

# 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

冯淑容 张述泉 王华明

(北京航空航天大学材料学院大型整体金属构件激光直接制造教育部工程研究中心, 北京 100191)

**摘要** 以 54.51Ti-37.68Ni-7.81B<sub>1</sub>C(元素前数字为质量分数值)粉末混合物为原料,利用激光熔覆技术在 TA15 钛合金基材表面制得了以外加未熔 B<sub>1</sub>C 颗粒及快速凝固“原位”生成硼化钛和碳化钛为增强相,以金属间化合物 TiNi、Ti<sub>2</sub>Ni 为基体的复合涂层。采用光学显微镜(OM)、X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、能谱仪(EDS)等手段分析了涂层显微组织,并测试了涂层的二体磨粒磨损性能。结果表明,激光熔覆硬质颗粒增强金属间化合物复合涂层硬度高、组织均匀并表现出优异的抗磨粒磨损性能。高硬度、高耐磨的 B<sub>1</sub>C、硼化钛和碳化钛陶瓷增强相与高韧性 TiNi/Ti<sub>2</sub>Ni 金属间化合物基体的强韧结合是激光熔覆涂层优异耐磨性的主要原因,其磨损机理为轻微的显微切削和塑性变形。

**关键词** 激光技术;涂层;复合材料;激光熔覆;金属间化合物;磨损

**中图分类号** TG146.4;TG148 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0203002

## Wear Resistance of Laser Clad Hard Particles Reinforced Intermetallic Composite Coating on TA15 Alloy

Feng Shurong Zhang Shuquan Wang Huaming

(Engineering Research Center of Ministry of Education on Laser Direct Manufacturing for Large Metallic Components, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract** A wear resistant hard particles reinforced intermetallic composite coating is fabricated on TA15 titanium alloy by the laser cladding process using 54.51Ti-37.68Ni-7.81B<sub>1</sub>C powder blends as the precursor materials. Microstructure and worn surface morphologies of the coating are characterized by optical microscopy (OM), scan electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD) and energy dispersive X-ray analysis (EDS). Wear resistance of the coating is evaluated under abrasive wear condition. Results indicate the hard particles including additional B<sub>1</sub>C and in situ synthesized titanium boride and titanium carbide are uniformly distributed in the TiNi/Ti<sub>2</sub>Ni dual-phase intermetallic matrix. The coating has high hardness and exhibits excellent wear resistance. The mainly wear mechanism of laser clad coating is slight micro-cutting and plastic deformation.

**Key words** laser technique; coating; composite; laser cladding; intermetallic; wear

**OCIS codes** 310.1515; 310.3915

### 1 引 言

以形状记忆效应著称的 TiNi 基金属间化合物合金,由于其特有的伪弹性、强韧性好、耐蚀及生物相容性好等优点,已经成为机械、电子、化工和生物

医学领域中应用日益广泛的材料。近期研究<sup>[1-3]</sup>表明,近等原子比的 TiNi 合金虽然硬度很低,但却表现出比钴基耐磨合金 Co45 和渗氮钢 38CrMoAlA 优越的耐磨性,其可逆马氏体相变所导致的“超弹

收稿日期: 2011-09-13; 收到修改稿日期: 2011-10-12

基金项目: 国家 973 计划(2011CB060305)资助课题。

作者简介: 冯淑容(1985—),女,硕士研究生,主要从事钛合金激光熔覆涂层方面的研究。

E-mail: fengshurong2@yahoo.cn

导师简介: 王华明(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事激光材料加工与表面工程方面的研究。

E-mail: wanghuaming@buaa.edu.cn

性”被认为是其优良耐磨性的主要原因。在 Ti-Ni 二元合金系中,除 TiNi 外,还存在  $Ti_2Ni$  和  $Ni_3Ti$  两种金属间化合物。其中由于具有面心立方晶体结构及高硬度(700HV), $Ti_2Ni$  不仅具有良好的韧性而且广泛用于 TiNi 合金的沉淀析出强化相。高飞等<sup>[4,5]</sup>利用 52.04Ti-47.96Ni 合金粉末为原料,采用激光熔化沉积技术制备出了  $Ti_2Ni/TiNi$  双相合金,表现出比单相 TiNi 合金更优异的耐磨性。然而  $Ti_2Ni/TiNi$  合金低的显微硬度限制了其作为耐磨新材料的广泛应用。显然,添加高硬质陶瓷相对  $Ti_2Ni/TiNi$  合金进行增强是提高  $Ti_2Ni/TiNi$  合金耐磨性能的有效途径之一。

激光熔覆<sup>[6~8]</sup>具有能量高、冷却速度快、涂层稀释率小、工艺过程易于实现自动化等优势,是近年来广泛使用的一种新型表面改性技术。在高温下  $B_4C$  极易与 Ti 等金属完全反应生成高硬度、高熔点、耐磨性优异的  $TiB_2$  和 TiC 陶瓷颗粒,因此国内外研究学者对以  $B_4C$  和 Ti 为原料生成的  $TiB_2$  和 TiC 增强金属基复合材料进行了大量研究<sup>[9~13]</sup>。结果表明,复合材料的机械性能和耐磨性能都有显著提高。然而原位生成的  $TiB_2$  和 TiC 陶瓷颗粒尺寸细小,对于抵抗显微切削或磨粒磨损的能力远不如大尺寸硬质颗粒明显。 $B_4C$  具有仅次于金刚石和立方氮化硼的超高硬度<sup>[14~16]</sup>,因此在激光熔覆过程中,如果有意控制工艺参数,使  $B_4C$  部分熔解,让残留下来的  $B_4C$  颗粒作为粗大的硬质增强相,在抵抗磨粒磨损过程中充当第一道防护作用保护基体免受显微切削;让熔解的  $B_4C$  与 Ti 反应原位生成细小的  $TiB_2$ -TiC 颗粒弥散分布在基体中提高基体的硬度,同时支撑粗大的  $B_4C$  颗粒防止其脱落。通过不同尺寸陶瓷颗粒的共同配合,必将进一步提高复合材料的抗显微切削和抗磨粒磨损性能。

本文利用激光熔覆技术,以 54.51Ti-37.68Ni-7.81 $B_4C$  混合粉末为原料,在 TA15 钛合金表面上制备出了外加未熔  $B_4C$  颗粒及快速凝固“原位”生成硼化钛和碳化钛为增强相,以金属间化合物 TiNi、 $Ti_2Ni$  为基体的金属间化合物复合耐磨涂层,分析了该涂层的显微组织、硬度及耐磨性能。

## 2 试验方法

选用 TA15 钛合金(50 mm×20 mm×10 mm)为基材,以平均粒径为 120~200  $\mu m$  的纯钛、40~70  $\mu m$  的纯镍和 60~120  $\mu m$  的  $B_4C$  粉末混合物

[质量分数(下同)为 54.51Ti-37.68Ni-7.81 $B_4C$ ]作为激光熔覆合金原料。将上述粉末混合均匀后在 100  $^{\circ}C$  电炉下保温 12 h,然后置于经过磨削及清洗的 TA15 钛合金试样表面,预制粉末层厚度为 1.5 mm。激光熔覆试验在 4 kW 的 YLS-4000 光纤激光快速成形器上进行,成形腔中气氛氧体积分数小于  $8 \times 10^{-5}$ 。为了防止激光熔覆过程中  $B_4C$  完全熔解,实验采取了较低的激光功率和较快的扫描速度。具体的激光工艺参数为:激光功率 3.5 kW,光斑尺寸 4.5 mm,光束扫描速率 500 mm/min。

采用机械抛光方法制备金相试样,在室温条件下使用体积比为 1:4:5 的 HF、 $HNO_3$  和  $H_2O$  的混合溶液腐蚀 3~5 s。利用 Olympus BX51 M 和 Leica 型光学金相显微镜及 Apollo-300 和 JSM-6700F 型扫描电子显微镜(SEM)[自带能谱仪(EDS)]观察显微组织;用 Dmax-rB 旋转阳极 X 射线衍射(XRD)仪[采用  $CuK_{\alpha}$  靶材,扫描速度  $6(^{\circ})/min$ ,管压 40 kV]进行物相鉴定;用 HXZ-1000 型半自动显微硬度计测定显微硬度(载荷 200 g,加载保持时间 10 s)。

二体磨粒磨损实验在如图 1 所示的二体磨粒磨损机上进行, $SiC$  砂纸(粒度约 30  $\mu m$ )为对磨材料,以未进行激光熔覆处理的 TA15 钛合金试样作为标样,试样直径为 6 mm。试验参数为:法向载荷 11、17、23 N,转盘转速 0.5 m/s,磨损时间 60 s。用精度为 0.1 mg 的 Sartorius BS110 电子分析天平称取试样及标样的磨损量作为评价试样耐磨性的标准,磨损量越小,表明耐磨性越好。每次试验重复三次取平均值。使用 Apollo-300 型 SEM 对试样及标样二体磨粒磨损磨屑和磨损表面进行分析。利用原子力显微镜(AFM, Multimode Nanoscope III a, Veeco Instruments, USA)对磨损表面三维立体形貌进行测试。

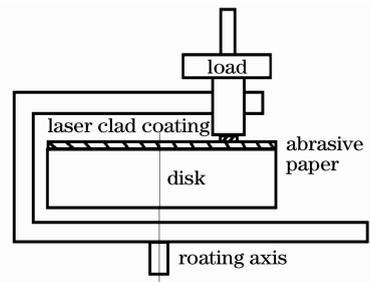


图 1 二体磨粒磨损试验机示意图

Fig. 1 Schematic illustration of abrasive wear tester

### 3 试验结果和讨论

#### 3.1 显微组织及硬度分析

图2为TA15钛合金表面预涂54.51Ti-37.68Ni-7.81B<sub>4</sub>C粉末激光熔覆涂层X射线衍射谱图。其主要组成相有TiNi(M)、Ti<sub>2</sub>Ni、TiB、TiC、TiB<sub>2</sub>和B<sub>4</sub>C。图3为激光熔覆硬质颗粒增强金属间化合物复合涂层横截面组织照片,可以看出通过激光工艺参数的控制,涂层中保留了较大量的B<sub>4</sub>C颗粒,且B<sub>4</sub>C颗粒在涂层中分布均匀,尺寸在几十微米之间。

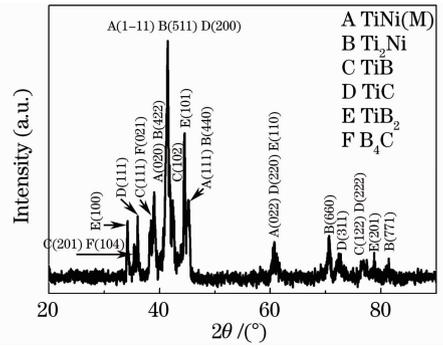


图2 激光熔覆涂层 XRD 谱图

Fig. 2 XRD pattern of the laser clad coating

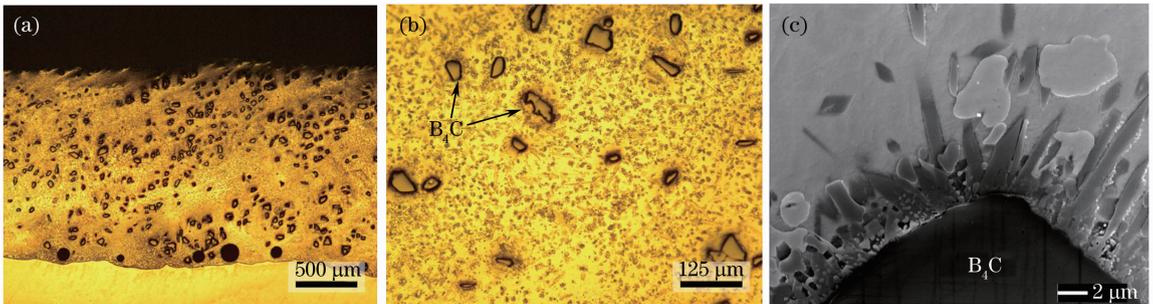


图3 激光熔覆涂层横截面组织照片。(a)低倍;(b)高倍;(c) B<sub>4</sub>C颗粒周围组织

Fig. 3 Overview longitudinal cross-section of laser clad coating. (a) Low magnitude; (b) high magnitude; (c) microstructure around B<sub>4</sub>C particle

图3(c)为B<sub>4</sub>C颗粒与基体之间的界面结合图,可以看出在激光熔覆过程中B<sub>4</sub>C与基体之间发生化学反应生成了一层明显的硼化钛和碳化钛过渡层,结合非常牢固。图4为激光熔覆硬质颗粒增强金属间化合物复合涂层B<sub>4</sub>C颗粒与基体组织之间的硬度分布曲线,可以看出B<sub>4</sub>C颗粒具有超高的显微硬度(3200HV),并且与基体之间硬度呈梯度分布,并不存在较大的突变,这进一步说明了部分溶解的B<sub>4</sub>C颗粒与基体之间有一层陶瓷层过渡,而不是简单的物理结合。另外由于原位生成的硼化钛和碳化钛均匀分布在涂层基体中,基体也呈现出了远高

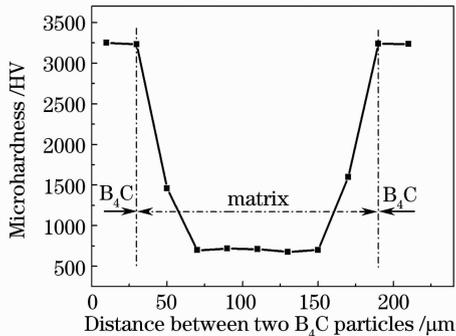


图4 激光熔覆涂层 B<sub>4</sub>C-基体组织之间显微硬度分布

Fig. 4 Microhardness profile between B<sub>4</sub>C and matrix of the laser clad coating

于TA15钛合金的硬度(700HV左右)。

图5为激光熔覆涂层基体组织的光学显微镜(OM)照片及背散射电子照片,可以看出激光熔覆涂层基体组织致密均匀、无裂纹,原位合成的硼化钛、碳化钛陶瓷均匀分布在TiNi-Ti<sub>2</sub>Ni双相金属间化合物中。图5(b)中的黑色颗粒即为硼化钛和碳化钛,而颜色较亮的区域为TiNi和Ti<sub>2</sub>Ni。进一步结合EDS分析结果得出,其中少量的树枝晶为TiNi(48.74Ti-48.13Ni-2.68Al-0.45V),枝晶间为Ti<sub>2</sub>Ni(65.7Ti-31.0Ni-2.73Al-0.5V)。另外,图5(c)表明原位生成的陶瓷相除了多边形块状和长条状初生硼化钛外,还有一种特殊的六边形硼化钛-碳化钛共晶组织,TiC呈菊花状自液相中领先析出,如图5(d)所示。这种共晶组织对抑制单相陶瓷的长大起到了积极的作用,同时有利于陶瓷韧性的提高。陶瓷含量测定结果表明,涂层中陶瓷相体积分数约23%。图6表明激光熔覆涂层与钛合金基材之间为完全冶金结合。

#### 3.2 激光熔覆涂层的耐磨性

图7为激光熔覆硬质颗粒增强金属间化合物复合涂层及TA15钛合金二体磨粒磨损试验结果,可见激光熔覆涂层具有优异的抗磨粒磨损性能。在不同实验载荷条件下,其磨损量都远低于TA15钛合金。另外,涂层磨损量随载荷增加变化极小,而

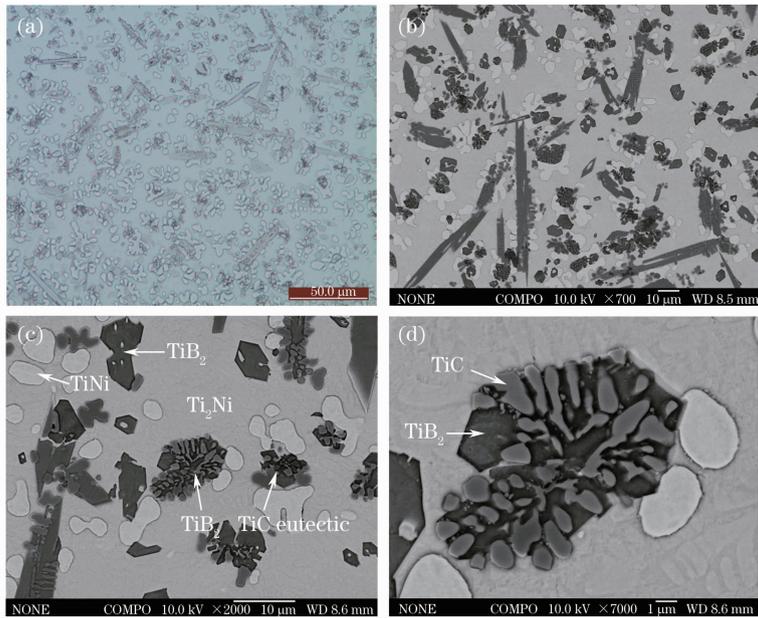


图 5 激光熔覆涂层基体组织照片。(a) OM 照片;(b)低倍扫描;(c)高倍扫描;(d) TiB<sub>2</sub>-TiC 共晶  
Fig. 5 Matrix microstructure of laser clad coating. (a) OM micrograph; (b) low magnification SEM micrograph; (c) high magnification SEM micrograph; (d) TiB<sub>2</sub>-TiC eutectic

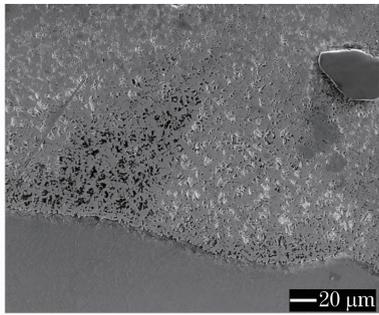


图 6 激光熔覆涂层与 TA15 钛合金基材结合处组织照片  
Fig. 6 Microstructure in the coating/TA15 titanium substrate transition zone of the coating

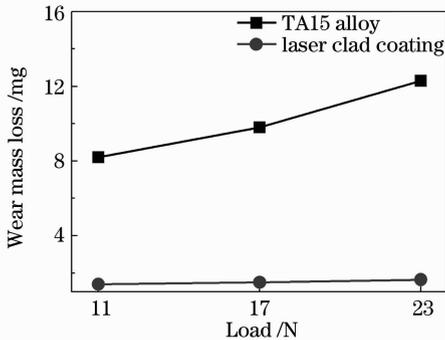


图 7 激光熔覆涂层和 TA15 钛合金二体磨粒磨损条件下磨损量与载荷的关系曲线  
Fig. 7 Wear mass losses of laser clad coating and TA15 titanium alloy as a function of loading under abrasive wear condition

TA15 钛合金磨损量随载荷增大迅速增加,表明激光熔覆涂层具有较低的磨损载荷敏感性,这对该涂层在重载下作为耐磨材料应用具有较好的前景。

图 8 给出了激光熔覆涂层和 TA15 钛合金在 11 N,60 s 二体磨粒磨损实验后的磨屑形貌,可见,基材 TA15 合金磨屑主要由条状卷曲物和少量多边形颗粒组成。EDS 分析结果表明条状卷曲物富含 Ti 元素,主要来自于 TA15 钛合金;多边形颗粒主要含 Si,是从砂纸上脱落的 SiC 颗粒,说明 TA15 钛合金遭到了 SiC 颗粒的严重切削磨损。而激光熔覆涂层磨屑中没有该条带卷曲物,均为从砂纸掉落下来的 SiC 颗粒,由于磨损量很少,很难发现涂层磨屑的存在。

进一步结合在 11 N,60 s 二体磨粒磨损后的磨损表面形貌(图 9),可以看出 TA15 钛合金表面有明显的显微切削和犁沟痕迹,激光熔覆涂层表面则为高低起伏的凹凸平面,大量 B<sub>4</sub>C 颗粒牢固固定在基体中没有剥落,磨损表面仅存在较为细小且浅显的显微切削或擦划痕迹[图 9(b)]。图 10 为激光熔覆涂层在 11 N,60 s 二体磨粒磨损后磨损表面凹凸界面处的利用原子力显微镜获得的三维立体形貌。从图 10 可知涂层具有极好的韧性,凹凸平面塑性变形高达 5 μm,但并没有发生材料的脱离或脆性断裂[图 9(b)]。

可见,激光熔覆硬质颗粒增强金属间化合物复合涂层优异的耐磨性是高硬、高耐磨 B<sub>4</sub>C 颗粒、硼

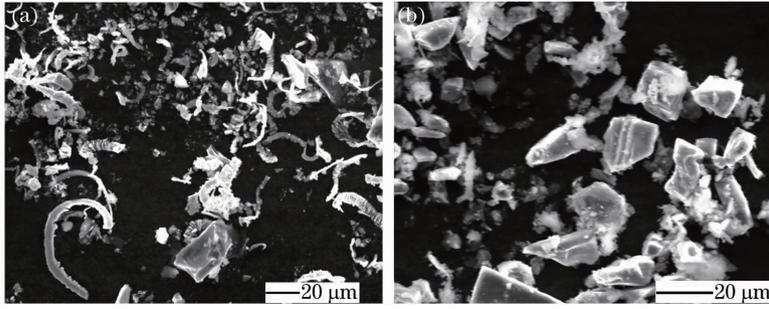


图 8 在 11 N, 60 s 二体磨粒磨损后的磨屑形貌。(a) TA15 钛合金;(b)激光熔覆涂层

Fig. 8 Wear debris morphologies of laser clad coating. (a) TA15 titanium alloy; (b) after abrasive wear at the load of 11 N for 60 s

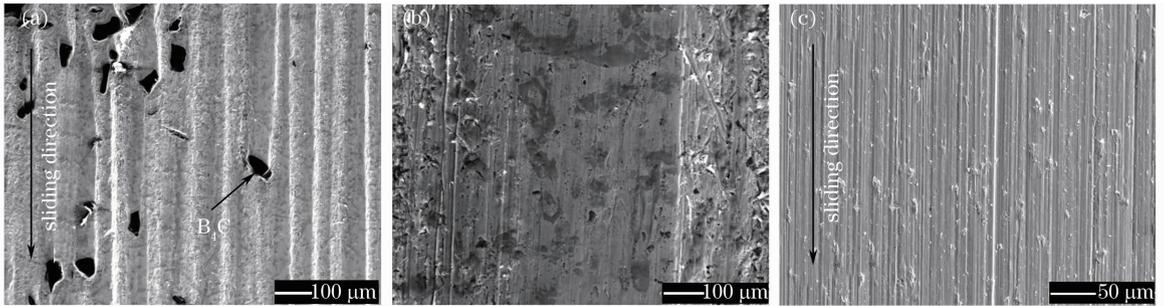


图 9 在 11 N, 60 s 二体磨粒磨损后的磨损表面。(a), (b)激光熔敷涂层;(c) TA15 钛合金

Fig. 9 Wore surface morphologies after abrasive wear test at the load of 11 N for 60 s. (a) and (b) laser clad coating; (c) TA15 titanium alloy

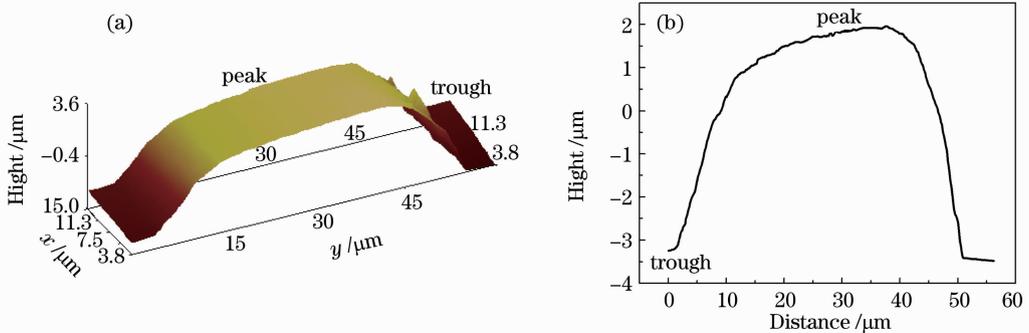


图 10 激光熔覆涂层二体磨粒磨损后磨损表面的 AFM 照片。(a)三维立体形貌;(b)高度曲线

Fig. 10 AFM micrographs of worn surface of the laser clad coating after abrasive wear test. (a) Photo of realistic image of worn surface; (b) hight profile in wear direction

化钛和碳化钛陶瓷增强相与良好韧性 TiNi-Ti<sub>2</sub>Ni 金属间化合物基体强韧结合的结果。首先,由于 B<sub>4</sub>C 颗粒具有超高硬度(3200HV)、与基体组织结合牢固且在涂层中分布均匀(图 3),在摩擦过程中不仅起到了抵抗尖锐 SiC 颗粒的第一道防护作用,还不断对 SiC 进行显微切削,导致其破裂脱落从而降低了 SiC 颗粒对涂层进一步磨损的能力。其次, B<sub>4</sub>C 与 Ti 反应原位生成的硼化钛和碳化钛显著提高了 TiNi-Ti<sub>2</sub>Ni 基体的硬度(700HV 左右),使得 SiC 磨粒不能像磨损 TA15 钛合金一样轻易对基体进行显微切削,只能通过反复划擦使涂层缓慢地磨

耗。最后,由于马氏体自协调导致超弹性的 TiNi 和面心立方结构的 Ti<sub>2</sub>Ni 金属间化合物基体具有良好的韧性,在摩擦过程中能够将陶瓷颗粒受到的力有效地转移到基体中然后通过塑性变形将应力释放而自身并不发生脆性断裂,从而显著缓解了陶瓷相与基体之间界面上的剪切应力,避免了 B<sub>4</sub>C、硼化钛和碳化钛在磨损过程中的剥落。在反复的磨粒磨损过程中,基体塑性变形不断累积就形成了如图 9,10 所示高低起伏的凹凸平面,其二体磨粒磨损机理主要为轻微的显微切削和塑性变形。

## 4 结 论

预涂 54.51Ti-37.68Ni-7.81B<sub>4</sub>C 粉末混合物对 TA15 钛合金进行激光熔覆,获得了以外加未熔 B<sub>4</sub>C 颗粒及快速凝固“原位”生成硼化钛和碳化钛为增强相,以金属间化合物 TiNi-Ti<sub>2</sub>Ni 为基体的复合涂层。在二体磨粒磨损条件下,激光熔覆硬质颗粒增强金属间化合物复合涂层表现出优异的抗磨粒磨损性能,其磨损机理为轻微的显微切削和塑性变形。高硬、高耐磨 B<sub>4</sub>C 颗粒、硼化钛和碳化钛陶瓷增强相与良好韧性 TiNi-Ti<sub>2</sub>Ni 金属间化合物基体的强韧结合是激光熔覆硬质颗粒增强金属间化合物复合涂层优异耐磨性的主要原因。

## 参 考 文 献

- 1 Li Ang, Li An, Zhang Lingyun *et al.*. Microstructure and wear resistance of laser melting deposited NiTi/Ni<sub>3</sub>Ti intermetallic alloys[J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, **16**(5): 867~873  
李 昂, 李 安, 张凌云等. 激光熔化沉积 NiTi/Ni<sub>3</sub>Ti 金属间化合物合金的显微组织和耐磨性[J]. *中国有色金属学报*, 2006, **16**(5): 867~873
- 2 D. Y. Li. Development of novel wear-resistant materials: TiNi-based pseudoelastic tribomaterials[J]. *Materials and Design*, 2000, **21**(6): 551~555
- 3 D. Y. Li. Development of novel tribo composites with TiNi shape memory alloy matrix[J]. *Wear*, 2003, **255**(1): 617~628
- 4 Gao Fei, Wang Huaming. Abrasive wear property of laser melting/deposited Ti<sub>2</sub>Ni/TiNi intermetallic alloy [ J ]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2007, **17**(6): 1358~1362
- 5 F. Gao, H. M. Wang. Dry sliding wear property of a laser melting/deposited Ti<sub>2</sub>Ni/TiNi intermetallic alloy [ J ]. *Intermetallics*, 2008, **16**(2): 202~208
- 6 Ma Xingwei, Jin Zhuji, Gao Yuzhou. Effect of rare earth La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on microstructure and tribological property of laser cladding FeAl based alloys and TiC reinforced composites coatings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 271~276  
马兴伟, 金洙吉, 高玉周. 稀土 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对激光熔覆铁铝基合金及 TiC 增强复合材料涂层组织及摩擦磨损性能的影响[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 271~276
- 7 Zhu Gangxian, Zhang Anfeng, Li Dichen. Effect of process parameters on surface smoothness in laser cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 296~301  
朱刚贤, 张安峰, 李涤尘. 激光熔覆工艺参数对熔覆层表面平整度的影响[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 296~301
- 8 Gao Xuesong, Huang Yinhui, Tian Zongjun *et al.*. Erosive wear resistance behavior of laser cladding Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 13% TiO<sub>2</sub> coating prepared by plasma spraying on titanium alloy surface[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 858~862  
高雪松, 黄因慧, 田宗军等. 钛合金表面激光熔覆等离子体喷涂 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 13% TiO<sub>2</sub> 涂层冲蚀磨损性能[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 858~862
- 9 Weijie Lu, Di Zhang, Xiaonong Zhang *et al.*. Creep rupture life of in situ synthesized (TiB + TiC)/Ti matrix composites[J]. *Scripta Mater.*, 2001, **44**(10): 2449~2455
- 10 Yafeng Yang, Huiyuan Wang, Yunhong Liang *et al.*. Fabrication of steel matrix composites locally reinforced with different ratios of TiC/TiB<sub>2</sub> particulates using SHS reactions of Ni-Ti-B<sub>4</sub>C and Ni-Ti-B<sub>4</sub>C-C systems during casting[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, **445-446**: 398~404
- 11 Minmin Wang, Weijie Lu, Jining Qin *et al.*. Effect of volume fraction of reinforcement on room temperature tensile property of in situ (TiB + TiC)/Ti matrix composites[J]. *Materials and Design*, 2006, **27**(6): 494~498
- 12 G. Wen, S. B. Li, B. S. Zhang *et al.*. Reaction Synthesis of TiB<sub>2</sub>-TiC composites with enhanced toughness[J]. *Acta Mater.*, 2001, **49**(8): 1463~1470
- 13 Tian Hao, Geng Lin, Ni Ding *et al.*. Microstructure of laser cladding coating with pre-placed B<sub>4</sub>C and B<sub>4</sub>C + Ti powders on TC<sub>4</sub> substrate[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, **36**(3): 420~423  
田 浩, 耿 林, 倪丁瑞等. TC<sub>4</sub> 合金表面激光熔覆 B<sub>4</sub>C 及 B<sub>4</sub>C + Ti 粉末涂层的微观组织[J]. *稀有金属材料科学与工程*, 2007, **36**(3): 420~423
- 14 Ding Shuo, Wen Guangwu, Lei Tingquan. The development of boron carbides [J]. *Materials Science & Technology*, 2003, **11**(1): 101~105  
丁 硕, 温广武, 雷廷权. 碳化硼材料研究进展[J]. *材料科学与工程*, 2003, **11**(1): 101~105
- 15 Pei Lizhai, Xiao Hanning, Zhu Baojun *et al.*. Latest development of boron carbide powder and diphas ceramics[J]. *Rare Metals and Cemented Carbides*, 2004, **32**(4): 46~50  
裴立宅, 肖汉宁, 祝宝军等. 碳化硼粉末及其复相陶瓷的研究现状与进展[J]. *稀有金属与硬质合金*, 2004, **32**(4): 46~50
- 16 Q. C. Jiang, H. Y. Wang, B. X. Ma *et al.*. Fabrication of B<sub>4</sub>C particulate reinforced magnesium matrix composite by powder metallurgy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2005, **386**(1): 177~181

栏目编辑:韩 峰