发生了部分溶解,在冷却过程中溶解在 Ni 基合金熔体中的 Ti 原子和 C 原子又以 TiC 的形式重新析出。

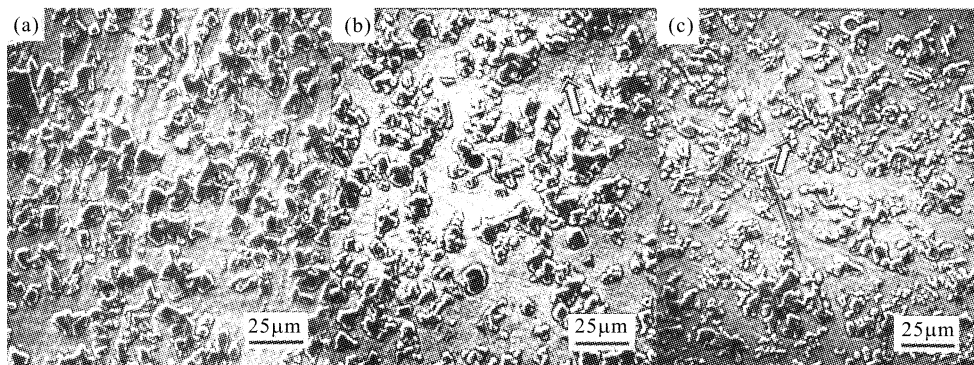


图 1 激光熔覆层抛光表面形貌(SEM)

Fig. 1 SEM micrographs showing the polished surface morphology of laser clad layer

(a)  $P/VD = 6.2 \text{ kJ/cm}^2$ ; (b)  $P/VD = 8.3 \text{ kJ/cm}^2$ ; (c)  $P/VD = 12.1 \text{ kJ/cm}^2$

图 3(a)为熔覆层基体组织的 TEM 照片。从图中可以看出,熔覆层基体组织由树枝状初晶( $\gamma$ -Ni 固溶体)和共晶组成。图 3(b)和(c)分别为共晶组织中亮衬度相( $C_1$ )和暗衬度相( $C_2$ )的选区电子衍射斑点。标定表明,共晶组织中亮衬度相为  $\gamma$ -Ni 固

溶体,暗衬度相为  $M_{23}(\text{CB})_6$ 。

### 3.2 熔覆层摩擦磨损性能

表 1 列出了 NiCrBSi-TiC 激光熔覆层及 Ti-6Al-4V 合金在大气和真空环境中的摩擦系数和质量磨损率。可见,熔覆层在大气环境中的摩擦系数

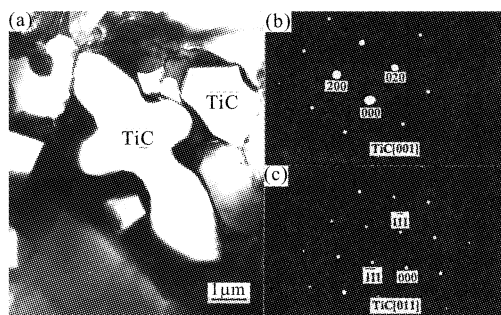


图 2 液析 TiC 的 TEM 形貌

Fig. 2 TEM micrographs showing morphology of liquid-precipitated TiC ( $P/VD = 8.3 \text{ kJ/cm}^2$ )  
(a) bright-field image; (b) and (c) SADP of TiC

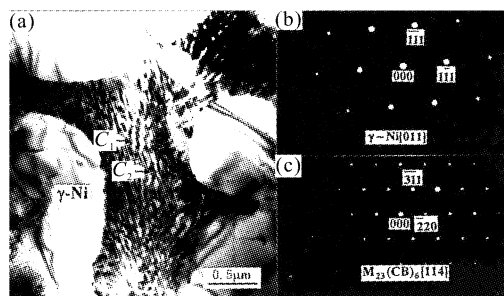
图 3  $\gamma$ -Ni 树枝晶和  $\gamma$ -Ni+ $M_{23}(\text{CB})_6$  共晶的 TEM 形貌

Fig. 3 TEM micrographs showing morphology of  $\gamma$ -Ni dendrites and  $\gamma$ -Ni+ $M_{23}(\text{CB})_6$  eutectic ( $P/VD = 8.3 \text{ kJ/cm}^2$ )  
(a) bright-field image; (b) SADP of  $\gamma$ -Ni; (c) SADP of  $M_{23}(\text{CB})_6$

表 1 NiCrBSi-TiC 激光熔覆层和 Ti-6Al-4V 合金的摩擦系数和质量磨损率

Table 1 Friction coefficients and wear rates of NiCrBSi-TiC laser clad layer and Ti-6Al-4V alloy

	In atmosphere			In vacuum ( $P = 10^{-5}$ )		
	$\mu$	$\Delta m / \text{mg}$	$I / \text{mg/m}$	$\mu$	$\Delta m / \text{mg}$	$I / \text{mg/m}$
NiCrBSi-TiC clad layer	0.3~0.4	2.54	$5.08 \times 10^{-3}$	0.4~0.5	3.25	$6.50 \times 10^{-3}$
Ti-6Al-4V alloy	0.5~0.55	22.34	$4.47 \times 10^{-2}$	0.7~0.8	6.78	$1.36 \times 10^{-2}$

在 0.3~0.4 之间,在真空环境中的摩擦系数在 0.4~0.5 之间,均低于 Ti-6Al-4V 合金在大气和真空环境中的摩擦系数。熔覆层在大气环境中的磨损率比 Ti-6Al-4V 合金降低约一个数量级,熔覆层在真空环境中的磨损率略高于在大气环境中的磨损率,比 Ti-6Al-4V 合金降低约一倍。

## 4 讨论

### 4.1 熔覆层的强化机制

上述磨损试验表明,NiCrBSi-TiC 激光熔覆层不仅具有低的摩擦系数,而且具有高的耐磨性能。这是由于熔覆层中存在大量未熔 TiC 颗粒和液析 TiC 颗粒。图 4(a)和(b)分别示出了未熔 TiC 颗粒和液析 TiC 颗粒与基体  $\gamma$ -Ni 结合界面的 TEM 形貌。从图 4(a)可以看出,在未熔 TiC 颗粒表面存在外延生长现象。生长物呈锯齿状,长度在 1~10 nm 之间,使 TiC 颗粒与基体  $\gamma$ -Ni 之间形成了犬牙交错的结合界面。分析认为,外延生长物是在未熔 TiC 颗粒表面非自发形核生长的液析 TiC。从图 4(b)中可以看出,液析 TiC 颗粒与基体  $\gamma$ -Ni 结合界面干净,无反应物和析出相存在。这两种类型的相界面

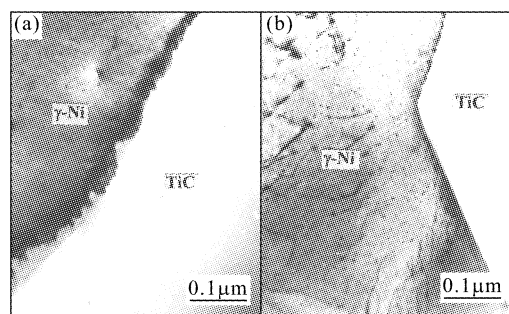
图 4 未熔 TiC 颗粒(a)和液析 TiC(b)与基体  $\gamma$ -Ni 界面的 TEM 形貌

Fig. 4 TEM micrographs showing the interfaces of (a) undissolved and (b) liquid-precipitated TiC particles with  $\gamma$ -Ni matrix ( $P/VD = 8.3 \text{ kJ/cm}^2$ )

均使 TiC 颗粒及基体  $\gamma$ -Ni 之间形成了牢固的结合。熔覆层中均匀分布且与基体结合牢固的 TiC 颗粒起到了弥散强化质点的作用,构成了对熔覆层基体磨损具有保护作用的骨架,有效地降低了熔覆层基体的磨损。

### 4.2 熔覆层磨损机制

图 5(a)和(b)分别示出了在大气和真空环境中与 NiCrBSi-TiC 激光熔覆层对磨的 YG8B 硬质合金

的磨损表面形貌。从图中可以看出,在大气环境中的磨损表面上存在黑色的磨屑,在真空环境中的磨损表面上几乎观察不到磨屑,但存在明显的材料“粘附转移”现象。这表明在大气和真空环境中磨损机制不同。在大气环境中磨损时,摩擦副表面存在氧化膜,接触和摩擦发生在氧化膜之间,在摩擦过程中氧化膜被磨掉并不断再生,被磨掉的氧化膜一部分以磨屑的形式排除,另一部分残留在对磨面中。在真空环境中磨损时,摩擦副表面的氧化膜很快被去除,且难以再生,发生清洁表面间的直接接触,加之真空环境中的散热条件较差(无对流散热),摩擦热难以散失,使磨面间的粘着严重,形成粘着结点,在切向力的作用下结点被剪断,产生材料“粘附转移”现象。

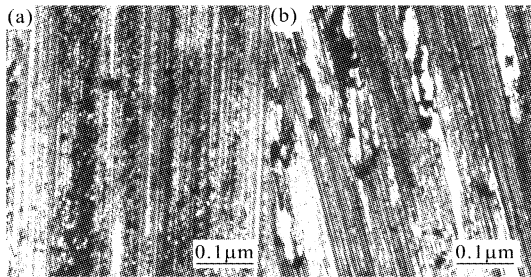


图5 YG8B 硬质合金对磨盘磨损表面形貌

Fig. 5 Worn surface of YG8B hard alloy  
(a) in atmosphere; (b) in vacuum ( $P = 10^{-5}$  Pa)

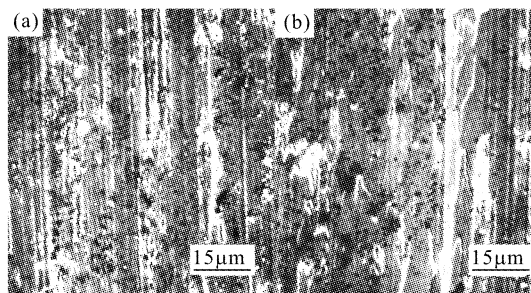


图6 NiCrBSi-TiC 激光熔覆层磨损表面形貌(SEM)

Fig. 6 SEM micrographs showing worn surfaces of the NiCrBSi-TiC laser clad layer  
(a) in atmosphere; (b) in vacuum ( $P = 10^{-5}$  Pa)

图6(a)和(b)分别示出了NiCrBSi-TiC激光熔覆层在大气和真空环境中的磨损表面形貌。从图中可以看出,无论在大气还是在真空环境中激光熔覆

层的磨损表面均存在细小的划痕,表明存在磨粒磨损。这是由于熔覆层基体磨损后将导致TiC颗粒脱落,脱落的TiC颗粒起到了磨粒的作用,在磨损过程中对基体产生显微切削。

由上述分析可见,NiCrBSi-TiC激光熔覆层在大气环境中的磨损机制主要为氧化磨损和磨粒磨损,在真空环境中为粘着磨损和磨粒磨损。

## 5 结 论

1) Ti-6Al-4V合金表面NiCrBSi-TiC激光熔覆层的组织是在 $\gamma$ -Ni树枝晶和 $\gamma$ -Ni+ $M_{23}$ (CB)<sub>6</sub>共晶的基体上弥散地分布着未熔TiC颗粒和液析TiC。

2) 熔覆层在大气中的摩擦系数在0.3~0.4之间,磨损率比Ti-6Al-4V合金降低约一个数量级,在真空中的摩擦系数在0.4~0.5之间,磨损率比Ti-6Al-4V合金降低约一倍。

3) 熔覆层在大气环境中的磨损机制主要为氧化磨损和磨粒磨损,在真空环境中的磨损机制为粘着磨损和磨粒磨损。

## 参 考 文 献

- 1 G. Abbas, D. R. F. West. Laser surface cladding of stellite and stellite-SiC composite deposits for enhanced hardness and wear [J]. *Wear*, 1991, **143**(2):353~363
- 2 Ma Naiheng, Ling Gongying, Su Junyi. Sliding friction and wear behavior of laser cladding in-situ synthesis TiC/Al composite layer [J]. *Tribology* (摩擦学学报), 2002, **22**(4):308~310 (in Chinese)
- 3 J. H. Abboud, D. R. F. West. Ceramic-metal composites produced by laser surface treatment [J]. *Materials Science and Technology*, 1989, **5**(7):725~728
- 4 Zhang Song, Wang Maocai, Wu Weitao *et al.*. Microstructure and wear performance of laser clad surface TiC/Ti composite on Ti alloy [J]. *Tribology* (摩擦学学报), 1999, **19**(1):18~22 (in Chinese)
- 5 R. L. Sun, D. Z. Yang, L. X. Guo *et al.*. Laser cladding of Ti-6Al-4V alloy with TiC and TiC+NiCrBSi powders [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2001, **135**:307~312
- 6 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* (中国激光), 2001, **A28**(3):275~278 (in Chinese)