

文章编号: 0258-7025(2008)11-1718-05

激光熔注 WC_p/Ti-6Al-4V 梯度复合材料层形成机制

陈彦宾 刘德健 李俐群 李福泉 陈树海

(哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 采用激光熔注(LMI)技术在 Ti-6Al-4V 表面制备了 WC_p/Ti-6Al-4V 梯度复合材料(MMC)层,对其形成机制进行了研究。研究表明,WC 颗粒在复合材料层中的分布与其初始速度 v_0 、穿越熔池表面最小临界速度 v_{\min} 以及熔池粘度 η 有关。由于 WC 陶瓷颗粒密度大,在激光熔注过程中具有较高的动能,熔池粘度不再是决定梯度复合材料层形成的关键因素。对于 WC/Ti 材料体系,熔池凝固前沿是形成 WC_p/Ti-6Al-4V 梯度复合材料层的重要因素,复合材料层不同深度范围内 WC 颗粒的数量由这一深度熔池凝固前沿长度所决定。WC 颗粒注入位置对其在复合材料层中的分布有很大影响。在 WC 颗粒由熔池后部“拖尾”注入的情况下,该区域熔池深度较浅,WC 颗粒遇到的熔池凝固前沿位于较高的位置,大多数 WC 颗粒被“冻结”在复合材料层的上部,进而形成了 WC_p/Ti-6Al-4V 梯度复合材料层。

关键词 激光技术; 梯度复合材料; 激光熔注

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083511.1718

Formation Mechanism of WC_p/Ti-6Al-4V Graded Metal Matrix Composites Layer Produced by Laser Melt Injection

Chen Yanbin Liu Dejian Li Liqun Li Fuquan Chen Shuhai

(State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology,
Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract WC_p/Ti-6Al-4V graded metal matrix composites (MMC) layer was produced by the laser melt injection (LMI) process and the formation mechanism of the graded layer was studied. The results show that the initial speed of the particle (v_0), the minimum velocity of injected particles necessary for penetrating through the melt surface (v_{\min}) and the viscosity of the melt pool (η) play key roles in the distribution of the WC particle. With big density, the WC particle has high kinetic energy during the laser melt injection process, and therefore the viscosity of the melt pool is not a critical factor anymore. The solidification front of the solid-liquid interface of the melt pool is the most sensitive factor that determines the formation of the graded layer when the WC particle is used as injection particle. Meanwhile, the total amount of WC particle at different depth of the MMC layer is dominated by the length of the solidification front in this depth. The injection location plays an important role in the distribution of WC particles. When the WC particles are injected into the extended part of melt pool, the depth of this region is low, and the WC particles meet the solidification front at higher position. In that case, most WC particles are trapped at the top part of the melt pool and therefore a WC_p/Ti-6Al-4V graded metal matrix composites layer is formed.

Key words laser technique; graded metal matrix composites; laser melt injection

1 引言

梯度复合材料(MMC)是近些年发展起来的一

种新兴材料。由于实现了材料成分和结构在空间的梯度分布,梯度复合材料具有常规材料不具备的一些特殊性能。Suresh^[1]在《科学》杂志上报道的最新

收稿日期:2008-09-16; 收到修改稿日期:2008-10-08

作者简介:陈彦宾(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事激光加工理论与应用方面的研究。

E-mail:chenyb@hit.edu.cn。

研究表明,成分和结构呈梯度分布可以显著改善材料的表面性能,这为梯度复合材料的发展,尤其是在表面领域的发展提供了理论基础。

Ti-6Al-4V 具有比强度高、耐腐蚀等优点,广泛应用于航天、航空领域。但较差的耐磨性能使其在很多领域的应用受到限制^[2]。在 Ti-6Al-4V 表面制备一层颗粒增强的复合材料层已经被证实是改善其表面性能的有效方法^[3~7]。激光熔覆技术通常被认为是制备复合材料层的理想方法^[8]。但是,近年来随着梯度复合材料的迅速发展,“梯度”的概念被引入了颗粒增强复合材料领域。Pei 等^[9]于 2002 年采用激光熔注(LMI)SiC 陶瓷颗粒的方法,首次在 Ti-6Al-4V 表面成功地制备了 SiC 颗粒呈梯度分布的 SiC_p/Ti-6Al-4V 梯度复合材料层。这一突破性的研究结果不但使 Ti-6Al-4V 表面强化研究进入一个新的阶段,也充分显示了激光熔注技术在金属表面制备颗粒增强复合材料层的优势^[10~12]。

但是, SiC 在高温时与 Ti 反应剧烈,容易形成大量的金属间化合物和较厚的反应层,使复合材料层脆性增加。此外, Ti-6Al-4V 和 SiC 之间线膨胀系数差异较大,复合材料层的开裂倾向较大^[13]。由于 WC 和 Ti-6Al-4V 的线膨胀系数接近,而且高温时与 Ti 的反应不像 SiC 那么剧烈,复合材料层的开裂倾向明显降低,WC 陶瓷也因此被认为是 Ti-6Al-4V 理想的增强颗粒^[14]。但是多晶 WC 颗粒自身强度较低,容易发生沿晶断裂,使复合材料层的强度明显降低。另外,由于 WC 颗粒在复合材料层分布不够理想,复合材料层存在较大的残余应力,这一残余应力虽然没有导致复合材料层开裂,但使其强度明显降低。针对上述问题,本文作者选用高强度的单晶 WC 陶瓷作为增强颗粒,采用激光熔注技术在 Ti-6Al-4V 表面成功制备了 WC 颗粒呈梯度分布的复合材料层,详见文献^[12]。由于 WC 颗粒实现了梯度分布,复合材料层残余应力明显降低,强度提高了 17%^[15]。

目前,对激光熔注技术制备的梯度复合材料层形成机制的理解尚不够深入。Pei 等^[9]对 SiC_p/Ti-6Al-4V 梯度复合材料层的形成机制进行了研究。他们认为注入颗粒在复合材料层深度方向的分布主要由颗粒的注入深度决定的。而注入深度与熔池粘度 η , 注入颗粒速度 v , 注入颗粒穿越熔池表面所需最小速度 v_{\min} 以及熔池停留时间 t 有关。但是,对于 WC 颗粒而言,由于密度远大于 SiC,所以 WC_p/Ti-6Al-4V 梯度复合材料层的形成机制可能会与

SiC_p/Ti-6Al-4V 体系存在较大的差别。因此,本文在借鉴相关文献研究方法和重要结论的基础上,研究 WC_p/Ti-6Al-4V 梯度复合材料层的形成机制。

2 实验材料及方法

激光熔注实验采用单晶 WC 陶瓷粉末作为注入材料,平均尺寸为 80 μm ,近似球形,实验前经过乙醇清洗并烘干。基体材料为 Ti-6Al-4V,尺寸为 5 mm×33 mm×67 mm。激光熔注实验详细描述见文献^[12]。激光熔注过程简要描述如下:首先高功率密度的激光束辐照 Ti-6Al-4V 表面产生熔池,送粉器将 WC 粉末由熔池后部“拖尾”注入到熔池中,在熔池的快速凝固过程中,WC 颗粒来不及熔化就被“冻结”起来,最终形成颗粒增强的复合材料层。WC 颗粒注入方向与激光扫描方向相同。实验采用负离焦,激光束光斑直径为 3 mm,采用同轴氩气保护。熔注实验优化的参数为:激光功率密度 $P = 209 \text{ W/mm}^2$,扫描速度 $v = 0.5 \text{ m/min}$,送粉率 $m = 125 \text{ mg/s}$,载气流量为 5 L/min。

3 实验结果与分析

3.1 WC_p/Ti-6Al-4V 梯度复合材料层宏观特征

图 1 是采用激光熔注技术制备的 WC_p/Ti-6Al-4V 梯度复合材料层横截面形貌。从图中可以看出,WC 颗粒在激光熔注过程中并未熔化,仍然保持着原有的形状,注入到熔池的整个深度和宽度范围内。复合材料层的宽度为 2.3 mm,厚度最大为 0.75 mm。

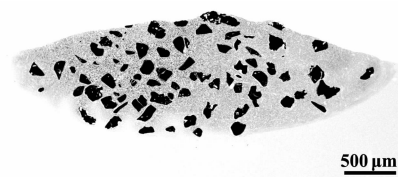


图 1 复合材料层横截面形貌

Fig. 1 Cross section of the composites layer produced by LMI

为了分析 WC 颗粒在复合材料层深度方向的分布情况,将复合材料层的纵截面分成不同层,分别计算出每一层 WC 体积分数,这样就得到了 WC 在复合材料层深度方向分布曲线,如图 2 所示。在复合材料层深度方向,WC 的体积分数先增加,在距离表面约 250 μm 时达到最大值,随着深度的进一步增加,WC 的体积分数减少,整体上呈梯度分布。扫描速度对复合材料层中 WC 体积分数有较大影响。

扫描速度越大,复合材料层中 WC 分布梯度越明显。

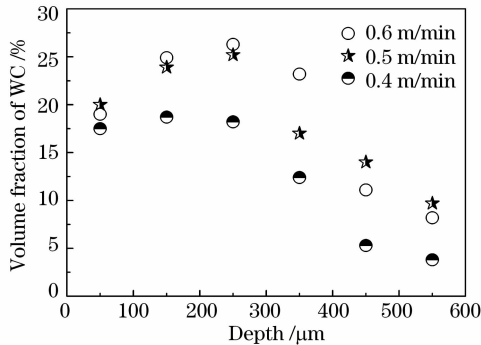


图 2 WC 颗粒在复合材料层深度方向的体积分数
Fig. 2 WC_p volume fraction in depth direction
of the composites layer

3.2 WC_p/Ti-6Al-4V 梯度复合材料层形成机制

3.2.1 WC 颗粒注入过程

为了研究梯度复合材料层的形成机制,将 WC 颗粒的注入过程分为:穿越熔池表面的过程和熔池中运动的过程。为了便于分析,假设 WC 颗粒是球形的,当穿越熔池表面时,其受到的阻力主要有两个:一个是熔池表面张力;另一个是与熔池接触形成新的界面而引起界面能的升高。因此,WC 颗粒若要穿越熔池表面,就必须具有足够高的动能来抵消这些阻力。这样,就存在一个最小临界速度 v_{\min} 。只有当 WC 颗粒的初始速度大于 v_{\min} 时,才能穿越熔池表面。 v_{\min} 可以计算为^[16]

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{3}{2\sigma_{lv}R\rho_p}(\sigma_{lv} + \sigma_{lp} - \sigma_{pv})} \quad (1)$$

式中 R 为 WC 颗粒半径, ρ_p 为 WC 颗粒密度, σ 为两相之间的界面张力,下标 l, p 和 v 分别代表液相、固相和气相。

各相之间界面张力值分别为: $\sigma_{pv} = 1920 \text{ mJ/m}^2$, $\sigma_{lp} = 1000 \text{ mJ/m}^2$, $\sigma_{lv} = 1650 \text{ mJ/m}^2$ 。这样可以通过(1)式计算得到 WC 颗粒穿越熔池表面所需的最小速度 v_{\min} (垂直于熔池表面方向)为 0.88 m/s 。

这样,穿越熔池表面后 WC 颗粒的速度 v_r 为

$$v_r = \sqrt{v_0^2 - v_{\min}^2}, \quad (2)$$

式中 v_0 是 WC 颗粒到达熔池表面时垂直熔池表面方向的速度。

WC 颗粒进入熔池后,受力情况发生改变。作用于 WC 颗粒的力有两个:一个是斯托克斯力 (Stokes' force) $F^{(1)}$

$$F^{(1)} = -6\pi R\eta v(t) \quad (3)$$

式中 η 为熔池粘度, $v(t)$ 是 WC 颗粒在熔池中的速度。

另一个是在熔池中受到的浮力 $F^{(2)}$, 根据阿基米德定律, $F^{(2)}$ 可表示为

$$F^{(2)} = \frac{4}{3}\pi R^3(\rho_p - \rho_{Ti})g, \quad (4)$$

式中 ρ_{Ti} 是 Ti 的密度。根据牛顿第二定律,式(3)和(4)可以改写为

$$F^{(1)} + F^{(2)} = \frac{4}{3}\pi R^3\rho_p \frac{dv}{dt}. \quad (5)$$

如果用 $z(t)$ 表示 t 时刻 WC 颗粒在熔池中的穿越深度,那么可以得到

$$v(t) = \frac{dz}{dt}. \quad (6)$$

对(5)和(6)式进行积分,并且带入初始条件 $z|_{t=0} = 0$ 和 $v|_{t=0} = v_r$, 那么可以得到 WC 颗粒在熔池中穿越深度随时间的关系

$$z(t) = \frac{1}{c^2}[bct - (b - v_r c)(1 - e^{-ct})], \quad (7)$$

其中, $b = g\left(1 - \frac{\rho_{Ti}}{\rho_p}\right)$, $c = \frac{9\eta}{2R^2\rho_p}$ 。

由式(7)可以看出,WC 颗粒在熔池中穿越深度与 WC 颗粒的初始速度 v_0 , WC 颗粒穿越熔池表面最小临界速度 v_{\min} 以及熔池粘度 η 有关。由于 v_{\min} 已知,若要预测 WC 颗粒在熔池中穿越深度,必须先计算出 WC 颗粒的初始速度 v_0 和熔池粘度 η 。

3.2.2 WC 颗粒速度

在激光熔注过程中,增强颗粒是由送粉装置通过载气流将其送入送粉喷嘴,然后注入到熔池中。该过程的载气流属于气-固两相流,其运动过程非常复杂,经过一段时间输运后,颗粒的速度趋于准稳态,但在一定范围内波动,所以很难精确计算出颗粒的速度。通常情况下,认为达到准稳态颗粒的速度与载气流速相同。也就是说,颗粒在送粉喷嘴处的速度即为载气流速。

Fu 等^[17]在研究旁轴送粉式激光熔覆过程中粉末与激光相互作用时,根据流体动力学的经典理论,推导出了颗粒离开送粉喷嘴后不同位置时速度的公式

$$v_p = \frac{32D_p^2 v_g^2 \cos^2 \theta}{32\nu r}, \quad (8)$$

其中 v_p 为颗粒速度, v_g 为载气流速度, D_p 为颗粒直径, θ 为粉末流发散角, ν 为载气流的动力粘度, r 为送粉喷嘴至熔池表面的距离。

在熔注过程中,送粉喷嘴至熔池表面的距离 r

4 结 论

1) WC 颗粒在熔池中穿越深度是决定复合材料层 WC 颗粒分布的主要因素, WC 颗粒穿越深度与其初始速度 v_0 、穿越熔池表面最小临界速度 v_{\min} 以及熔池粘度 η 有关。

2) WC 颗粒密度大, 在激光熔注过程中动能高, 对熔池粘度的影响不敏感, 熔池粘度不再是决定梯度复合材料层形成的关键因素。

3) 熔池固-液界面凝固前沿是形成 WC_p/Ti-6Al-4V 梯度复合材料层的重要因素, 复合材料层不同深度范围内 WC 颗粒的数量不再由熔池的粘度决定, 而是由这一深度范围内熔池凝固前沿长度所决定。

参 考 文 献

- S. Suresh. Graded materials for resistance to contact deformation and damage[J]. *Science*, 2001, **292**(29): 2447~2451
- Ding Hongyan, Dai Zhendong. Fretting wear characteristics of titanium alloy in sea water[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, **36**(5): 778~781
丁红燕, 戴振东. 钛合金在海水中的微动磨损特性[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, **36**(5): 778~781
- Zhang Weiping, Liu Zhonghua. Study on microstructure of in-situ synthesis of TiC-Cr7C3-Ti-Ni metal-ceramics composite coating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1091~1094
张维平, 刘中华. 激光熔覆原位合成 TiC-Cr7C3-Ti-Ni 金属复合材料涂层[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1091~1094
- Wang Weitian, Sun Yuming, Dai Zhenhong *et al.*. Third-order optical nonlinearity and preparation of Au-BaTiO₃ composite films by pulsed laser deposition[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1265~1268
王伟田, 孙玉明, 戴振宏等. Au-BaTiO₃ 复合薄膜的脉冲激光沉积制备及其非线性光学效应[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1265~1268
- Xu Bin, Lou Baiyang, Bai Wanjin *et al.*. Synthesis of SiC/Ni composite coatings by laser cladding and property of erosion resistance[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 147~150
徐斌, 楼白杨, 白万金等. 激光熔覆制备 SiC/Ni 基复合涂层及其耐冲蚀性能[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 147~150
- Wang Wenli, Chao Mingju, Wang Dongsheng *et al.*. Investigation on in-situ synthesis of TaC particulate reinforced ni-based composite coatings by laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 277~282
王文丽, 晁明举, 王东升等. 原位生成 TaC 颗粒增强镍基激光熔覆层[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 277~282
- Liu Dejian, Chen Yanbin, Li Fuquan *et al.*. WC particulate reinforced metal matrix composites layers produced by laser melt injection[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1083~1086
刘德健, 陈彦宾, 李福泉等. 激光熔注法制备 WC 颗粒增强金属基复合材料层[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1083~1086
- Huang Yanlu, Yang Yongqiang, Wei Guoqiang *et al.*. Boundary coupled dual-equation numerical simulation on the mass transfer in the process of laser cladding[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(5): 356~360
- Y. T. Pei, V. Ocelik, J. Th. M. De Hosson. SiC_p/Ti6Al4V functionally graded materials produced by laser melt injection [J]. *Acta Materialia*, 2002, **50**(8): 2035~2051
- D. J. Liu, L. Q. Li, F. Q. Li *et al.*. WC_p/Fe metal matrix composites produced by laser melt injection[J]. *Surface and Coating Technology*, 2008, **202**(9): 1771~1777
- J. D. Ayers, T. R. Tucker. Particulate-TiC-hardened steel surfaces by laser melt injection [J]. *Thin Solid Films*, 1980, **73**(1): 201~207
- Y. B. Chen, D. J. Liu, F. Q. Li *et al.*. WC_p/Ti-6Al-4V graded metal matrix composites layer produced by laser melt injection[J]. *Surface and Coating Technology*, 2008, **202**(19): 4780~4787
- A. B. Kloosterman, B. J. Kooi, J. Th. M. De Hosson. Electron microscopy of reaction layers between SiC and Ti-6Al-4V after laser embedding[J]. *Acta Materialia*, 1998, **46**(17): 6205~6217
- J. A. Vreeling, V. Ocelik, J. T. M. De Hosson. Ti-6Al-4V strengthened by laser melt injection of WC particles [J]. *Acta Materialia*, 2002, **50**(19): 4913~4924
- D. J. Liu, Y. B. Chen, L. Q. Li *et al.*. In situ investigation of fracture behavior in monocrystalline WC_p reinforced Ti-6Al-4V metal matrix composites produced by laser melt injection [J]. *Scripta Materialia*, 2008, **59**(1): 91~94
- A. J. Vreeling, V. Ocelik, Y. T. Pe *et al.*. Laser melt injection in aluminum alloys; on the role of the oxide skin[J]. *Acta Materialia*, 2000, **48**(17): 4225~4233
- Y. C. Fu, A. Loreda, B. Martin *et al.*. A theoretical model for laser and powder particles interaction during laser cladding [J]. *Journal of Material Processing Technology*, 2002, **128**(1~3): 106~112