

# Ti6Al4V合金激光熔覆复合涂层的摩擦学和高温抗氧化性能研究

余鹏程<sup>1</sup> 刘秀波<sup>1,2</sup> 陆小龙<sup>1</sup> 朱刚贤<sup>1</sup> 陈 瑶<sup>1</sup> 石皋莲<sup>3</sup> 吴少华<sup>3</sup>

<sup>1</sup>苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215006

<sup>2</sup>中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000

<sup>3</sup>苏州工业职业技术学院, 江苏 苏州 215104

**摘要** 为了改善 Ti6Al4V 合金的摩擦学和高温抗氧化性能, 预置 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-Al-Si 复合粉末, 采用激光熔覆技术在钛合金表面制备复合涂层。表征了涂层的显微组织结构, 测试了涂层的摩擦学和高温氧化性能, 并分析了相关机理。结果表明: 涂层由 TiC、Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> 和 Cr<sub>3</sub>Si 增强相及  $\gamma$ -Ni/Al<sub>5</sub>Cr<sub>5</sub> 基体组成, 平均显微硬度为 750 HV<sub>0.5</sub>, 约为 Ti6Al4V (360 HV<sub>0.5</sub>) 合金的 2 倍。室温 (25 °C) 下, 由于涂层的高硬度可有效抵抗塑性变形, 涂层表现出较好的耐磨性能; 高温 (600 °C) 下, 钛合金表面生成氧化膜, 呈现自润滑效果, 而涂层表面产生裂纹, 耐磨性能轻微降低。恒温 (800 °C) 氧化 32 h 后, 钛合金表面发生严重氧化腐蚀, 而涂层表面生成致密的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、NiO 和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 混合氧化物, 有效阻止了氧原子的扩散, 高温抗氧化性能约为钛合金基体的 8.4 倍。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; 复合涂层; 摩擦学; 高温抗氧化性

中图分类号 TN249; TG174.44

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1003004

## Study on Tribology and High-Temperature Oxidation Resistance of Laser Cladding Composite Coatings on Ti6Al4V Alloy

Yu Pengcheng<sup>1</sup> Liu Xiubo<sup>1,2</sup> Lu Xiaolong<sup>1</sup> Zhu Gangxian<sup>1</sup> Chen Yao<sup>1</sup>  
Shi Gaolian<sup>3</sup> Wu Shaohua<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China

<sup>3</sup>Suzhou Institute of Industrial Technology, Suzhou, Jiangsu 215104, China

**Abstract** In order to simultaneously improve the high-temperature wear and oxidation resistance of Ti6Al4V alloy, the composite coatings are prepared on the surface of Ti6Al4V alloy by laser cladding with the precursor mixed NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-Al-Si powder. Microstructure, wear and high temperature oxidation resistance of laser cladding coatings are analyzed. The results show that TiC, Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> and Cr<sub>3</sub>Si particulate reinforced  $\gamma$ -Ni/Al<sub>5</sub>Cr<sub>5</sub> matrix composite coatings are formed. The average micro-hardness of the composite coating is 750 HV<sub>0.5</sub>, and is almost twice as much as that of Ti6Al4V alloy. At room temperature, compared to Ti6Al4V alloy, the composite coating exhibits excellent tribological property due to its high hardness. While at high temperature of 600 °C, the formation of protective transferred layers between the sliding surface of Ti6Al4V alloy and the ceramic couple can play a positive self-lubrication role. Compared with the Ti6Al4V alloy, the wear resistance of the composite coating has slight decrease because of the formation of micro-cracks on the worn surface at

收稿日期: 2015-04-09; 收到修改稿日期: 2015-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(51405319)、江苏省自然科学基金(BK20141194, BK20131155)

作者简介: 余鹏程(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事表面工程技术方面的研究。E-mail: ypcadvance@126.com

导师简介: 刘秀波(1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光材料加工、表面工程与摩擦学等方面的研究。

E-mail: liuxiubo@suda.edu.cn(通信联系人)

high temperature. After isothermal oxidation tests at 800 °C for 32 h, the Ti6Al4V alloy is oxidized quickly because of the high affinity of Ti towards O and the non-protective oxide scales of TiO<sub>2</sub>. The composite coating can form continuous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiO and Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oxide scales on the surface, which is more protective than TiO<sub>2</sub>. The high-temperature oxidation resistance of the laser cladding composite coating is approximately 8.4 times higher than that of the Ti6Al4V alloy.

**Key words** laser technique; laser cladding; composite coating; tribology; high temperature oxidation resistance

**OCIS codes** 140.3380; 310.1515; 310.3840; 350.3390

## 1 引言

钛合金具有高强度、耐腐蚀和良好的生物相容性等优异性能,已被广泛应用于航空航天、石油化工和生物医疗等领域。但钛合金摩擦系数大、易磨损、高温(700 °C)下氧化严重等缺点,制约了其作为高温运动零部件的应用<sup>[1-3]</sup>。

目前国内外普遍采用在运动零部件表面沉积(涂覆)高硬度耐磨复合涂层(薄膜)来改善钛合金的摩擦学性能,硬质相 TiN<sup>[4]</sup>、WC<sup>[5]</sup>、TiB<sub>2</sub><sup>[6]</sup>等常被用作涂层的增强相来改善涂层的硬度,但 TiN、WC 和 TiB<sub>2</sub>在高温(大于 800 °C)条件下容易被氧化且产生扩散气体进一步加剧涂层氧化腐蚀。而改善材料抗氧化性能一般采用电镀<sup>[7]</sup>、磁控溅射<sup>[8]</sup>等在高温零部件表面沉积保护层。虽然高温条件下,该保护层的表面能形成一层连续致密的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>或 SiO<sub>2</sub>保护膜,可有效阻止氧原子的扩散,但 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>或 SiO<sub>2</sub>是室温脆性材料,容易发生磨损脱落形成磨料,加剧零部件磨损。钛合金作为关键高温运动零部件,其工况条件复杂,高温氧化腐蚀和运动磨损均有可能发生。目前采用表面技术以改善钛合金的研究,一般只专注改善钛合金的单一性能(耐磨性能或高温抗氧化性能),同时改善钛合金的耐磨性能和高温抗氧化性能的研究相对较少。

激光熔覆技术是一种高效率、可自动控制的表面改性技术,它利用高能量激光束在零件表面熔覆具有一定厚度的涂层,涂层与基体为冶金结合,可制备不同性能复合涂层,已成为研究热点之一<sup>[9-11]</sup>。镍基合金粉末具有良好的自溶性、湿润性和成本低廉等优点,已被广泛应用于激光熔覆粉末材料<sup>[12-13]</sup>;Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub><sup>[14]</sup>具有高硬度和良好的高温抗氧化性能,被广泛应用于高温结构材料;Al<sub>8</sub>Cr<sub>3</sub>在高温下能生成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等致密的氧化膜,表现出优异的高温抗氧化性能,能有效抑制钛合金的氧化腐蚀<sup>[15]</sup>。

本文以 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-Al-Si 复合粉末为原料,采用激光熔覆技术在 Ti6Al4V 合金表面制备 Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>、TiC 等硬质颗粒加强 γ-Ni/Al<sub>8</sub>Cr<sub>3</sub> 基复合涂层,分析涂层的摩擦学和高温抗氧化性能,为 Ti6Al4V 合金作为相对高温下运动部件的商业应用提供有益参考和借鉴。

## 2 试验方法

基体材料采用厚度为 8 mm 的 TC4 钛合金板,其成分为 Ti-6.3Al-4.2V(质量分数),试样尺寸为 40 mm×40 mm×8 mm。采用质量配比为 2:2:1 的 Ni80Cr20-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>(70)、Al 和 Si 粉末,复合粉末形貌如图 1 所示,由类似于花椰菜形的 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 合金粉末、球状 Al 粉和片状 Si 粉组成,粉末粒度为 40~100 μm。为使粉末混合均匀,采用滚筒式球磨机球磨 6 h。预置粉末厚度约为 1.2 mm,后置于 120 °C 干燥炉保温 2 h。采用德国 3 kW 半导体激光器(DLS-980.10-3000C),其工艺参数为:输出功率 1.0 kW,扫描速度 4 mm/s,矩形光斑尺寸 6 mm×3 mm。激光熔覆样块经线切割后制成金相试样,腐蚀剂为体积比为 1:3:7 的 HF、HNO<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>O 混合溶液,无水乙醇清洗。采用日立 S-4700 场发射扫描电子显微镜(SEM)和自带的能谱分析仪(EDS)对涂层的显微组织结构和成分进行分析。用 X 射线衍射仪(XRD)分析涂层物相,用 HV 维氏显微硬度计测定涂层沿横截面的显微硬度,载荷为 500 g,加载时间为 15 s,进行多组试验测试并求取平均值。

采用球盘式高温摩擦磨损试验机(HT-1000)进行摩擦学试验,对偶件采用半径为 2 mm 的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷球,试验参数为:负载 6.5 N,磨损半径 1.5 mm,旋转速度 1344 r/min,测试时间 40 min。磨损率的计算公式采用 Archard 定律<sup>[16]</sup>,试验结束后,采用 SEM/EDS 分析磨屑和磨损表面的形貌和成分。采用高温电阻空气炉分别测定 Ti6Al4V 合金和激光复合涂层于 800 °C 恒温氧化 32 h 后的抗氧化性能,用精确度为 ±0.1 mg 的电子天平测量氧化前后 Ti6Al4V 合金和复合涂层试样的重量。以 Ti6Al4V 合金为参考试样,计算涂层的相对抗氧化性能<sup>[17]</sup>,采用 XRD 分析涂层氧化表面的物相,采用 SEM/EDS 分析涂层横截面的形貌和成分。

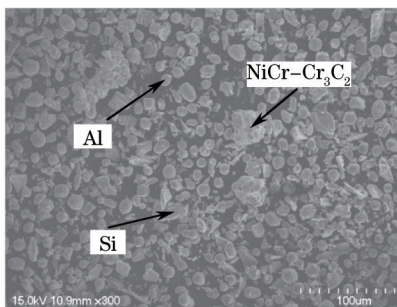


图1 预置复合粉末的微观形貌  
Fig.1 Microstructure of precursor composite powder

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 显微组织

图2(a)为复合涂层的横截面全貌,可见其由涂层、结合区和基体三部分组成,涂层厚度约为1.5 mm,涂层表面出现少量气泡但没有裂纹。图2(b)为结合区放大图,明显可见涂层与基体之间产生一条白亮融合线,表明涂层与基体为冶金结合。热影响区(HAZ)附近出现针状马氏体, Li等<sup>[18]</sup>在钛合金表面激光熔覆Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti<sub>3</sub>Al复合涂层时,由于热影响区快速冷却远超出钛合金临界冷却速度200 °C/s,发生马氏体转变。图2(c)、(d)分别为涂层底部和中部的典型显微组织,可见涂层底部由菊花状、球状、块状硬质相和连续分布的基体组成。涂层的中部由球状、块状、板条状硬质相和基体组成,区域成分分析结果如表1所示。图3为涂层表面的XRD图谱,可见涂层主要由 $\gamma$ -Ni、Al<sub>8</sub>Cr<sub>5</sub>、TiC、Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>和Cr<sub>3</sub>Si等物相组成。 $\gamma$ -Ni/Al<sub>8</sub>Cr<sub>5</sub>化合物作为涂层基体,原位合成的TiC、Cr<sub>3</sub>Si和Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>为涂层的增强相。结合EDS成分和XRD物相分析,Al与Cr化合可能生成Al<sub>12</sub>Cr、Al<sub>6,14</sub>Cr、Al<sub>8</sub>Cr<sub>5</sub>和Al<sub>1,89</sub>Cr物相,但其最稳定物相为Al<sub>8</sub>Cr<sub>5</sub>,因为Al<sub>8</sub>Cr<sub>5</sub>具有最高的熔点,在凝固过程中Al<sub>8</sub>Cr<sub>5</sub>最先生成。通过EDS元素含量分析,Al与Cr原子比约为8:5,所以确定为Al<sub>8</sub>Cr<sub>5</sub><sup>[19-20]</sup>。Ti<sub>x</sub>C<sub>y</sub>确定为TiC,因为TiC极易化合且最为稳定(具有高的熔点3080 °C,低的吉布斯自由能-221.75 kJ/mol)<sup>[21]</sup>。根据Ti-Si相图分析,Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>的熔点为2130 °C,在Ti-Si相图中最高,在熔池凝固过程中容易化合生成Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub><sup>[21]</sup>。结合EDS成分和XRD物相分析,可推断复合涂层中A区域为 $\gamma$ -Ni和Al<sub>8</sub>Cr<sub>5</sub>化合物,B区域为菊花状TiC,C区域为块状Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>,D区域为球状TiC,E区域为板条状Cr<sub>3</sub>Si<sup>[22]</sup>。由于冷却速度不同,涂层底部TiC为菊花状,涂层中部TiC为球状颗粒。图4为涂层横截面的显微硬度分布曲线,可见涂层的平均硬度为750 HV<sub>0.5</sub>,约为Ti6Al4V合金(360 HV<sub>0.5</sub>)的2倍。由于热影响区发生马氏体转变,其平均硬度520 HV<sub>0.5</sub>约为基体的1.5倍。

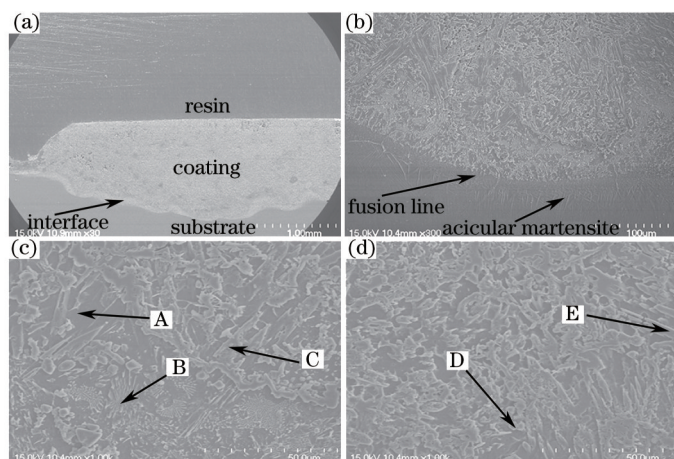


图2 复合涂层的微观组织(SEM)。(a) 全貌;(b) 结合区;(c) 底部;(d) 中部  
Fig.2 SEM micrographs showing microstructure of laser cladding composite coating. (a) Overview; (b) bonding zone; (c) bottom region; (d) intermediate region

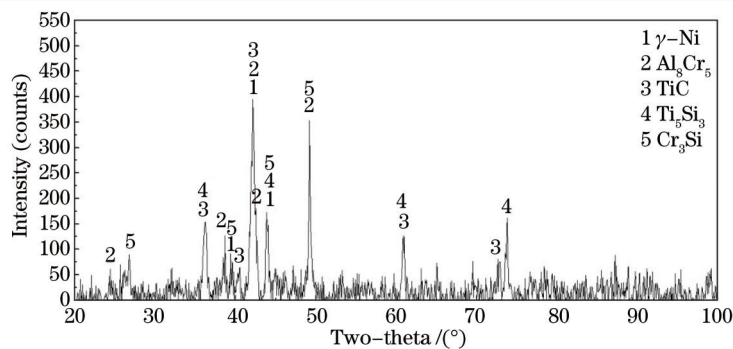


图3 激光熔覆复合涂层 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns of the laser cladding composite coating

表 1 激光熔覆复合涂层不同区域的 EDS 分析结果(质量分数,%)

Table 1 EDS analysis in different areas of the laser cladding composite coating (mass fraction, %)

Area	C	Ni	Al	Si	Ti	Cr	V
A	6.84	11.72	52.26	6.49	1.81	20.88	-
B	6.67	4.00	10.67	6.30	63.74	5.52	2.89
C	4.57	1.56	1.43	23.74	45.47	19.62	3.61
D	7.09	6.42	18.05	0.93	50.15	17.36	-
E	8.36	1.37	1.99	28.66	21.79	37.8	-

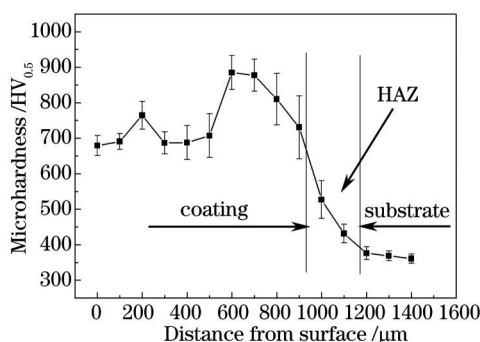


图4 激光熔覆复合涂层横截面硬度分布曲线

Fig.4 Cross-section microhardness profiles of the laser cladding composite coating

### 3.2 摩擦学性能

图 5 为钛合金和涂层在室温(25 ℃)和高温(600 ℃)下摩擦系数随时间的变化曲线,可见经过约 5 min,摩擦系数趋于平稳。钛合金的摩擦系数波动性明显高于涂层,这是由于钛合金硬度较低,使摩擦副的接触面积增大,当界面相对运动时,接触点的粘着部位产生剪切,交替变化使摩擦系数波动变大。钛合金室温和高温下的摩擦系数分别为 0.52 和 0.42,而涂层的室温和高温摩擦系数分别为 0.45 和 0.40,由于涂层具有较高硬度,改善了钛合金表面抵抗划痕和粘着的能力,所以涂层的摩擦系数无论在室温还是高温下均低于钛合金。高温下,钛合金表面被氧化,生成固体润滑转移膜,使得钛合金摩擦系数降低<sup>[23]</sup>。而涂层表面硬质颗粒部分脱落,呈现三体磨料磨损,摩擦系数降低<sup>[24]</sup>。Ti6Al4V 合金和涂层的室温和高温磨损率如图 6 所示,可见室温时,复合涂层能有效抵抗塑性变形和磨粒磨损,其耐磨性约为钛合金的 2 倍。需要注意的是,高温下,涂层的耐磨性能反而低于钛合金,这是由于高温下硬质颗粒热膨胀,加速脆性硬质颗粒的脱落[图 8(b)],其磨损率略低于钛合金基体。图 7 为钛合金和复合涂层的室温磨损表面和磨屑形貌,可见钛合金表面产生很深犁沟、严重塑性变形和剥落碎片,表明 Ti6Al4V 合金表面发生严重磨粒磨损和粘着磨损,其磨屑为颗粒状粉末和较大不规则块状,EDS 成分检测为 9.88% O、3.75% Al、84.34% Ti、2.03% V(质量分数),表明大块状磨屑为钛合金表面撕裂剥落,进一步证明钛合金发生严重粘着磨损;而涂层表面出现轻微划痕、脆性硬质颗粒的脱落等,其磨屑为较小不规则块状和球状磨屑。其 EDS 成分分析结果(质量分数)为 6.58% C、10.86% O、21.20% Al、10.79% Si、27.91% Ti、15.63% Cr、7.04% Ni,表明磨屑为 Al<sub>8</sub>Cr<sub>5</sub>基体和部分脱落的 TiC、Ti<sub>3</sub>Si<sub>3</sub>等硬

质颗粒。涂层主要发生轻微粘着磨损和磨粒磨损。图8为钛合金和复合涂层高温磨损表面和磨屑形貌,可见高温下,钛合金表面出现脱落碎片,呈现堆积层状,磨屑为较小不规则块状碎片和粉末状,EDS成分检测结果(质量分数)为31.08% O、2.53% Al、62.86% Ti、3.53% V,磨屑中O含量较高,且Ti与O原子比约为1:2,可推断磨屑主要为TiO<sub>2</sub>氧化物。分析认为,钛合金表面被氧化,生成TiO<sub>2</sub>脆性氧化膜,增加钛合金表面硬度,可有效抵抗Ti6Al4V合金表面塑性变形。但脆性氧化膜容易从钛合金表面脱落,在较低剪切力作用下可形成固体润滑转移膜<sup>[25]</sup>。Mao等<sup>[23]</sup>对Ti6Al4V合金进行25 °C~500 °C摩擦磨损测试,在400 °C~500 °C条件下,钛合金表面生成固体转移膜,有效降低钛合金的摩擦系数和磨损率,钛合金的高温磨损机理主要为氧化磨损和轻微粘着磨损;由于对偶球的反复挤压,复合涂层表面出现局部裂纹、块状剥落和团聚状颗粒,表明涂层

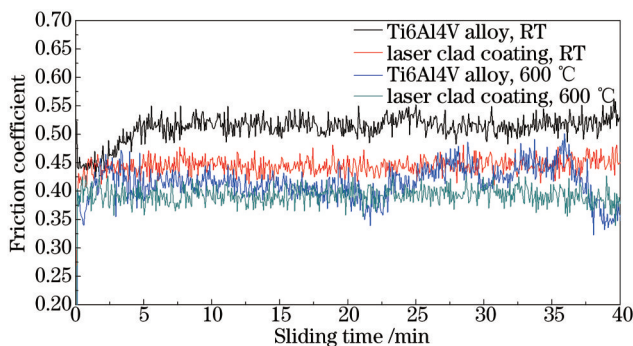


图5 Ti6Al4V合金和复合涂层的摩擦系数随时间变化曲线

Fig.5 Variation in friction coefficients of Ti6Al4V alloy and the composite coating with sliding time

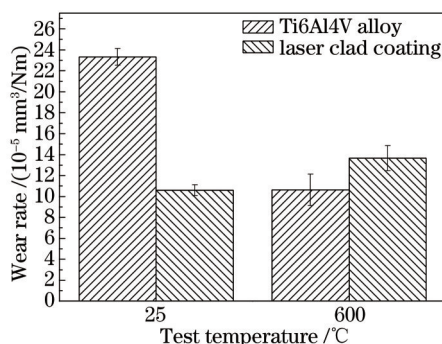


图6 Ti6Al4V合金和激光熔覆复合涂层磨损率

Fig.6 Wear rates of Ti6Al4V alloy and the laser cladding composite coating

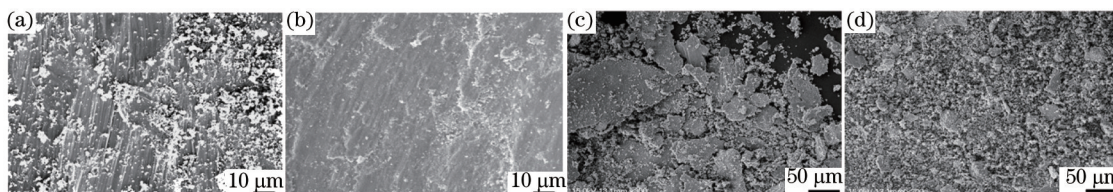


图7 (a)(c)Ti6Al4V合金以及(b)(d)复合涂层室温(25 °C)下干滑动磨损表面和磨屑形貌(SEM)

Fig.7 SEM micrographs showing morphologies of worn surface and wear debris at room temperature.

(a)(c) Ti6Al4V alloy; (b)(d) composite coating

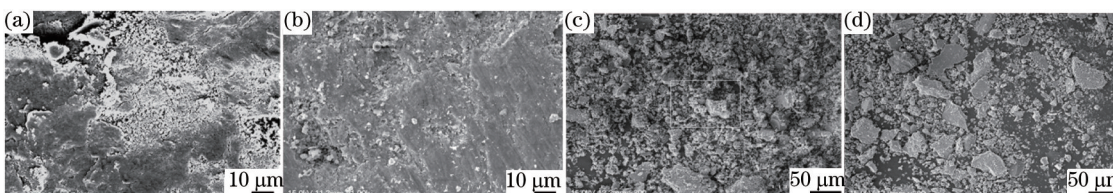


图8 (a)(c)Ti6Al4V合金及(b)(d)复合涂层高温(600 °C)干滑动磨损表面和磨屑形貌(SEM)

Fig.8 SEM micrographs showing morphologies of worn surface and wear debris at high temperature.

(a)(c) Ti6Al4V alloy; (b)(d) composite coating

表面发生了严重的硬质颗粒脱落,其磨屑为块状和团絮状,EDS成分检测结果(质量分数)为7.52% C、21.26% O、16.29% Al、9.27% Si、28.92% Ti、10.58% Cr、6.17% Ni,其中C和O元素含量增加,表明涂层表面发生氧化,氧化物和Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>、TiC等硬质颗粒发生脱落,涂层的高温磨损机理为氧化磨损、疲劳磨损和磨粒磨损。

### 3.3 高温抗氧化性能

图9为激光涂层在恒温(800 °C)氧化32 h后,涂层相对Ti6Al4V合金基体的抗氧化性能,可见涂层的抗氧化性能约是钛合金的8.4倍,涂层表现出优异的高温抗氧化性能。图10(a)、(b)分别为Ti6Al4V合金和涂层高温氧化32 h后表面XRD物相分析图谱,可见钛合金表面氧化产物主要为TiO<sub>2</sub>及少量Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;而涂层表面主要为Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、NiO、TiO<sub>2</sub>和NiCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>混合氧化物,没有检测到Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和SiO<sub>2</sub>氧化物,但检测到Al<sub>8</sub>Cr<sub>5</sub>基体和Cr<sub>3</sub>Si硬质相。Ti6Al4V合金和复合涂层的氧化膜横截面形貌如图11(a)、(b)所示(SEM),可见钛合金基体的氧化膜厚度约为225 μm,而涂层的氧化膜厚度约为17 μm,远小于钛合金氧化膜的厚度。分析认为,Ti原子与O原子具有很高的亲和性,容易发生氧化反应生成稳定但脆性多孔的氧化物TiO<sub>2</sub>,不能有效阻止氧原子向内扩散<sup>[26]</sup>;与之形成对比的是Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、NiCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>为结构致密的氧化物,可有效阻止氧原子向涂层内扩散和Ti原子向外渗透<sup>[8]</sup>。另一方面,钛合金表面的氧化膜与基体间存在裂缝,表明脆性的TiO<sub>2</sub>氧化膜容易从钛合金表面脱落;而涂层表面的氧化膜与涂层结合紧密,未见脱落现象。从图11(b)可见,高温下涂层亚表面产生裂纹,其氧化膜沿着微裂纹生长,有效地填补了微裂纹缺陷,此现象进一步证实高温磨损情况下,涂层发生了严重脆性硬质颗粒剥落。

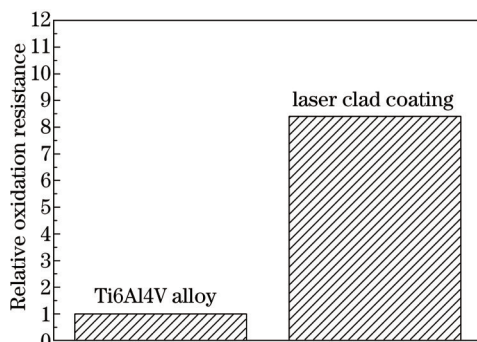


图9 恒温(800 °C)氧化32 h后复合涂层与Ti6Al4V合金的相对抗氧化性能

Fig.9 Relative oxidation resistance of the laser cladding composite coating with reference to Ti6Al4V alloy after isothermal oxidation at 800 °C for 32 h

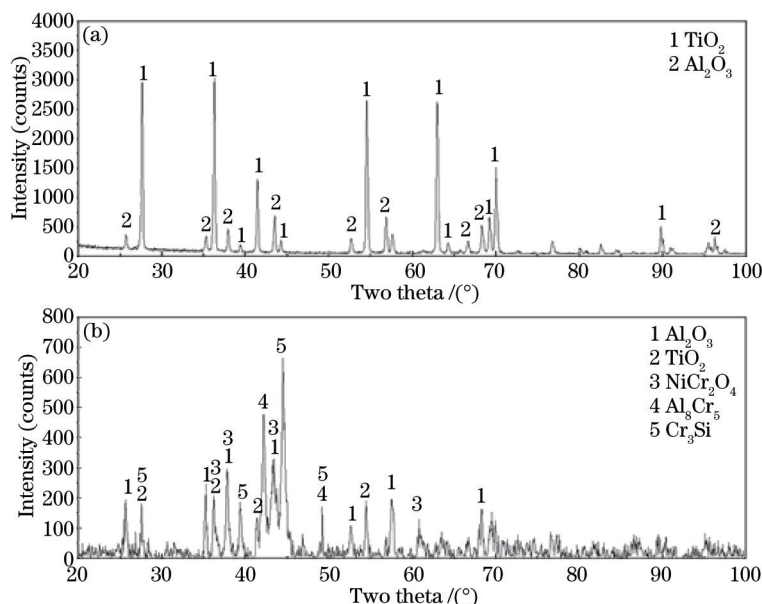


图10 Ti6Al4V合金和复合涂层恒温(800 °C)氧化32 h后表面XRD图谱。(a) Ti6Al4V合金; (b) 复合涂层

Fig.10 XRD patterns of surface after isothermal oxidation at 800 °C for 32 h. (a) Ti6Al4V alloy; (b) composite coating

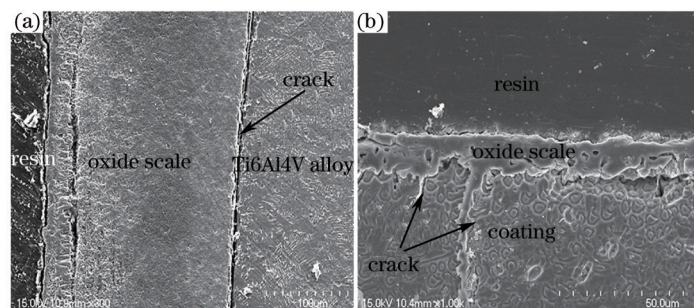


图 11 Ti6Al4V 合金和复合涂层氧化膜横截面形貌(SEM)。(a) Ti6Al4V 合金; (b) 复合涂层

Fig.11 SEM micrographs showing morphologies of oxide scales. (a) Ti6Al4V alloy; (b) composite coating

## 4 结 论

1) 采用激光熔覆技术,在 Ti6Al4V 合金表面制备复合涂层,涂层以  $\gamma$ -Ni/Al<sub>5</sub>Cr<sub>5</sub> 为基体, TiC 和 Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> 为增强相,涂层的平均显微硬度为 750 HV<sub>0.5</sub>,约为 Ti6Al4V (360 HV<sub>0.5</sub>)合金的 2 倍,涂层与基体呈冶金结合。

2) 室温时, Ti6Al4V 合金基体的磨损机理主要为严重的粘着磨损和磨粒磨损,由于涂层硬度很高,其磨损机理表现为轻微粘着磨损和脆性断裂。高温时,钛合金表面发生氧化,形成固体润滑转移膜,降低了钛合金的摩擦系数和磨损率,磨损机理主要为氧化磨损,而涂层表面发生氧化,局部产生微裂纹,磨损机理主要表现为氧化磨损、疲劳磨损和磨粒磨损。

3) 恒温(800 ℃)氧化 32 h 后, Ti6Al4V 合金表面氧化物主要为 TiO<sub>2</sub>,且氧化膜与钛合金之间产生明显脱落;而复合涂层表面氧化物主要为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、NiO 和 NiCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 致密氧化膜,可有效阻止氧原子的扩散。涂层的高温抗氧化性能约为 Ti6Al4V 合金的 8.4 倍。

## 参 考 文 献

- 1 D I Adebisi, A P I Popoola. Mitigation of abrasive wear damage of Ti-6Al-4V by laser surface alloying[J]. Materials and Design, 2015, 74: 67-75.
- 2 J C Oh, E Yun, M G Golkovski, *et al.*. Improvement of hardness and wear resistance in SiC/Ti-6Al-4V surface composites fabricated by high-energy electron beam irradiation[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 351(1-2): 98-108.
- 3 Z G Zhang, Y P Peng, Y L Mao, *et al.*. Effect of hot-dip aluminizing on the oxidation resistance of Ti-6Al-4V alloy at high temperatures [J]. Corrosion Science, 2012, 55: 187-193.
- 4 I Saravanan, A Elaya Perumal, S C Vettivel, *et al.*. Optimizing wear behavior of TiN coated SS 316L against Ti alloy using response surface methodology[J]. Materials and Design, 2015, 67: 469-482.
- 5 C Guo, J M Chen, J S Zhou, *et al.*. Effects of WC-Ni content on microstructure and wear resistance of laser cladding Ni-based alloys coating[J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 206(8): 2064-2071.
- 6 S Suresh, N S V Moorthi, S C Vettivel, *et al.*. Mechanical behavior and wear prediction of stir cast Al-TiB<sub>2</sub> composites using response surface methodology[J]. Materials and Design, 2014, 59: 383-396.
- 7 H P Xiong, W Mao, W L Ma, *et al.*. Liquid-phase aluminizing and siliconizing at the surface of a Ti60 alloy and improvement in oxidation resistance[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 433(1): 108-113.
- 8 J Matecka. Effect of an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating on the oxidation process of a  $\gamma$ -TiAl phase based alloy[J]. Corrosion Science, 2012, 63: 287-292.
- 9 S Saqib, R J Urbanic, K Aggarwal. Analysis of laser cladding bead morphology for developing additive manufacturing travel paths [J]. Procedia Cirp, 2014, 17: 824-829.
- 10 Yao Shuang, Liu Hongxi, Zhang Xiaowei, *et al.*. Microstructure and wear property of TiC particle reinforced composite coatings on H13 steel surface by laser *in-situ* synthesis[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1003004.  
姚爽, 刘洪喜, 张晓伟, 等. H13 钢表面激光原位自生 TiC 颗粒增强复合涂层的微观结构和摩擦磨损性能[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1003004.
- 11 Yang Jiaoxi, Wang Yanfang, Wang Zhicheng. Laser cladding Ni/Ni<sub>3</sub>Al based double performance materials and internal microstructure analysis[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0306001.  
杨胶溪, 王艳芳, 王志成. 激光熔覆制备 Ni/Ni<sub>3</sub>Al 基双性能材料及其内部微观组织分析[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0306001.

- 12 L Q Wang, J S Zhou, Y J Yu, *et al.*. Effect of powders refinement on the tribological behavior of Ni-based composite coatings by laser cladding[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(17): 6697-6704.
- 13 Liu Haiqing, Liu Xiubo, Meng Xiangjun, *et al.*. Study on  $\gamma$ -NiCrAlTi/TiC+TiWC<sub>2</sub>/CrS+Ti<sub>2</sub>CS high-temperature self-lubricating wear resistant composite coating on Ti-6Al-4V by laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0303005.  
 刘海青, 刘秀波, 孟祥军, 等. Ti-6Al-4V 合金激光熔覆 $\gamma$ -NiCrAlTi/TiC+TiWC<sub>2</sub>/CrS+Ti<sub>2</sub>CS 高温自润滑耐磨复合涂层研究[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0303005.
- 14 Du Jun, Xiao Zhaoqiang, Li Buhui, *et al.*. Research progress of Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>[J]. Journal of Nanchang University, 2013, 35(1): 12-16.  
 杜 军, 肖昭强, 李不悔, 等. Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>的研究进展[J]. 南昌大学学报, 2013, 35(1): 12-16.
- 15 C Huang, Y Z Zhang, J Y Shen, *et al.*. Thermal stability and oxidation resistance of laser clad TiVCrAlSi high entropy alloy coatings on Ti-6Al-4V alloy[J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 206(6): 1389-1395.
- 16 L Avril, B Courant, J Hantzpergue. Tribological performance of  $\alpha$ -Fe(Cr)-Fe<sub>2</sub>B-FeB and  $\alpha$ -Fe(Cr)-h-BN coatings obtained by laser melting[J]. Wear, 2006, 260(4): 351-360.
- 17 Liu Xiubo, Wang Huaming. Study on wear and high-temperature oxidation properties of laser clad metallic silicide composite coatings on TiAl intermetallic alloy[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(8): 1143-1149.  
 刘秀波, 王华明. TiAl 合金激光熔覆金属硅化物复合材料涂层耐磨性和高温氧化性能研究[J]. 中国激光, 2005, 32(8): 1143-1149.
- 18 J N Li, C Z Chen, Z Q Lin, *et al.*. Phase constituents and microstructure of laser cladding Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti<sub>3</sub>Al reinforced ceramic layer on titanium alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(14): 4882-4886.
- 19 O Kido, M Kurumada, K Kamitsuji, *et al.*. Synthesis of Al-Cr decagonal quasicrystal nanoparticles and their temperature of phase transformation to stable crystal phase[J]. Physica E, 2006, 31(2): 169-173.
- 20 M Zhang, B J Xu, G P Ling. Preparation and characterization of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film by low temperature thermal oxidation of Al<sub>8</sub>Cr<sub>5</sub> coating [J]. Applied Surface Science, 2015, 331: 1-7.
- 21 Y S Tian, C Z Chen, L X Chen, *et al.*. Microstructures and wear properties of composite coatings produced by laser alloying of Ti-6Al-4V with graphite and silicon mixed powders[J]. Materials Letters, 2006, 60(1): 109-113.
- 22 H M Wang, G Duan. Microstructure and wear resistance of a laser clad reinforced Cr<sub>3</sub>Si metal silicide composite coating[J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 336(1): 117-123.
- 23 Y S Mao, L Wang, K M Chen, *et al.*. Tribo-layer and its role in dry sliding wear of Ti-6Al-4V alloy[J]. Wear, 2013, 297(1): 1032-1039.
- 24 J DuttaMajumdar, B L Mordike, I Manna. Friction and wear behavior of Ti following laser surface alloying with Si, Al and Si+Al [J]. Wear, 2000, 242(1): 18-27.
- 25 B Bhushan. Introduction to Tribology[M]. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2013: 241-243.
- 26 H Guleryuz, H Cimenoglu. Oxidation of Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 472(1): 241-246.

栏目编辑: 吴秀娟