

[文章编号] 1004- 0609(2001)06- 1041- 04

# 激光熔覆工艺参数对 TiC<sub>p</sub>/Al 表层复合材料的影响<sup>①</sup>

马乃恒, 梁工英, 苏俊义

(西安交通大学 机械工程学院, 西安 710049)

**[摘要]** 研究了激光功率、扫描速度对原位合成 TiC<sub>p</sub>/Al 表层复合材料与基底的界面结合和熔覆层组织均匀性的影响。通过调整工艺参数, 获得了有良好冶金结合的界面和 TiC 颗粒分布均匀的熔覆组织。结果表明: 在激光功率一定时, 过低的扫描速度将使激光束前端一定距离内的基底材料在表面熔化前被加热时间太长, 以致表面氧化; 而过高的扫描速度会使靠近界面处的粉料中合成反应不能充分完成而残留一些粉末; 这两种情况都影响了熔覆层和基底的结合。随着激光输入比能的降低, 熔覆组织的均匀性降低, 这是由于合成反应未充分完成所致。当激光功率为 2 200~ 2 500 W, 扫描速度为 7~ 10 mm/s 时, 在 ZL104 合金表面可获得组织均匀、界面结合良好的 TiC<sub>p</sub>/Al 复合材料熔覆层。

**[关键词]** 激光熔覆; 原位合成; TiC<sub>p</sub>/Al 基复合材料; 界面结合; 组织均匀性

**[中图分类号]** TB 331

**[文献标识码]** A

在铝合金表面用激光熔覆一层陶瓷颗粒增强的复合材料层是改善其表面性能的有效途径之一。关于外加陶瓷颗粒形成复合材料熔覆层已有许多报导<sup>[1~ 3]</sup>。由于外加陶瓷颗粒尺寸较大, 且存在界面污染及界面反应, 直接影响了熔覆层的质量。

Al-Ti-C 体系原位合成整体复合材料的研究已获得很大的进展<sup>[4~ 7]</sup>, 近年来, 利用激光在材料表面原位合成复合材料亦有研究<sup>[8~ 10]</sup>。文献[11]报导在铸造铝合金表面, 利用激光熔覆原位合成的方法形成一层 TiC<sub>p</sub>/Al 复合材料, 由于 TiC 颗粒是在基体 Al 中原位反应生成, 颗粒细小, 均匀, 亦不存在界面污染等问题。

本研究工作是在文献[11]的基础上, 系统地研究了工艺参数对熔覆层与基底的界面结合和熔覆组织均匀性的影响, 以便控制原位合成 TiC<sub>p</sub>/Al 表层复合材料的质量。

## 1 实验方法

基底材料为 ZL104 合金, 基底试样被加工成尺寸为 200 mm × 40 mm × 10 mm 的矩形板条。试样表面经喷砂和清洗后, 涂刷厚度为 1.0 mm 的 Al-Ti-C 粉末涂层。

涂层材料选用 74 μm 的钛粉、铝粉和活性炭粉,

经搅拌式高能球磨机在 Ar 气保护下混制 20 h 后, 加入经丙酮稀释的有机粘结剂(粘结剂用量为粉料的 4%)后涂刷在试样表面。

为了保证反应充分完成后熔覆层中不存在残留的炭粉, Ti 与 C 的原子比按 1.05: 1 设计。并希望在熔覆层中能含有 30% (体积分数) 的 TiC 颗粒。涂层粉料成分分配比见表 1。

表 1 Al-Ti-C 涂层粉末成分分配比(摩尔分数, %)

Table 1 Chemical compositions of Al-Ti-C powder

Al	Ti	C
62.89	18.98	18.13

激光熔覆工艺试验是在 5 kW CO<sub>2</sub> 横流式连续激光器上进行, 激光斑束直径为 2.5 mm, 试样表面用 Ar 气保护。工艺实验方案见表 2。

将经激光熔覆后的试样在与扫描方向垂直的面上磨制金相试样, 试样经腐蚀后在 NEOPHT21 光学显微镜(OM)和 S2700 扫描电子显微镜(SEM)下观察不同工艺参数对 TiC<sub>p</sub>/Al 复合材料层的熔覆界面及组织均匀性的影响。

## 2 结果及分析

### 2.1 工艺参数对界面结合的影响

① [基金项目] 国家自然科学基金资助项目(59871038); 西安交通大学校基金资助项目

[收稿日期] 2001- 01- 16; [修订日期] 2001- 05- 15

[作者简介] 马乃恒(1958- ), 男, 博士研究生。

表2 实验中所选用的工艺参数

**Table 2** Selected technological parameters in experiments

Laser power/W		Scanning velocity/(mm·s <sup>-1</sup> )					
2 200	5	7	10	15	20	25	30
2 500	5	7	10	15	20	25	30
3 000	7	10	15	20	25	30	35
3 500	7	10	15	20	25	30	35

表3所示为在不同激光工艺参数下,复合材料层与基底的界面结合程度。结果表明:当激光功率为2 200~2 500 W时,扫描速度控制在7~10 mm/s;当激光功率为3 000~3 500 W时,扫描速度控制在20~30 mm/s,熔覆层界面可获得良好的冶金结合。要获得良好的界面结合,随着激光功率的增加,扫描速度应相应增加。在激光功率一定的情况下,过低的扫描速度会导致激光束前端一定距离内的基底材料在表面熔化以前被加热时间较长以致表面氧化,基底材料表面存在氧化物,必然会影响熔覆层界面的结合。过高的扫描速度会使得靠近界面处的粉料中合成反应不能充分完成,还残留一些粉末,从而影响界面结合。

表3 复合材料层与基底界面的结合程度

**Table 3** Degree of interface connection between composite layer and substrate

Scanning velocity / (mm·s <sup>-1</sup> )	Laser power/W			
	2 200	2 500	3 000	3 500
5	×	×	×	×
7	●	●	×	×
10	●	●	×	×
15	×	●	×	×
20	×	×	●	●
30	×	×	●	●

●—Good interface; ×—Bad interface

2.2 组织均匀性

当激光熔覆工艺不合适时,熔覆层组织中会出现不均匀现象,在光学显微镜下出现黑色和白色相间的组织,如图1所示。

用SEM观察时,黑色区域为TiC颗粒分布均匀的区域;而白色区域中TiC颗粒很少,几乎全部由铝和一些针状组织构成,如图2所示。对图2中的白色区进行微区能谱分析,其成分(质量分数)为:Al 93.40%,Ti 6.03%。鉴于含有相当数量的Ti,估计图2中的针状组织为Al<sub>3</sub>Ti。为了量化激光工艺对组织均匀性的影响,用光镜下在熔覆层中所观察到的黑色区域(TiC颗粒分布均匀的区域)占整

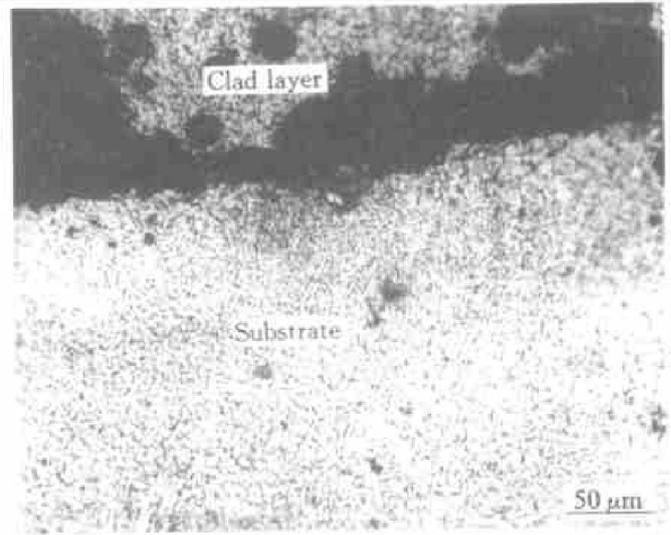


图1 输入比能为56 J/mm<sup>2</sup>时熔覆层组织的光镜照片

**Fig. 1** Optical photo of microstructure of clad layer when input specific energy is 56 J/mm<sup>2</sup>

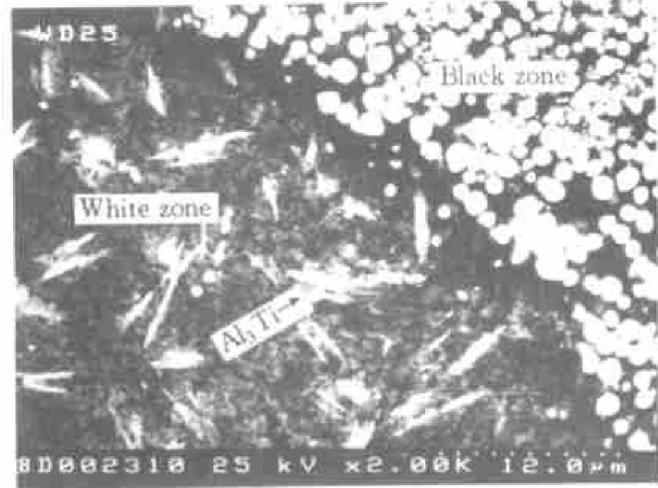


图2 输入比能为56 J/mm<sup>2</sup>时的熔覆层组织(SEM)

**Fig. 2** Microstructure of white zone in clad layer when input specific energy is 56 J/mm<sup>2</sup>

个熔覆层区域的面积百分数 φ 来反映组织均匀性,试验中采用网格法计算面积。

激光输入比能是指在试样表面的单位面积上所作用的能量,是与激光功率、激光斑束直径和扫描速度有关的一个函数,如下式所示:

$$E = P / dv \tag{1}$$

式中 E—输入比能, J/mm<sup>2</sup>; P—激光功率, W; v—扫描速度, mm/s; d—激光斑束直径, mm。

图3表示输入比能对组织均匀性的影响,可见,随着输入比能 E 的增加,组织均匀性明显提高。

图4为激光输入比能为133 J/mm<sup>2</sup>时熔覆层组织的光镜照片。比较图1和图4可以看出,当激光输入比能较高时,白色区域小而分散;当激光输入

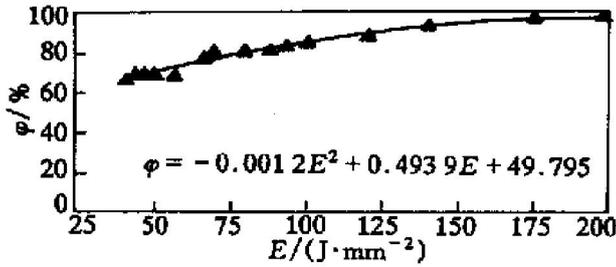


图 3 输入比能与组织均匀性的关系

Fig. 3 Relationship between laser input specific energy and uniformity of microstructures in clad layer

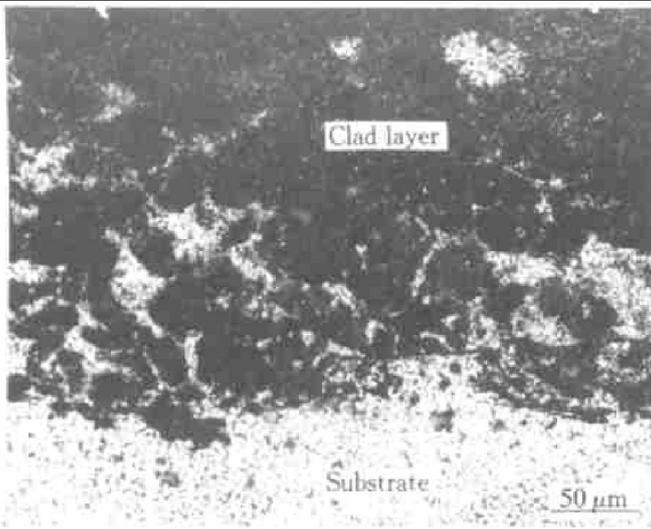


图 4 输入比能为 133 J/mm<sup>2</sup> 时熔覆层组织的光镜照片

Fig. 4 Optical photo of microstructure of clad layer when input specific energy is 133 J/mm<sup>2</sup>

比能较低时, 白色区域大而集中。

在 AlTiC 体系的合成反应过程中, Al<sub>3</sub>Ti 是 TiC 合成过程中的中间产物<sup>[6, 13]</sup>, Al<sub>3</sub>Ti 针状相的出现, 反映了 TiC 合成反应没有充分完成。

除通过机械活化的方法降低反应活化能以提高合成反应的活性外<sup>[13]</sup>, 提供足够能量使粉料在较高温度下保持足够时间, 也是保证反应充分完成的重要条件。文献[14]在 TiAl 金属间化合物表面涂覆石墨并通过激光熔覆进行表面合成 TiC 时发现, 提高扫描速度会使得熔覆层变薄, 在激光功率为 2 000 W, 扫描速度为 20 mm/s 时, 几乎没有熔覆层。也就是说, 随着激光输入比能的降低, 合成反应产物的数量在不断减少。激光输入比能对合成反应的充分完成起着至关重要的作用, 在输入比能较低时, 不能提供足够的能量, 使得 TiC 合成反应不能充分完成, 从而出现较多含有 Al<sub>3</sub>Ti 的白色区域。

### 2.3 工艺参数的调试

从 2.1 中实验结果已经知道, 要保证界面具有良好的冶金结合, 在激光功率为 2 200~ 2 500 W 时, 扫描速度应控制在 7~ 10 mm/s 范围内; 在激光功率为 3 000~ 3 500 W 时, 扫描速度应控制在 20~ 30 mm/s。另外, 从图 3 可以看出, 要保证黑色区域的百分数大于 85%, 输入比能必须大于 100 J/mm。根据图 3 的回归函数, 则应采用如下对应的工艺参数:

激光功率/W	扫描速度/(mm·s <sup>-1</sup> )
2 200	< 8.5
2 500	< 10
3 000	< 12
3 500	< 14

结合 2.1 的分析结果可以看出, 在激光功率为 3 000~ 3 500 W 时, 如果要保证组织均匀性应满足的条件, 则会带来界面结合的不良; 而选用激光功率为 2 200~ 2 500 W, 它不但可满足组织均匀性的工艺要求, 同时也可获得良好界面结合。综合以上分析, 合适的激光熔覆工艺应为: 激光功率 2 200~ 2 500 W; 扫描速度 7~ 10 mm/s。

图 5 所示为采用激光功率 2 500 W、扫描速度 7.5 mm/s 时所获得的熔覆层组织及界面情况。可以看出, 在此工艺条件下, 不仅可获得很好的界面结合, 而且组织亦比较均匀。

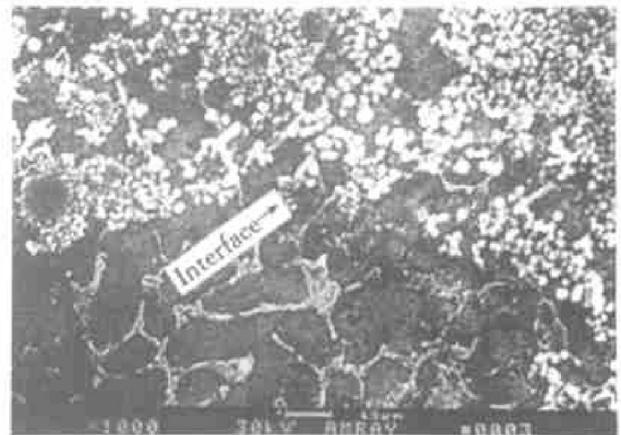


图 5 熔覆层组织及界面情况(SEM)

Fig. 5 Microstructure of clad layer and interface bonding between clad layer and substrate when laser power is 2 500 W and scanning velocity is 7.5 mm/s (input specific energy is 133 J·mm<sup>-2</sup>) (SEM)

### [ REFERENCES ]

[1] PEI Y T, ZUO T C. Gradient microstructure in laser

- clad TiC-reinforced Ni alloy composite coating [J]. Materials Science and Engineering, 1998, A241(1-2): 259-263.
- [2] LI Qiang(李强), LEI Ting-quan(雷廷权), WANG Fu-chi(王富耻). 激光熔覆 TiC 颗粒增强 Ni-Cr-B-Si-C 合金复合涂层的微观组织 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1998, 8(3): 420-426.
- [3] Liang G Y, Wong T T. Investigation of microstructure of Ni WC layer on an Al-Si alloy [J]. ASM Journal of Materials Engineering and Performance, 1997, 6(1): 41-45.
- [4] Nukami T. The growth of TiC particles in an Al matrix [J]. Journal of Materials Science Letter, 1998, 17(4): 267-269.
- [5] YANG Bin(杨滨), WANG Yu-qing(王玉庆), ZHANG Jian(张键). 铝熔体中原位反应生成 TiC 颗粒的机制分析 [J]. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程), 1997, 26(6): 12-17.
- [6] Tessuya N, Flemings M C. In situ synthesis of TiC particulate reinforced aluminum matrix composites [J]. Metallurgical and Materials Transaction A, 1995, 26(7): 1877-1884.
- [7] Yücel B. In situ processing of TiC<sub>p</sub>-Al composites by reacting graphite with Al-Ti melts [J]. Journal of Materials Science, 1999, 34: 1653-1657.
- [8] Hu C, Baker T N. Laser pressing to create in situ Al-SiC surface metal matrix composites [J]. Journal of Materials Science, 1995, 30(4): 891-897.
- [9] MENG Yan, HU Han-qi. In-situ laser surface coating of TiC meta-matrix composite layer [J]. Journal of Materials Science, 1996, 31: 4303-4309.
- [10] WU Xiao-lei(武晓雷), CHEN Guang-nan(陈光南). 激光形成原位 TiC 颗粒增强涂层的组织及性能 [J]. Acta Metallurgica Sinica(金属学报), 1998, 34(12): 1284-1288.
- [11] MA Nai-heng(马乃恒), FANG Xiao-han(方小汉), LIANG Gong-ying(梁工英), et al. 激光熔覆原位合成 TiC<sub>p</sub>/Al 复合材料 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 2000, 10(6): 900-903.
- [12] YAN Hong-ge(严红革), CHEN Zhen-hua(陈振华), HUANG Pei-yun(黄培云). 反应合成原位(in-situ)复合材料制备技术进展 [J]. 材料科学与工程, 1997, 15(1): 6-9.
- [13] MA Nai-heng(马乃恒), FANG Xiao-han(方小汉), LIANG Gong-ying(梁工英), et al. 机械活化对 Al-Ti-C 粉料合成反应激活能的影响 [J]. Acta Metallurgica Sinica(金属学报), 2000, 36(11): 1169-1171.
- [14] HE Xiu-li(何秀丽), WANG Hua-ming(王华明), ZHENG Qi-guang(郑启光), et al. TiAl 金属间化合物碳元素激光表面合金化 [J]. Acta Metallurgica Sinica(金属学报), 1998, 34(9): 983-986.

## Influence of technological parameters on interface bonding and structure uniformity of in-situ synthesis TiC<sub>p</sub>/Al composites in laser cladding process

MA Nai-heng, LIANG Gong-ying, SU Jun-yi

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China)

**[Abstract]** The influence of laser power and scanning velocity on interface bonding between clad layer and substrate and uniformity of microstructure in composite surface layer was studied. By means of adjusting these parameters, the excellent interface bonding and uniform microstructure can be obtained. The experiment results show that when the laser power is in a certain value, the lower scanning velocity leads the surface of substrate ahead of laser beam to maintain a longer time at high temperature, so that an oxide film is formed. But, if the scanning velocity is too fast, the synthetic reaction in powder materials near the substrate will be not enough. Either of these two situations will deteriorate the interface bonding. The experiment results also show that the lower the laser input specific energy is, the worse the uniformity of microstructure will be. This phenomenon is caused by insufficient synthetic reaction in powder materials. When the laser power is 2 200~2 500 W, the scanning velocity is 7~10 mm/s, an excellent TiC<sub>p</sub>/Al composite surface layer can be obtained on ZL104Al alloy.

**[Key words]** laser cladding; in-situ synthesis; TiC<sub>p</sub>/Al composite; interface bonding; uniformity of microstructure

(编辑 袁赛前)