

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0039-03

激光熔覆制备钛基耐磨功能梯度材料

赵 金^{1,2}, 回 丽^{2,3}, 胡芳友², 何雪泓¹, 母久方¹, 崔爱永²

¹ 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110004
² 海军航空工程学院 青岛分院, 山东 青岛 266041
³ 沈阳航空工业学院机械与汽车学院, 辽宁 沈阳 110006

摘要 以 Ti、陶瓷粉末和镍基自熔合金粉末按一定比例配置的混合粉末作为预置合金涂层, 采用 CO₂ 气体激光进行多层熔覆, 在 Ti600 合金表面制备出摩擦磨损性能沿厚度方向呈梯度变化的钛基功能梯度材料(FGM)。利用扫描电镜(SEM)及 X 射线能谱仪(EDX)分析了材料的微观组织和成份。结果表明, 采用合适的合金粉末成份和激光熔覆工艺参数, 可以获得原位自生 TiC 增强颗粒弥散分布且其含量呈梯度变化的钛基功能梯度材料。熔覆层组织均匀细密, 各熔覆层之间无明显界限, 且与基体呈良好冶金结合。

关键词 材料; 钛合金; 激光熔覆; 功能梯度材料; 原位自生; 显微结构

中图分类号 TN249; TG665 **文献标识码** A

Laser Cladding Ti-FGM of Wearing Properties

ZHAO Jin^{1,2}, HUI Li^{2,3}, HU Fang-you², HE Xue-hong¹, MU Jiu-fang¹, CUI Ai-yong²

¹ School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110006, China
² Naval Aeronautical Engineering Institute Qingdao Branch, Qingdao, Shandong 266041, China
³ School of Mechanical and Automobile, Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang, Liaoning 110006, China

Abstract By means of laser cladding process a Ti-functionally graded material (FGM) was successfully obtained based on Ti600 with preplaced powder mixtures of Ti, ceramic material and nickel based alloy powder. The wear properties of Ti-FGM presented a graded distribution. It was revealed that with a proper ratio of the mixed powder and laser cladding processing parameters, the Ti-FGM which reinforced by in situ formed TiC particles can be obtained. Light optical microscopy (LOM) and scanning electron microscopy (SEM) were used for analysis of microstructure. The results showed that, a functional graded material was successfully fabricated by laser cladding, TiC particles can be formed by in situ reaction of titanium and ceramic material. The first coating had good metallurgical bonding with the substrate. The coatings were continuous, homogeneous and crack-less with optimizing the technical parameters, and had no borderline.

Key words materials; titanium alloys; laser cladding; functionally graded material (FGM); in situ synthesis; microstructure

1 引 言

钛合金由于具有强度高、耐蚀性好等优点, 在航天航空工业中有着广泛的应用前景^[1], 但由于钛合金存在硬度低、耐磨性能差的缺点, 阻碍了其在摩擦构件上的应用, 因而如何提高钛合金的耐磨性引起了很多材料工作者的关注。由于受钛合金本性的限制, 沿用发展新型钛合金的传统合金设计思路, 难以有效克服钛合金的固有性能缺点^[2]。为提高钛合金的耐磨性, 已进行了包括高温渗氮及渗碳表面热处理、物理

气相沉积(PVD)及化学气相沉积(CVD)硬质耐磨层及等离子喷涂等研究^[3], 然而表面涂层和改性技术都存在不足。目前制备颗粒增强钛基复合材料的方法有粉末冶金法、熔铸法、燃烧合成法、接触反应法和激光熔覆法等^[4~7], 但制备的复合材料有一明显界面, 其主要性能在空间上呈阶梯状分布, 在高温下由于热膨胀系数相差较大, 易发生剥落损伤。

为改善钛合金磨损性能差的缺点, 也可以制备钛合金复合材料, 为此本文利用激光熔覆的方法, 在

作者简介: 赵 金(1980—), 女, 河北涿州市人, 硕士研究生, 主要从事激光加工技术的研究。E-mail: zhaojinapple@126.com

导师简介: 胡芳友(1960—), 男, 辽宁西丰县人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光加工技术的研究。

E-mail: huhul2001@126.com

钛合金表面制备出了原位自生 TiC 颗粒增强的钛基功能梯度材料,它的耐磨性能沿厚度方向呈梯度变化,并分析了各熔覆层成份的变化情况。

2 实验材料及方法

2.1 基材及合金粉末成份

基材为 Ti600 合金,其化学成份如表 1。试样尺寸为 15 mm×10 mm×5 mm,对其表面进行激光熔覆处理。激光熔覆用合金粉末为工业纯度的 Ti 粉,陶瓷粉末和镍基自熔合金粉末,其粒径为 60~70 μm,在实验过程中三种粉末按不同比例配制并机械混合。

表 1 Ti600 合金的化学成份

Table 1 Chemical composition of Ti600 alloy

Element	Al	Sn	Zr	Mo	Si	Y	Ti
Weight percent /%	6.0	2.8	4.0	0.5	0.4	0.1	86.2

2.2 激光熔覆处理

在基体材料表面预涂厚度为 1.0 mm 的粉末。选择合适的激光熔覆工艺参数进行扫描,在第 1 层粉末熔覆之后,在其上以同样的方法预置其他两层合金粉末,并使涂层均匀、表面光滑,最后在钛合金基体上制备出 3 层成份渐变的熔覆层。利用连续波 CO₂ 激光器(4000 型)进行激光熔覆,工艺条件为:功率 1.0~2.5 kW,扫描速度 2~16 mm/s,光斑直径 2 mm。激光熔覆过程中采用环状 Ar 保护,其流量为 10 L/min。

我们利用 SSX-550 型扫描电镜(SEM)和 X 射线能谱仪(EDX)进行组织及成份的检测。

3 实验结果及分析

3.1 熔覆层的显微组织

图 1~3 分别为熔覆层与基材及各熔覆层之间结合区组织的 SEM 照片。可见,第 1 层熔覆层与基材之间形成了良好的冶金结合,熔覆层成形良好,组织细密。第 1 层熔覆层与第 2 层之间以及第 2 层与第 3 层熔覆层之间结合良好,层与层之间没有明显的分界线。从基材到第 1 层、第 2 层再到第 3 层熔覆层的组织特征均不同,且呈梯度变化,这些组织特征与结合区的凝固过程、熔覆层粉末成份以及激光熔覆工艺参数有直接关系。在第 1 层熔覆区与基材之间存在一个厚度为 5 μm 左右的过渡区,其结晶形态的变化主要受 G/V (G 为温度梯度; V 为结晶速度)的控制^[4]。此区域为沿热流方向形成的条状

晶,此后结晶形态由条状晶向等轴晶转变,最后形成更细小均匀的等轴晶。

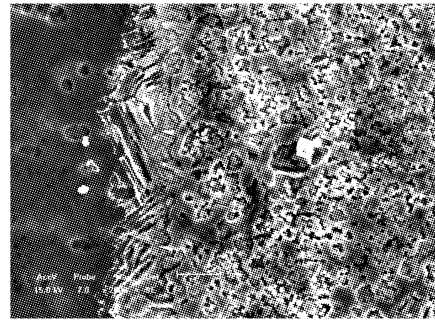


图 1 第 1 层熔覆层与基材结合区的 SEM 图

Fig. 1 SEM pattern of Ti600 alloy and No. 1 clad layer

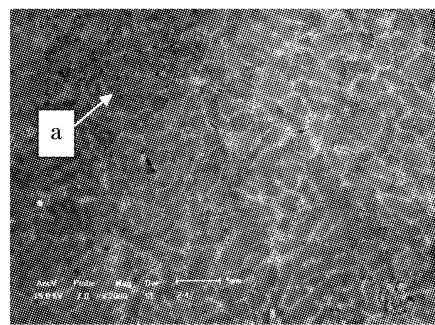


图 2 第 1 层与第 2 层熔覆层结合区的 SEM 图

Fig. 2 SEM microstructure of No. 1 and No. 2 clad layer

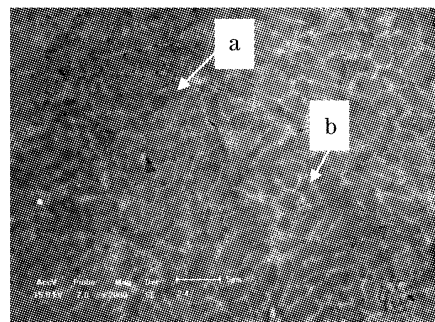


图 3 第 2 层与第 3 层熔覆层结合区的 SEM 图

Fig. 3 SEM microstructure of No. 2 and No. 3 clad layer

第 1 层熔覆层由黑色颗粒状和灰色条状相组成,图 2 中 a 点所示的灰色条状相的能谱分析表明,该区域成份的原子百分比为:Ti 为 63.96%,Ni 为 27.47%,Al 为 8.57%,灰色相可能是 Ti 中固溶了 Al, Ni 元素。第 2 层熔覆层组织是均匀分布的黑色球状颗粒和深灰色块状相,熔覆层组织均匀细小。图 3 中 a 点所示为黑色球状颗粒,其成份的原子百分比为:Ti 为 47.66%,C 为 40.80%,Ni 为 6.06%,Al 为 0.30%,Cr 为 5.19%。从原子数量比分析可知,黑色球状颗粒可能是 TiC 相,可见 TiC 增强相均匀地分布在熔覆层中。从图 3 中还可知,第 3 层熔覆层为灰色球状相以及其间的白色条状相,并在灰色基底上分布有黑色颗粒状相。黑色颗粒状相 b 的能谱分析(EDX)如图 4

所示,其成份的原子百分比为:Ti 为 49.03%,C 为 43.74%,Ni 为 3.02%,Al 为 0.53%,Cr 为 3.68%。可见其主要元素为 Ti 和 C,而且 Ti 和 C 的原子百分比很接近 1:1,所以可能是原位生成的 TiC,后期的耐磨性试验已证明其存在性。

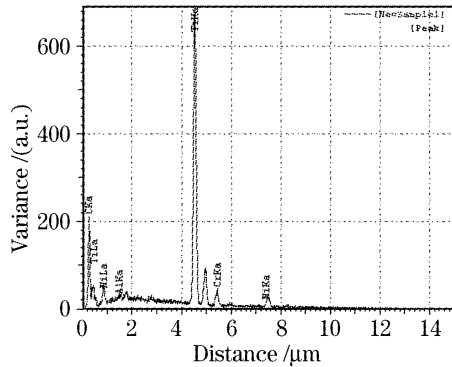


图 4 第 3 层熔覆层中黑色颗粒状相的 EDX 图

Fig. 4 EDX pattern of TiC particulates in No. 3 layer

3.2 功能梯度材料的形成

图 5 所示为激光熔覆层线扫描分析元素分布情况。可以看出,选择合理的粉末成份配比以及激光熔覆工艺参数,可获得组成元素沿厚度方向呈梯度变化的钛基功能梯度材料。从钛合金基体到熔覆层顶部,主要成份 Ti, Ni 的含量均呈梯度变化。Ti 的含量由基体到熔覆层上部逐渐降低, Ni 的含量逐渐增加。后续的耐磨试验及其表面能谱分析结果显示,熔覆层中原位生成了增强颗粒 TiC,且其含量沿厚度方向,即从基体到熔覆层呈逐渐增加的梯度变

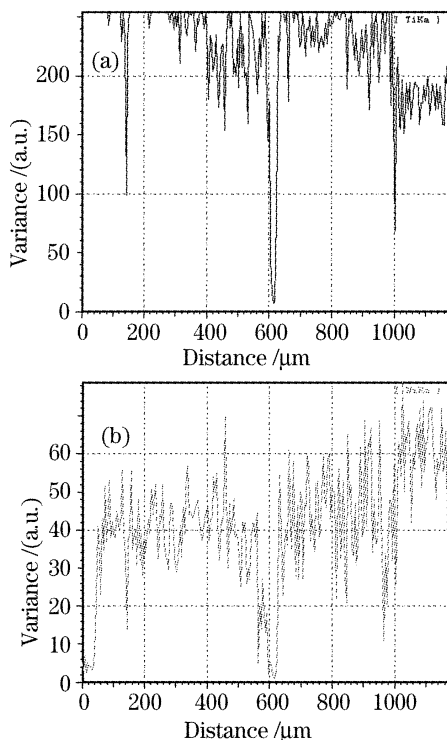


图 5 激光熔覆层线性扫描结果

Fig. 5 Linear scanning element of laser clad layer

化。基材 Ti600 合金在 600~650 °C 均具有较好的性能,尤其是在蠕变性能方面超过了国外 IMI834 合金,是高温(600 °C)钛合金的典型代表。TiC 陶瓷颗粒的耐磨性能高,将有可能提高基材的耐磨擦磨损性能,从而形成耐磨性能沿厚度方向呈梯度变化的钛基功能梯度材料。

4 结 论

利用预涂合金粉末多层熔覆方法,通过优化工艺参数和粉末成份配比,可在 Ti600 合金表面制备出基材和各熔覆层之间结合良好的钛基功能梯度材料。整个熔覆层的主要组成元素如 Ti, Ni, C 和 Cr 等的含量均呈梯度变化,原位生成了耐磨性增强颗粒 TiC。

参 考 文 献

- Zhang Song, Zhang Chunhua, Wu Weitao *et al.*. An in situ formed TiC particle reinforcement composite coating induced by laser melting on surface of alloy Ti6Al4V and its wearing performance [J]. *Metal. Sinica*, 2001, **37**(3): 315~320
张松,张春华,吴维涛等. Ti6Al4V 表面激光熔覆原位自生 TiC 颗粒增强钛基复合材料及摩擦磨损性能 [J]. *金属学报*, 2001, **37**(3): 315~320
- Wang Huaming. Research progress on laser surface modifications of metallic materials and laser rapid forming of high performance metallic components [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2002, **23**(5): 473~478
王华明. 金属材料激光表面改性 with 高性能金属零件激光快速成形技术研究进展 [J]. *航空学报*, 2002, **23**(5): 473~478
- Jiang Ping, Zhang Jijuan, Yu Ligen *et al.*. Wear-resistant Ti5Si3/Ti composite coatings made by laser surface alloying [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2000, **29**(4): 269~272
蒋平,张继娟,于利根等. Ti-6Al-4V 合金化制备 Ti5Si3/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
- Sun Ronglu, Guo Lixin, Dong Shangli *et al.*. Microstructure of laser-clad NiCrBSiC coating on the surface of titanium alloy [J]. *J. Jimusi University (Natural Science Edition)*, 2000, **18**(3): 214~218
孙荣禄,郭立新,董尚利等. 钛合金表面激光熔覆 NiCrBSiC 合金涂层的显微组织 [J]. *佳木斯大学学报(自然科学版)*, 2000, **18**(3): 214~218
- Zhang Song, Zhang Chunhua, Kang Yuping *et al.*. Mechanism of in-situ formation of TiC particle reinforced Ti-based composite coating induced by laser melting [J]. *The Chinese J. Nonferrous Metals*, 2001, **11**(6): 1026~1030
张松,张春华,康煜平等. 钛合金表面激光熔覆原位生成 TiC 增强复合涂层 [J]. *中国有色金属学报*, 2001, **11**(6): 1026~1030
- Wu Wanliang, Wang Zhenting, Sun Jianfeng *et al.*. Microstructure and strengthening mechanisms of titanium matrix composite layer by laser cladding [J]. *China Surface Engineering*, 2005, **18**(4): 9~12
武万良,王振廷,孙俭峰等. 钛基复合材料激光熔覆层显微组织及其强化机制 [J]. *中国表面工程*, 2005, **18**(4): 9~12
- Liu Yuanfu, Wang Huaming. Microstructure and wear resistance of laser clad Ti5Si3 reinforced wear resistant inter metallic composite coating [J]. *Tribology*, 2003, **23**(1): 10~13
刘元富,王华明. 激光熔敷 Ti5Si3 增强金属间化合物耐磨复合材料涂层组织及耐磨性研究 [J]. *摩擦学报*, 2003, **23**(1): 10~13