

# TC4 钛合金表面激光熔覆掺 $Y_2O_3$ 复合涂层的 显微组织和性能

马永<sup>a</sup>, 朱红梅<sup>a</sup>, 孙楚光<sup>a</sup>, 廖帮亮<sup>a</sup>, 申龙章<sup>a</sup>, 何彬<sup>a</sup>, 朱卫华<sup>b</sup>, 王新林<sup>a,b</sup>

(南华大学 a.机械工程学院 b.电气工程学院, 湖南 衡阳 421001)

**摘要:** **目的** 提高钛合金表面的耐磨性能。**方法** 在  $TiB_2:TiC=1:3$  的粉末配比下, 添加不同质量分数  $Y_2O_3$  稀土氧化物, 制备成膏状混合粉末。采用 5 kW 横流  $CO_2$  激光器, 在 TC4 钛合金表面激光熔覆掺  $Y_2O_3$  的  $TiB_2$  和  $TiC$  粉末, 制备耐磨性复合涂层。通过扫描电子显微镜 (SEM)、X 射线能谱仪 (EDS)、X 射线衍射仪 (XRD) 对激光熔覆层的微观形貌和组织成分进行了分析; 用显微维氏硬度计对熔覆层的显微硬度进行了测量; 用万能摩擦磨损试验机对熔覆层的耐磨性能进行了测试。**结果** 添加 4%  $Y_2O_3$  后, 熔覆层中部组织明显细化, 结合区由致密组织结构转变为晶须网状结构; 熔覆层的最高显微硬度为  $1404.6HV_{0.2}$ , 是基体的 3.7 倍; 熔覆层的磨损量减少了 66.67%, 且其摩擦系数有明显的降低。**结论** 添加 4%  $Y_2O_3$  对 TC4 钛合金表面激光熔覆  $TiB_2/TiC$  复合熔覆层耐磨性能有显著的提高。

**关键词:** TC4 钛合金; 激光熔覆; 复合涂层; 显微组织; 显微硬度; 耐磨性能

**中图分类号:** TG174.44; TN249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)06-0238-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.06.038

## Microstructure and Properties of $Y_2O_3$ -doped Laser Cladded Composite Coating on TC4 Titanium Alloy

MA Yong<sup>a</sup>, ZHU Hong-mei<sup>a</sup>, SUN Chu-guang<sup>a</sup>, LIAO Bang-liang<sup>a</sup>, SHEN Long-zhang<sup>a</sup>, HE Bin<sup>a</sup>,  
ZHU Wei-hua<sup>b</sup>, WANG Xin-lin<sup>a,b</sup>

(a.School of Mechanical Engineering,

b.School of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve wear resistance of TC4 titanium alloy. Pasty mixed powder was prepared at a proper ratio of  $TiB_2:TiC$  (1:3) and adding  $Y_2O_3$  rare earth oxide in different mass fractions. Wear resistant composite coating was prepared by laser cladding  $Y_2O_3$ -doped  $TiB_2$  and  $TiC$  powder on the surface of TC4 titanium alloy using 5 kW continuous wave  $CO_2$  laser. Microstructure and composition of the laser cladding layers were analyzed with scanning electron microscope (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS) and X-ray diffractometer (XRD); microhardness of the laser cladding layer was measured with Vickers hardness tester; and wear resistance was tested with universal friction and wear tester. After 4%  $Y_2O_3$  was added,

收稿日期: 2017-01-23; 修订日期: 2017-03-16

Received: 2017-01-23; Revised: 2017-03-16

基金项目: 湖南省自然科学基金 (2015JJ6098)

Fund: Supported by the Hunan Provincial Natural Science Fund (2015JJ6098)

作者简介: 马永 (1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光加工技术方面的研究。

Biography: MA Yong (1989—), Male, Master, Research focus: laser machining technology.

通讯作者: 王新林 (1970—), 男, 博士研究生, 教授, 主要从事激光加工技术方面的研究。

Corresponding author: WANG Xin-lin (1970—), Male, Doctor, Professor, Research focus: laser machining technology.

grain size of the middle structure was greatly refined; microstructure of the bonding zone was transformed from compact structure to reticular whisker structure; maximum microhardness of the cladding layer was  $1404.6HV_{0.2}$ , 3.7 times as high as that of TC4 substrate; wear loss of the cladding layer decreased by 66.67%, and the friction coefficient decreased remarkably. Wear resistance of the laser cladded TiC/TiB composite cladding coating on the surface of TC4 titanium alloy can be improved significantly by adding 4%  $Y_2O_3$ .

**KEY WORDS:** TC4 titanium alloy; laser cladding; composite coating; microstructure; microhardness; wear resistance

TC4 钛合金具有机械性能优良、抗腐性能优异和生物相容性好等特点,被广泛应用于航空、航天、石油产业、海洋采矿、医疗器械等领域<sup>[1-4]</sup>。但是,其较低的硬度和较差的抗摩擦磨损性能极大地限制了其应用。近年来,应用激光熔覆技术在 TC4 钛合金表面原位制备复合陶瓷涂层成为研究的热点。钛合金表面原位制备复合陶瓷涂层体系中, TiC/TiB 因具有高弹性模量、与钛相近的密度和优异的结合性能而被广泛地用作增强相,以改善钛合金的耐磨性能<sup>[5]</sup>。国内外一般采用  $B_4C+Ti$ 、 $C+BN$  等粉末体系,通过激光熔覆原位制备 TiB/TiC 复合陶瓷涂层。如有研究者<sup>[6]</sup>选用  $B_4C+Ti$  粉末,在 TC4 钛合金表面激光熔覆原位制备了 TiB/TiC 复合涂层。有研究者<sup>[7]</sup>选用  $C+BN$  混合粉末,在 TC4 钛合金表面激光熔覆原位制备 TiB/TiC 复合涂层,但采用  $TiB_2/TiC$  粉末体系制备 TiB/TiC 复合涂层鲜有报道。

稀土及其氧化物在表面工程应用中具有净化杂质、细化组织、合金化等作用,而且能改善激光熔覆层的组织和性能<sup>[8-9]</sup>。 $Y_2O_3$  和  $CeO_2$  为表面工程研究中最常用的两种掺杂稀土氧化物,但添加  $Y_2O_3$  的研究相对较少。本课题前期探索激光熔覆制备 TiB/TiC 复合涂层时,熔覆层内有存在杂质、组织分布不致密等问题。为了改善这些问题,本研究在前期课题的基础上<sup>[10]</sup>,在  $TiB_2/TiC$  粉末体系中添加稀土氧化物  $Y_2O_3$ ,研究了稀土氧化物  $Y_2O_3$  对涂层微观组织、物相组成、显微硬度和耐磨性能的影响。

## 1 实验材料与方法

激光熔覆实验以 TC4 钛合金为基材,试样尺寸为  $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 。试样表面经过抛光处理后,用装有丙酮和酒精混合溶液的超声波清洗机进行清洗。熔覆粉末为  $TiB_2$  粉末(纯度为 99.5%,粒度为  $6\text{ }\mu\text{m}$ )、TiC 粉末(纯度为 99.9%,粒度为  $200\text{ nm}$ )与  $Y_2O_3$  粉末(纯度为 99.5%,粒度为  $2\text{ }\mu\text{m}$ ),粘结剂为 2123 酚醛树脂。在课题前期探索出的最优粉末配比  $TiB_2:TiC=1:3$  的条件下,添加不同质量分数的  $Y_2O_3$  粉末(0%、3%、4%、5%、6%、7%和 8%),制备膏状混合物。采用预置法在试样表面预置厚度为

0.6 mm 的涂层,然后在真空干燥箱中干燥 10 h。激光熔覆实验采用 5 kW 横流 TJ-HL-T5000 型  $CO_2$  激光器。在熔覆实验基础上,得到优化工艺参数为:激光功率  $P=2.3\text{ kW}$ 、扫描速度  $v=8\text{ mm/s}$ 、光斑直径  $D=5\text{ mm}$ 、搭接率 40%,激光熔覆在流速为  $10\text{ L/min}$  的 Ar 氛围下进行。

激光熔覆实验后,用电火花线切割机,沿垂直于激光扫描方向进行切割。然后对横截面进行研磨、抛光、腐蚀,获得熔覆层横截面金相试样。采用 JSM-6490LA 型扫描电镜观察熔覆层的微观组织;用 XD-3 型 X 射线衍射仪对熔覆层物相进行分析,管电压为 35 kV,管电流为 25 mA,衍射角为  $20^\circ \sim 90^\circ$ 。用 HXS-1000TAY 型维氏显微硬度仪测量熔覆层和基体硬度,加载砝码质量为 200 g,加载时间为 15 s。用 MMW-1 立式万能摩擦磨损试验机检测熔覆层摩擦磨损性能,载荷力为 30 N,作用 20 min。然后用电子天平称量试样磨损前后的质量。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 $Y_2O_3$ 含量对激光熔覆层的影响

图 1 为添加不同质量分数  $Y_2O_3$  粉末的熔覆层显微组织。由图 1a、1b 可见,  $Y_2O_3$  的添加含量为 3%~4%时,微观组织随着  $Y_2O_3$  添加量的增加变得细小、致密。由图 1c、1d、1e、1f 可见,当  $Y_2O_3$  的添加含量为 5%~8%时,涂层中出现了气孔、裂纹等缺陷。这是因为适量的稀土氧化物有净化作用,但过多的稀土氧化物与杂质的生成物在熔池凝固前不易全部上浮至渣中,易造成气孔、裂纹等缺陷<sup>[11]</sup>。由此可见,当  $Y_2O_3$  的添加量为 4%时,涂层无气孔、无裂纹且组织细小、致密,故本研究中  $Y_2O_3$  的合适添加量为 4%,在下面的分析中以添加 4%  $Y_2O_3$  的熔覆层为对象。未添加  $Y_2O_3$  的熔覆层标为涂层 1,添加 4%  $Y_2O_3$  的熔覆层标为涂层 2。

### 2.2 熔覆层的微观组织

图 2 为涂层 1、2 的熔覆层表面形貌。图 2a—2c 分别为涂层 1 的熔覆层表层、熔覆层中部、结合区的表面形貌图,图 2a 为熔覆层表层组织,主要以胞状

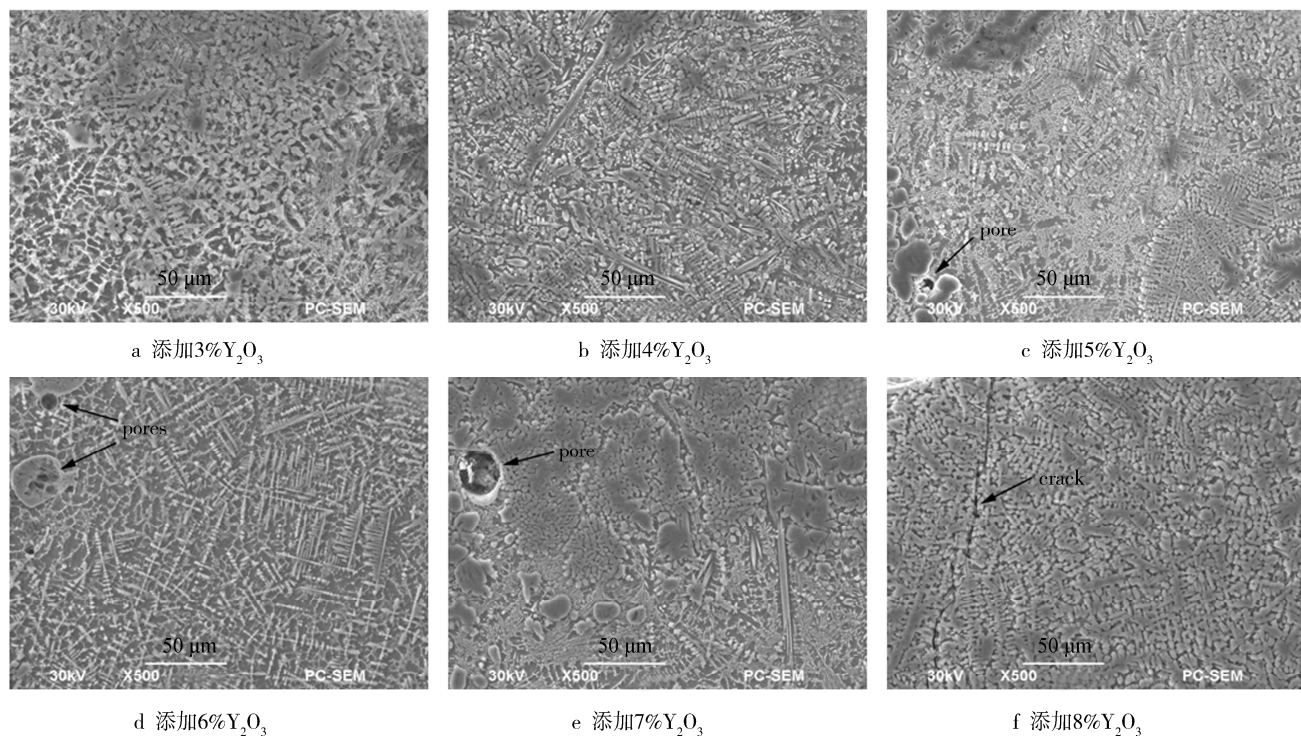


图1 激光熔覆层的 SEM 组织图片

Fig.1 SEM micrograph of laser cladding coating: a) adding 3%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, b) adding 4%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, c) adding 5%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, d) adding 6%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, e) Adding 7%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, f) Adding 8%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

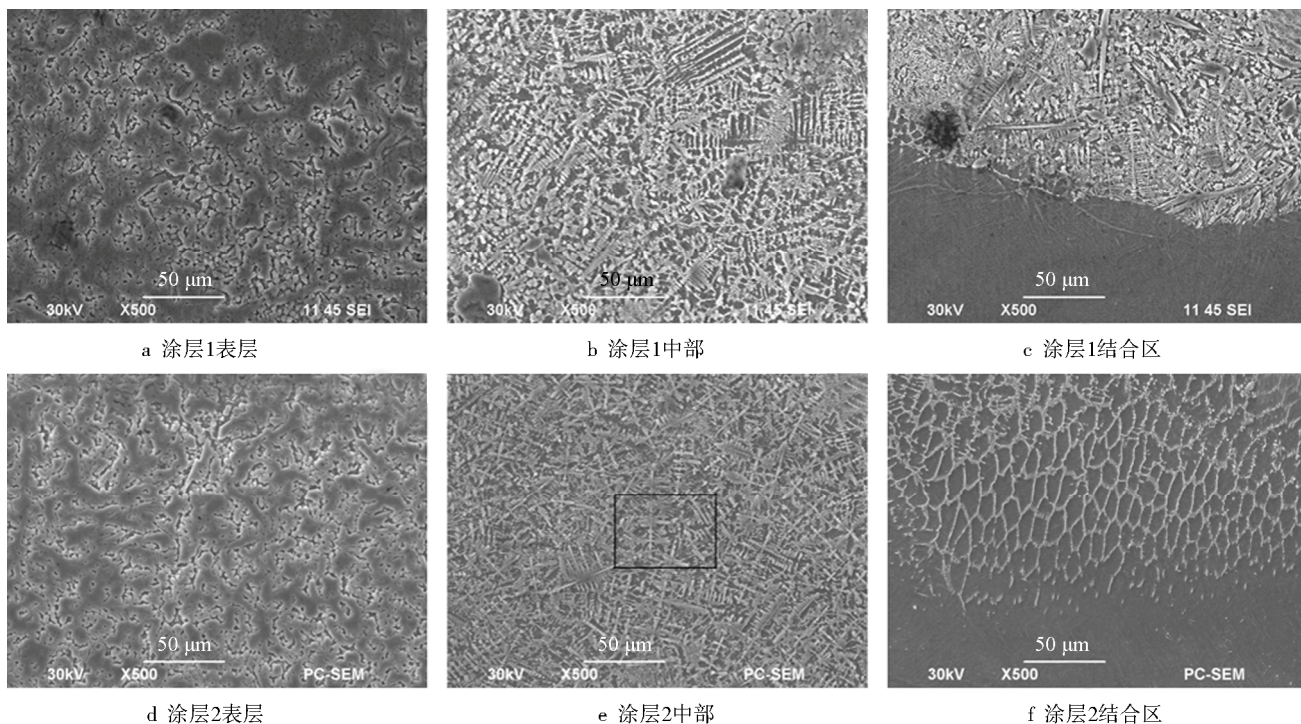


图2 激光熔覆层的 SEM 图

Fig.2 SEM micrograph of laser cladding coating: a) surface layer of coating1, b) middle layer of coating1, c) bonding zone of coating1, d) surface layer of coating2, e) middle layer of coating2, f) bonding zone of coating2

树枝晶为主,其中胞状树枝晶间夹杂着少量的晶须与小颗粒。图2b为熔覆层中部组织,主要以树枝晶为主,而其间夹杂着小颗粒和团簇的晶须。图2c为结合区组织,为树枝晶、棒状组织和团簇晶须组成的致

密组织结构,且其与基体有着明显的分界线,基体与熔覆层结合界面呈平面状。图2d—2f分别为涂层2的熔覆层层、熔覆层中部、结合区的表面形貌图。如图2d所示,涂层2的熔覆层表层与涂层1的熔覆



层表层没有显著差异。如图 2e 所示, 熔覆层中部以大致朝向散热方向的树枝晶为主, 而树枝晶间填充着大量的晶须。添加稀土氧化物 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 后, 熔覆层中部的组织显著细化, 且其组织分布更加均匀。

关于添加稀土氧化物 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 后, 熔覆层表层、中部显微组织表现出的不同特征, 主要有以下几点原因。首先, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为高熔点化合物, 能增加熔覆层中的形核质点<sup>[12-13]</sup>, 提高形核率, 从而使熔覆层的组织细化。其次, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 能减小枝晶间空隙, 使树枝晶的生长受阻, 从而使得熔覆层组织更加均匀、细小。最后, 由于 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的密度大, 在熔化状态下, 大部分的 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 分布在熔池中下部, 主要对熔覆层中下部起作用。如图 2f 所示, 结合区为晶须网状结构, 而结合区上半部的网状结构伴随着小颗粒的存在, 下半部网状结构深入到基体。这是由于 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的添加能够提高熔池的流动性<sup>[14]</sup>, 从而促使晶须网状伸向基体。这种结构使得基体与熔覆层有一定的过渡区, 其相对于平面状界面具有更好的冶金结合。

2.3 熔覆层的物相成分分析

图 3 为熔覆层的 XRD 图谱。其中, 图 3a 为涂层

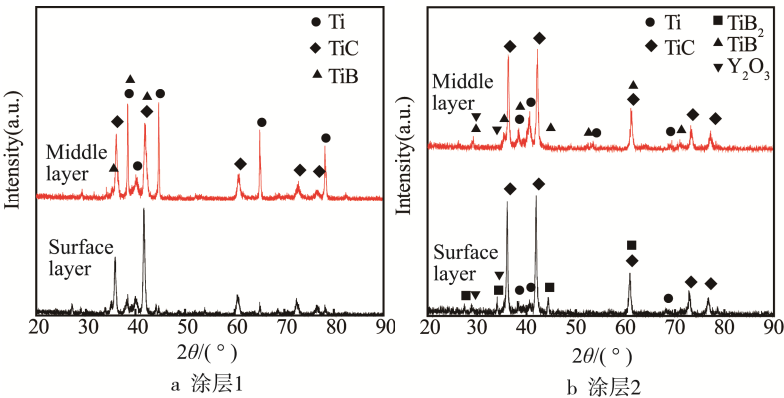


图 3 熔覆层的 X 射线衍射图谱  
Fig.3 XRD pattern of laser cladding coating: a) coating1, b) coating2

1 表层和中部的 XRD 图谱, 图 3b 为涂层 2 表层和中部的 XRD 图谱。由图 3 可见, 涂层 1 的物相为 Ti、TiC、TiB, 涂层 2 的表层物相为 Ti、TiB<sub>2</sub>、TiC、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 中部物相为 Ti、TiB、TiC、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。对比可见, 添加 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 后的熔覆层表层物相出现了 TiB<sub>2</sub>。根据文献报道, 添加的 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在熔池中一部分由于温度分布不均分解为 Y 元素, 另一部分则以 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的形式存在, 而 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的这两种存在形式都消耗了大量的能量。在能量一定的情况下, 由于 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的添加使得基材的熔解量减少, TiB<sub>2</sub> 不能和足够的 Ti 原位反应生成 TiB<sup>[15-17]</sup>。

图 4 为图 2e 中标记的放大图, 可以明显看出涂层 2 中部有以下不同的组织形貌: 黑色基体、树枝状、针状、晶须状、灰色颗粒、白色颗粒。表 1 为以上各组织的 EDS 分析, 由于 EDS 对于原子序数在 11 以下的元素检测存在偏差, 所以表 1 中对于 C、B、O 元素的检测数据存在一定的误差<sup>[18]</sup>。结合 XRD 和 EDS 分析可知: 黑色基体为 Ti, 树枝状和白色颗粒状组织为 TiC, 针状和晶须状组织为 TiB, 灰色颗粒状组织为 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。

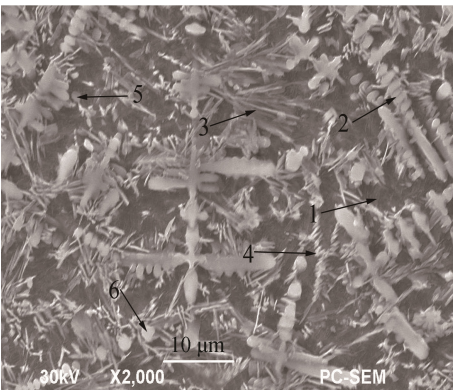


图 4 涂层 2 中部 SEM 图片  
Fig.4 SEM micrograph of middle coating2

表 1 涂层 2 中部组织 EDS 分析  
Tab.1 EDS analysis of the middle coating 2

Analyzing point	at%						
	Ti	B	C	Al	Y	O	V
1(black)	88.99			9.03			1.98
2(dendrite)	71.34		28.66				
3(acicular shape)	76.68	21.33					
4(whisker)	78.54	19.83	1.63	1.99			
5(gray spot)	1.53		14.78		51.98	30.29	
6(white spot)	72.45		27.55				

2.4 熔覆层的显微硬度分析

图 5 为涂层 1 和涂层 2 的显微硬度分布曲线图。由图 5 可知, 涂层 2 的最高显微硬度为 1404.6HV<sub>0.2</sub>。

距熔覆层表面 0~1000 μm 时, 涂层显微硬度相对稳定, 一直保持在 1300~1400HV<sub>0.2</sub>; 距熔覆层表面 1000~1300 μm 时, 涂层显微硬度由 1232.1HV<sub>0.2</sub> 快速减小到 618HV<sub>0.2</sub>; 距熔覆层表面 1300~2000 μm 时,



涂层的显微硬度呈缓慢递减的趋势。相对于涂层2的显微硬度变化特点,涂层1的显微硬度曲线整体呈现阶梯状递减的趋势,熔覆层的最高显微硬度为1367.7HV<sub>0.2</sub>。另外,两涂层的硬度在距熔覆层表面0~400 μm时相差较小,而在距表面400~1100 μm时则有较大的差距。这是由于熔覆层的显微硬度分布主要与熔覆层中的组织形貌、数量以及分布等有着直接联系<sup>[19]</sup>。涂层2中部组织明显致密、细化,而且由于Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的添加,增加了熔池的流动性,促使其组织分布更加均匀,在细晶强化和弥散强化共同作用下,涂层2熔覆层显微硬度有明显的提高。

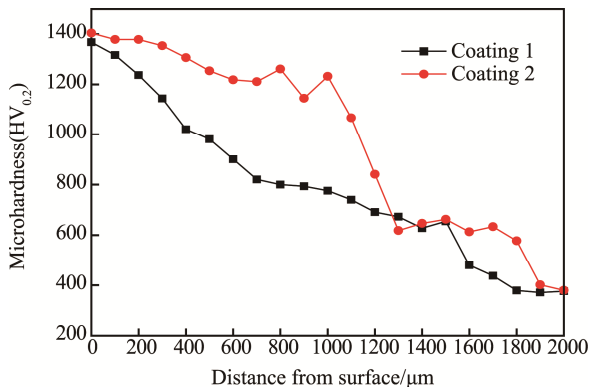


图5 熔覆层显微硬度

Fig.5 Microhardness of laser cladding coating

## 2.5 熔覆层摩擦磨损性能分析

图6为涂层1、涂层2和基材的瞬时摩擦系数曲线图,其对磨件为经过淬火处理的45号钢,硬度为44~46HRC。从图6可见,涂层2的瞬时摩擦系数明显低于涂层1和基材的瞬时摩擦系数,且其波动更加平缓。经过计算,基材的平均摩擦系数为0.478,涂层1的平均摩擦系数为0.392,涂层2的平均摩擦系数为0.266。图7为三者的磨损质量损失图,由图可知涂层2的磨损量较基材的磨损量减少了98.2%,较涂层1的磨损量减少了66.67%。由此可得,添加Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>后,涂层的瞬时摩擦系数和磨损质量损失量都有较大的改善。

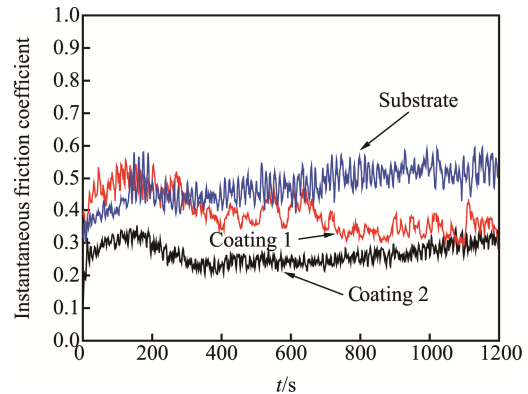


图6 熔覆层和基材瞬时摩擦系数

Fig.6 Instantaneous friction coefficient

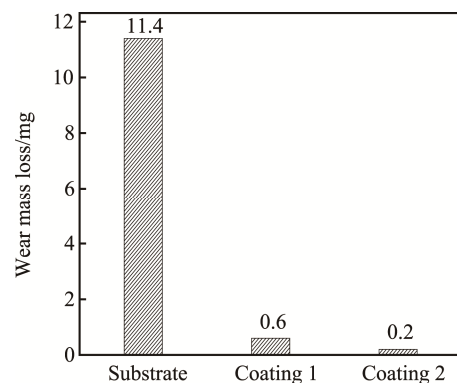
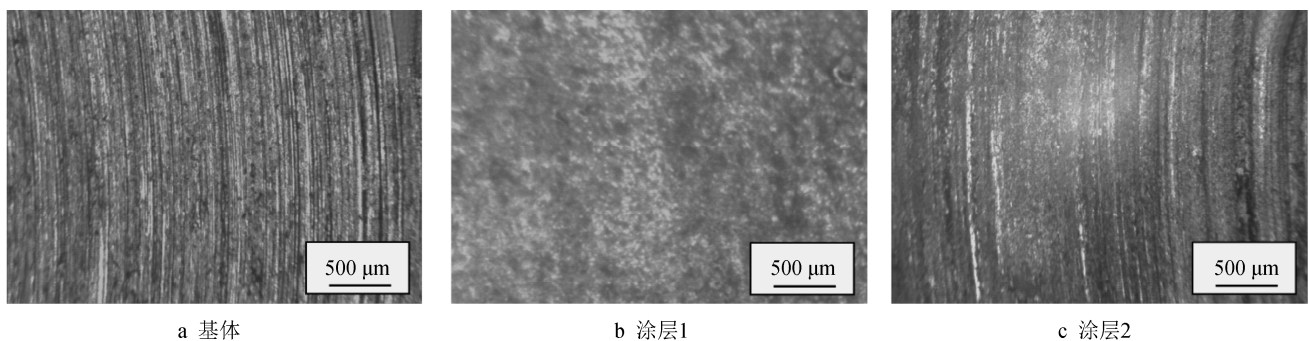


图7 基体和涂层的磨损质量损失图

Fig.7 Wear mass loss of substrate and coatings of substrate and laser cladding

图8为基材、涂层1、涂层2在相同条件下与45号钢对磨件对磨后的磨面形貌。基材磨面呈现为塑性变形和对磨件刮擦所产生的较深犁沟、轻微粘着痕迹,这是典型的磨粒磨损和粘着磨损特征。涂层1、涂层2的磨面比基材磨面光滑,没有出现较深的犁沟。其中在涂层1的磨面上分布着颗粒剥离而形成的凹陷,表现为脆性剥离的特征。分析认为涂层硬质相分布不均造成涂层硬度高、脆性大,在进行摩擦磨损试验时,由于塑性较差,硬质相发生剥离。涂层2的磨面上有轻微的犁沟,呈现出轻微的磨粒磨损,这是



a 基体

b 涂层1

c 涂层2

图8 TC4钛合金及其涂层的表面磨损形貌

Fig.8 Wear surface of substrate (a), coating 1(b) and coating 2(c)

由于添加稀土后,涂层2的致密性提高,而均匀分布的硬质相构成了耐磨骨架。因此涂层2磨面比较光滑,摩擦系数较小。

### 3 结论

1) 在 TC4 钛合金表面激光熔覆原位制备的 TiC/TiB 复合陶瓷涂层中添加 4% $Y_2O_3$ , 能够增加熔覆层中的形核质点和减小枝晶间的空隙。熔覆层中部组织有明显的细化, 组织分布致密, 而结合区则由致密的组织结构转变为晶须网状结构。

2) 添加 4% $Y_2O_3$  后, 熔覆层的显微硬度有明显的提高, 熔覆层的最高硬度为 1404.6HV<sub>0.2</sub>, 是基体的 3.7 倍。

3) 添加 4%  $Y_2O_3$  后, 磨损量减少了 66.67%, 摩擦系数明显降低, 耐磨性显著提高。

#### 参考文献:

- [1] DIAO Y, ZHANG K. Microstructure and Corrosion Resistance of TC2 Ti Alloy by Laser Cladding with Ti/TiC/TiB<sub>2</sub> Powders[J]. Applied Surface Science, 2015, 352: 163—168.
- [2] BAI L L, LI J, CHEN J L, et al. Effect of the Content of B<sub>4</sub>C on Microstructural Evolution and Wear Behaviors of the Laser-clad Coatings Fabricated on Ti6Al4V[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 76: 33—45.
- [3] FARAYIBI P K, ABIOYE T E, CLARE A T. A Parametric Study on Laser Cladding of Ti-6Al-4V Wire and WC/WC Powder[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016(1): 1—10.
- [4] 冯淑容, 张述泉, 王华明. 钛合金激光熔覆硬质颗粒增强金属间化合物复合涂层耐磨性[J]. 中国激光, 2012(2): 60—65.  
FENG Shu-rong, ZHANG Shu-quan, WANG Hua-ming. The Wear Resistance of Titanium Alloy Laser Cladding Hard Particles Reinforced Intermetallic Compound Coating[J]. Chinese Journal of Laser, 2012(2): 60—65.
- [5] LI J, YU Z S, WANG H P, et al. Microstructural Evolution of Titanium Matrix Composite Coatings Reinforced by in Situ Synthesized TiB and TiC by Laser Cladding[J]. International Journal of Minerals Metallurgy & Materials, 2010, 17(4): 481—488.
- [6] LI J, YU Z, WANG H. Wear Behaviors of an (TiB+TiC)/Ti Composite Coating Fabricated on Ti6Al4V by Laser Cladding[J]. Thin Solid Films, 2011, 519(15): 4804—4808.
- [7] JIANG S L, CHEN Z Y, ZHU W H, et al. In-situ Formatting Composite Coating by Laser Cladding C+BN Power on TC4 Alloy[J]. Laser & Infrared, 2010(5): 459—462.
- [8] 封延松, 程西云.  $Y_2O_3$  对镍基碳化钛金属陶瓷熔覆层组织的影响[J]. 润滑与密封, 2008, 33(9): 18—20.  
FENG Yan-song, CHEN Xi-yun. Effect of  $Y_2O_3$  on Ni Based Metal Ceramic Coating by Laser Cladding[J]. Lubrication Engineering, 2008, 33(9): 18—20.
- [9] 朱快乐, 张有凤, 何力, 等.  $La_2O_3$  含量对激光熔覆 TiB/Ti 涂层显微结构的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(4): 53—56.  
ZHU Kuai-le, ZHANG You-feng, HE Li, et al. Effect of  $La_2O_3$  Content on Microstructure of TiB/Ti Coating by Laser Cladding[J]. Surface Technology, 2016, 45(4): 53—56.
- [10] 刘丹, 陈志勇, 陈科培, 等. TC4 钛合金表面激光熔覆复合涂层的组织和耐磨性[J]. 金属热处理, 2015(3): 58—62.  
LIU Dan, CHEN Zhi-yong, CHEN Ke-pei, et al. Microstructure and Wear Resistance of Laser Clad Composite Coating on TC4 Titanium Alloy Surface[J]. Heat Treatment of Metals, 2015(3): 58—62.
- [11] 杜挺. 稀土元素在金属材料中的一些物理化学作用[J]. 金属学报, 1997, 33(1): 69—77.  
DU Ting. Physical Chemistry Effect of Rare Earth Elements on Metallic Materials[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1997, 33(1): 69—77.
- [12] 张瑄琪, 李军, 王慧萍, 等. 添加  $Y_2O_3$  对激光熔覆原位合成 TiB<sub>2</sub> 和 TiC 增强镍基复合涂层组织的影响[J]. 机械工程材料, 2012(7): 17—20.  
ZHANG Xuan-jun, LI Jun, WANG Hui-ping, et al. Effect of Adding  $Y_2O_3$  on Microstructure of TiB<sub>2</sub> and TiC Reinforced Ni-based Composite Coating in Situ Synthesized by Laser Cladding[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2012(7): 17—20.
- [13] LI J, YU Z S, WANG H P. Effects of  $Y_2O_3$  on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Clad Coatings Reinforced by in Situ Synthesized TiB and TiC[J]. Materials Science Forum, 2011(1): 477—483.
- [14] LU D, LIU S, ZHANG X, et al. Effect of  $Y_2O_3$  on Microstructural Characteristics and Wear Resistance of Cobalt-based Composite Coatings Produced on TA15 Titanium Alloy Surface by Laser Cladding[J]. Surface & Interface Analysis, 2014, 47(2): 239—244.
- [15] WENG F, YU H, CHEN C, et al. Microstructures and Properties of TiN Reinforced Co-based Composite Coatings Modified with  $Y_2O_3$  by Laser Cladding on Ti-6Al-4V Alloy[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2015, 650: 178—184.
- [16] LI J N, YU J H, CHEN C Z, et al. Effect of Nano- $Y_2O_3$  on Microstructure and Diffusive Behavior of Ti<sub>3</sub>Al/Al<sub>3</sub>Ti Matrix Composite Coatings[J]. 2012, 50(3): 169—175.
- [17] LI H C, WANG D G, CHEN C Z, et al. Effect of CeO<sub>2</sub> and  $Y_2O_3$  on Microstructure, Bioactivity and Degradability of Laser Cladding CaO-SiO<sub>2</sub> Coating on Titanium Alloy[J]. Colloids & Surfaces B Biointerfaces, 2015, 127: 15—21.
- [18] SONG R, LI J, SHAO J Z, et al. Microstructural Evolution and Wear Behaviors of Laser Cladding Ti<sub>2</sub>Ni/ $\alpha$ (Ti) Dual-phase Coating Reinforced by TiB and TiC[J]. Applied Surface Science, 2015, 355: 298—309.
- [19] 文向东, 陈志勇, 朱卫华, 等. 激光原位熔覆制备 TiC/TiB 硬质陶瓷复合涂层[J]. 激光与红外, 2013, 43(4): 371—375.  
WEN Xiang-dong, CHEN Zhi-yong, ZHU Wei-hua, et al. In-suit Synthesized TiC/TiB Ceramic Particle Composite Coating by Laser Cladding on TC4 Titanium Alloy[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(4): 371—375.