

# 激光表面合金化制备 TiC/Fe<sub>3</sub>Al 复合涂层组织及 TiC 演变规律

蒲 飞 刘元富 徐向阳 彭彦博 张龙华

(北京交通大学机械与电子控制工程学院材料研究中心, 北京 100004)

**摘要** 以 Al 和 TiC 的混合粉末为原材料对 20# 钢进行激光表面合金化, 制备了 TiC 增强 Fe<sub>3</sub>Al 金属间化合物基体复合涂层。利用 X 射线衍射 (XRD)、扫描电子显微镜 (SEM)、能谱仪 (EDS) 等方法分析了涂层的相组成及显微组织结构, 通过热力学计算确定了 TiC 的溶解热力学条件, 并探讨了 TiC 的溶解及析出规律。结果表明: 涂层主要组成相为 Fe<sub>3</sub>Al 和 TiC; 激光表面合金化过程中, 当温度达到 2000 K~2200 K 时, 作为粉末原材料的 TiC 颗粒在 Fe-Al 合金熔体中开始发生溶解, 然后在合金熔池中重新凝固析出, 以原位增强颗粒的形式呈网状分布于 Fe<sub>3</sub>Al 金属间化合物基体上。

**关键词** 表面光学; 激光表面合金化; 复合涂层; TiC; 显微组织

**中图分类号** TG115; TG111.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0703002

## Microstructure and TiC Evolution Behavior of TiC/Fe<sub>3</sub>Al Composite Coating Fabricated by Laser Surface Alloying

Pu Fei Liu Yuanfu Xu Xiangyang Peng Yanbo Zhang Longhua

(Materials Science and Engineering Research Center, School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract** TiC reinforced Fe<sub>3</sub>Al intermetallic matrix composite coating is fabricated on 0.2% C carbon steel substrate by laser surface alloying with Al-TiC powders blend as the precursor material. The phases composition and microstructure of the composite coating are investigated by X-ray diffractometer (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS). Through thermodynamic calculating, the dissolution thermodynamic conditions of TiC are confirmed. The dissolution and precipitation behavior of TiC phase are discussed. Results show that the coating mainly consists of Fe<sub>3</sub>Al and TiC. During the laser surface alloying process, when the temperature reaches 2000 K~2200 K, the TiC powders used as the precursor material begin to dissolve into the Fe-Al alloy melt, as *in-situ* reinforcement particles re-precipitate from the melt and are scattered with a net shape in the Fe<sub>3</sub>Al matrix.

**Key words** optics at surfaces; laser surface alloying; coating; TiC; microstructure

**OCIS codes** 140.3390; 140.3470; 310.1515; 350.4990

## 1 引 言

Fe<sub>3</sub>Al 金属间化合物具有良好的抗磨损、抗腐蚀、抗高温氧化及硫化等性能, 且具有密度低、价格低廉等优点<sup>[1]</sup>, 具有良好的工业应用前景。由于 Fe<sub>3</sub>Al 室温脆性严重, 温度超过 600 °C 之后强度和

抗蠕变性能下降显著, 上述问题限制了 Fe<sub>3</sub>Al 金属间化合物作为结构材料的应用<sup>[2]</sup>。据报道, 在 Fe<sub>3</sub>Al 中加入 TiC 颗粒可以有效提高 Fe<sub>3</sub>Al 的高温力学性能<sup>[3]</sup>, TiC/Fe<sub>3</sub>Al 复合材料具有良好的耐高温冲蚀磨损的能力<sup>[4]</sup>。利用合适的表面工程手段在

收稿日期: 2013-12-20; 收到修改稿日期: 2014-01-23

基金项目: 清华大学摩擦学国家重点实验室开放基金(SKLTKF11B09)

作者简介: 蒲 飞(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光合成制备金属间化合物基复合涂层方面的研究。

E-mail: 13811747717@163.com

导师简介: 刘元富(1965—), 男, 博士, 副教授, 主要从事表面工程领域方面的研究。

E-mail: yfliu@bjtu.edu.cn(通信联系人)

相对廉价的低碳钢基材表面制备 TiC/Fe<sub>3</sub>Al 复合涂层,将显著提高基体金属抵抗高温氧化、高温冲蚀磨损的能力,又避开了 Fe<sub>3</sub>Al 室温脆性严重、加工困难的问题。激光熔覆及激光表面合金化技术广泛应用于 TiC 增强耐磨复合涂层及抗氧化涂层的合成制备<sup>[5-7]</sup>。顾盛挺等<sup>[8]</sup>利用激光熔覆技术在 H13 钢表面制备了 TiC 颗粒增强钢基复合涂层,研究了涂层的力学性能与涂层显微组织之间的关系。徐柠等<sup>[9]</sup>利用预置粉激光熔覆技术,在 45 # 钢表面原位合成了 TiC 增强复合涂层,分析了涂层的显微组织结构。陈瑶等<sup>[10]</sup>采用激光表面合金化技术在奥氏体不锈钢基材表面制备了 TiC/FeAl 复合涂层,分析了涂层的显微组织,测试了涂层的摩擦磨损性能,探讨了涂层的磨损机理。王耀华等<sup>[11]</sup>采用激光熔覆技术在 35CrMo 合金结构钢表面制备了 Fe-Al/TiC 复合涂层,并研究了涂层的摩擦磨损性能和抗氧化性能。上述研究主要集中于涂层的显微组织分析及摩擦磨损或抗氧化性能测试,有关涂层中 TiC 相演变规律的研究报道很少。本文以 Al 和 TiC 混合粉末为原材料,利用激光表面合金化技术,在 20 # 钢基材表面制备了 TiC 增强 Fe<sub>3</sub>Al 金属间化合物基复合涂层,研究了涂层的显微组织结构,并深入分析了激光表面合金化过程中 TiC 相在 Fe-Al 合金熔体中的溶解及析出规律。

## 2 实验材料和方法

基材选用正火态的 20 # 钢,其化学成分(质量分数)为: C 0.20%, Si 0.21%, Mn 0.41%, P 0.015%, S 0.007%, Fe 余量。利用线切割加工成规格为 80 mm×60 mm×3 mm 的试样,激光表面合金化处理之前,用丙酮清洗基材表面。选用 85% Al+15% TiC(质量分数)混合粉末作为激光表面合金化原材料,粉末粒度为 31~50 μm,纯度为 98.5%~99.9%。利用 ML-108 型 9 kW 横流 CO<sub>2</sub> 激光器进行激光表面合金化处理,激光处理工艺参数为:功率 1.5 kW,光斑直径 3 mm,扫描速度 4 mm/s,送粉速度 4 g/min。采用同轴送粉方式,利用高纯氩气对合金熔池进行保护。采用日本理学 D/max 型 X 射线衍射仪(XRD)对涂层进行物相分析,使用 FEI Quanta 200 FEG 环境扫描电子显微镜(SEM)及配套的能谱仪(EDS)分析涂层的显微组织结构。利用 Thermo-Calc 热力学计算软件计算 TiC 在 Fe-Al 合金熔体中的溶解吉布斯自由能,分析 TiC 的溶解及析出规律。

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 激光表面合金化涂层物相分析

图 1 为激光表面合金化涂层的 XRD 衍射图谱。由图 1 可以看出,涂层的主要组成相为具有 DO<sub>3</sub> 结构的金属间化合物 Fe<sub>3</sub>Al 和 TiC 金属陶瓷相,Fe<sub>3</sub>Al 相的衍射峰强度显著高于 TiC 相。XRD 分析结果表明,以 Al 和 TiC 混合粉末作为原材料,采用激光表面合金化技术在 20 # 钢基材表面制备出了主要组成相为 Fe<sub>3</sub>Al 和 TiC 的复合涂层。

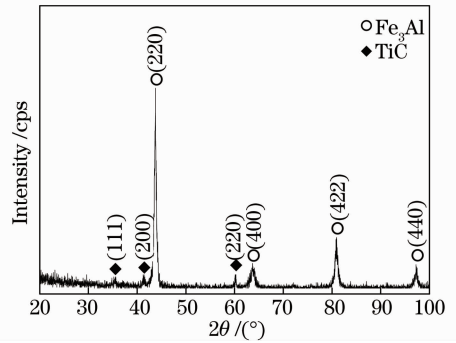


图 1 复合涂层的 X 射线衍射图谱

Fig. 1 X-ray diffractometer (XRD) pattern of the composite coating

### 3.2 激光表面合金化涂层显微组织分析

图 2 为激光表面合金化复合涂层典型显微组织形貌 SEM 照片。如图 2(a)所示,涂层的典型显微

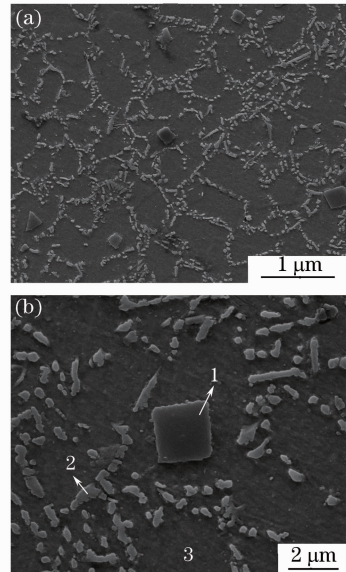


图 2 TiC 增强复合涂层典型显微组织扫描电镜照片。

(a) 低倍; (b) 高倍

Fig. 2 Scanning electron microscopy (SEM) micrographs showing the typical microstructure of the TiC reinforced composite coating. (a) Low magnification; (b) high magnification

组织为灰白色的颗粒状、短棒状及块状相呈网状弥散分布于灰黑色的基体上。对图 2(b)中的块状相(点 1)、颗粒状相(点 2)及涂层基体相(点 3)进行能谱分析,分析结果分别如图 3(a)、(b)及(c)所示。

试样进行 SEM 观察之前做了喷金处理,因此检测到了 Au 元素,计算时将其含量略去。如图 3(a)所示,灰白色块状相主要含 Ti、C、Fe、Al 元素,其原子数分数分别为 Ti61.89%、C32.94%、Fe4.28%、Al0.88%,结合 XRD 分析结果可以确定灰白色块状相为 TiC;由图 3(b)可知,颗粒状相主要含 Ti、C、Fe、Al 元素,其原子数分数分别为 Ti6.84%、

C21.35%、Fe52.42%、Al19.04%,考虑到能谱分析时 X 特征射线的激发范围一般在 $10 \mu\text{m}^3$ <sup>[12]</sup>,而颗粒相的尺寸较小(不足  $1 \mu\text{m}$ ),颗粒相周围显微组织的成分严重影响了 EDS 结果,但 EDS 分析结果定性给出了该相的成分组成,结合 XRD 分析结果可以确定灰白色颗粒状相为 TiC。由图 3(c)可知,复合涂层基体主要组成元素为 Ti、C、Fe、Al,其原子数分数分别为 Ti0.74%、C8.06%、Fe70.08%、Al21.12%,Fe:Al 原子百分比接近3:1,结合 XRD 分析结果可以确定复合涂层基体为 Fe<sub>3</sub>Al, Fe<sub>3</sub>Al 中固溶有少量的 Ti 和 C 元素。

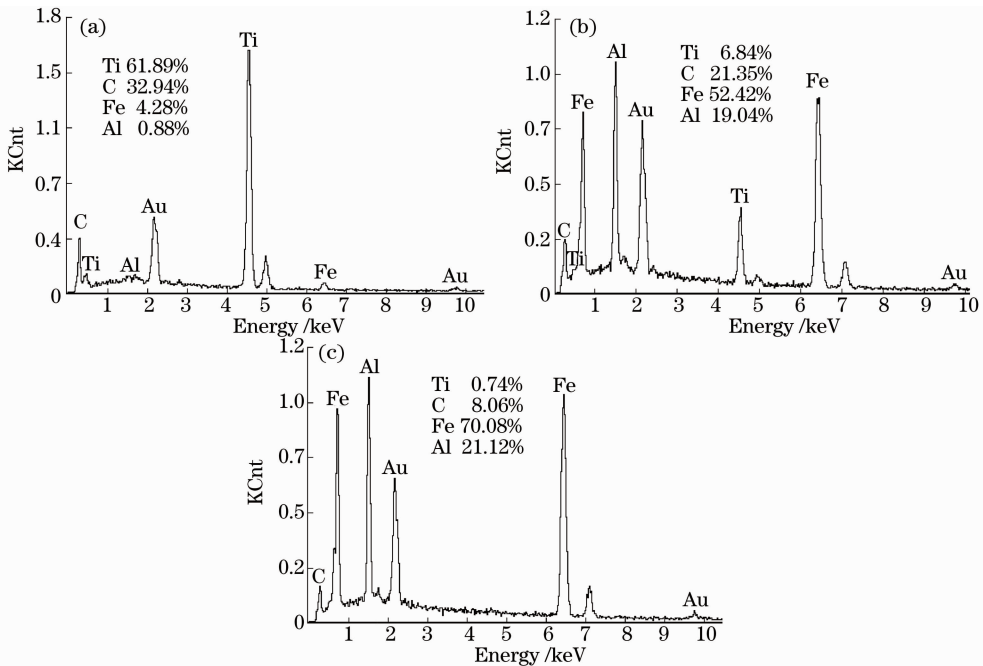


图 3 TiC 增强复合涂层不同区域能谱分析。(a) 点 1; (b) 点 2; (c) 点 3

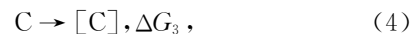
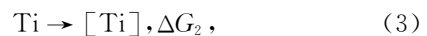
Fig. 3 Energy dispersive spectrometer (EDS) profiles corresponding to different regions of the TiC reinforced composite coating. (a) Point 1; (b) point 2; (c) point 3

### 3.3 TiC 溶解及析出过程分析

TiC 在复合涂层中呈现出的组织形貌特征与 TiC 在 Fe-Al 合金熔体中的溶解和析出行为是密切相关的,对于 TiC 在 Fe-Al 合金熔体中的溶解可用以下反应式表达:



式中不仅考虑了 TiC 本身的稳定性,而且还考虑了其在 Fe-Al 熔体中的稳定性。对于上述反应的吉布斯自由能-即 TiC 在 Fe-Al 合金熔体中溶解的吉布斯自由能  $\Delta G_f$  可以通过分解成以下反应式求得:



即:

$$\Delta G_f = \Delta G_2 + \Delta G_3 - \Delta G_1, \quad (5)$$

式中  $\Delta G_1$  为 TiC 的标准生成吉布斯自由能,其值可以通过纯物质化学手册<sup>[13]</sup>查得,如表 1 所示,表中  $T$  表示温度,单位为  $K$ , $\Delta G_1$  即为 TiC 的标准生成吉布斯自由能,单位为  $\text{kJ/mol}$ 。

表 1 TiC 的标准生成吉布斯自由能

Table 1 Standard Gibbs free energy of formation of TiC

$T$	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000	3100	3200
$\Delta G_1$	-151.53	-149.286	-147.053	-144.835	-142.636	-140.458	-138.304	-136.178	-134.08	-132.015

$\Delta G_2$ 、 $\Delta G_3$  可以表示成以下表达式<sup>[14]</sup>：

$$\Delta G_2 = RT \ln \left( \frac{M_i}{100M_{Ti}} \cdot \gamma_{Ti}^0 \right), \quad (6)$$

$$\Delta G_3 = RT \ln \left( \frac{M_i}{100M_C} \cdot \gamma_C^0 \right), \quad (7)$$

式中  $R$  为气体常数,  $T$  为温度,  $M_{Ti}$ 、 $M_C$  表示溶质 Ti、C 的相对原子质量,  $M_i$  表示溶剂 Fe-Al 合金熔体的平均相对原子质量(这里将溶剂 Fe-Al 合金熔体抽象为单质熔体,  $M_i$  表示平均相对原子质量, 其值随着 Fe-Al 合金熔体中的 Fe、Al 的原子百分比的变化是一个变值),  $\gamma_{Ti}^0$ 、 $\gamma_C^0$  表示 Ti、C 在溶剂 Fe-Al 熔体中的活度转换系数, 其值可以通过 Ti、C 在 Fe-Al 合金熔体中的活度系数  $\gamma_{Ti}$ 、 $\gamma_C$  外推得到<sup>[15]</sup>：

$$\gamma_{Ti}^0 = \lim_{x[Ti] \rightarrow 0} |\gamma_{Ti}|, \quad (8)$$

$$\gamma_C^0 = \lim_{x[C] \rightarrow 0} |\gamma_C|, \quad (9)$$

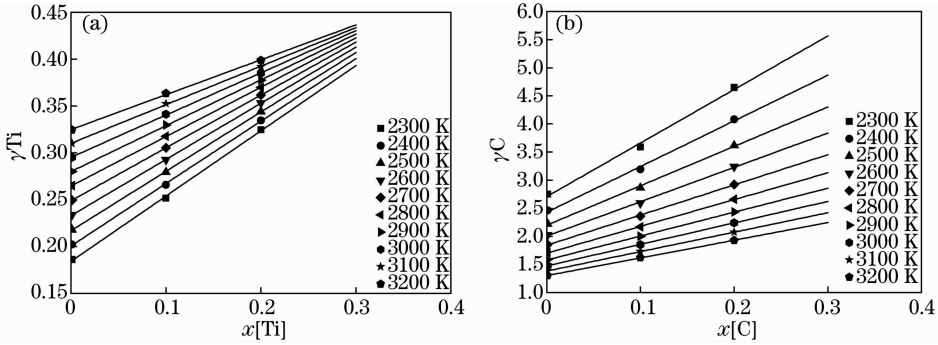


图 4 Fe70Al30 合金熔体中  $\gamma_{Ti}$ - $x$ [Ti] 及  $\gamma_C$ - $x$ [C] 关系曲线。(a)  $\gamma_{Ti}$ - $x$ [Ti] 曲线; (b)  $\gamma_C$ - $x$ [C] 曲线

Fig. 4  $\gamma_{Ti}$ - $x$ [Ti] and  $\gamma_C$ - $x$ [C] profiles in Fe70Al30 alloy melt. (a)  $\gamma_{Ti}$ - $x$ [Ti] profile; (b)  $\gamma_C$ - $x$ [C] profile

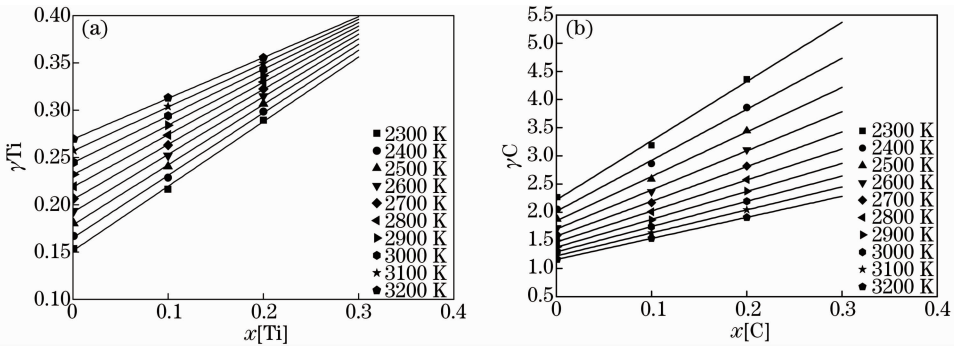


图 5 Fe75Al25 合金熔体中  $\gamma_{Ti}$ - $x$ [Ti] 及  $\gamma_C$ - $x$ [C] 关系曲线。(a)  $\gamma_{Ti}$ - $x$ [Ti] 曲线; (b)  $\gamma_C$ - $x$ [C] 曲线

Fig. 5  $\gamma_{Ti}$ - $x$ [Ti] and  $\gamma_C$ - $x$ [C] profiles in Fe75Al25 alloy melt. (a)  $\gamma_{Ti}$ - $x$ [Ti] profile; (b)  $\gamma_C$ - $x$ [C] profile

综上所述, TiC 在 Fe-Al 熔体中溶解的吉布斯自由能可以表达为：

$$\Delta G_f = RT \ln \left( \frac{M_i}{100M_{Ti}} \cdot \gamma_{Ti}^0 \right) + RT \ln \left( \frac{M_i}{100M_C} \cdot \gamma_C^0 \right) - \Delta G_1. \quad (10)$$

在 2300 K~3200 K 温度范围内, 由(10)式计算得到的 TiC 在 Fe70Al30、Fe75Al25 以及 Fe80Al20 合金熔体中的溶解吉布斯自由能随温度变化曲线如图 7 所示。由图 7 可以看出, 在温度达

(8)、(9)式中  $x$ [Ti]、 $x$ [C] 分别表示 Ti、C 在 Fe-Al 合金熔体溶液中的浓度,  $\gamma_{Ti}$ 、 $\gamma_C$  的值是通过 Thermo-calc 的考夫曼数据库(KP)提供的  $\alpha_{Ti}$ 、 $\alpha_C$  (分别表示 Ti、C 在 Fe-Al 熔体中的活度)的值计算得到: $x$ [Ti] $\gamma_{Ti} = \alpha_{Ti}$ ,  $x$ [C] $\gamma_C = \alpha_C$ 。由(8)、(9)式外推得到的 Ti、C 在 Fe70Al30(数字表示 Fe、Al 的原子百分比, 下同)、Fe75Al25、Fe80Al20 合金熔体中的活度转换系数的值分别如图 4、图 5 及图 6 所示, 图中曲线外推到  $x$ [Ti]=0、 $x$ [C]=0 的截距即为  $\gamma_{Ti}^0$ 、 $\gamma_C^0$ 。这里选取以上三个成分 Fe-Al 合金熔体是因为涂层基体相是 Fe<sub>3</sub>Al, Fe<sub>3</sub>Al 中 Fe 的原子数分数为 75%、Al 的原子数分数为 25%, 考虑到在非平衡凝固条件下存在一定的偏差, 因此又选取了 Fe70Al30、Fe80Al20 这两个成分。

到 2300 K 时, TiC 在三种不同成分的 Fe-Al 合金熔体中的溶解吉布斯自由能均为负值, 并且随着温度升高, TiC 的溶解吉布斯自由能进一步变负, 表明当温度高于 2300 K, TiC 能在三种成分的 Fe-Al 合金



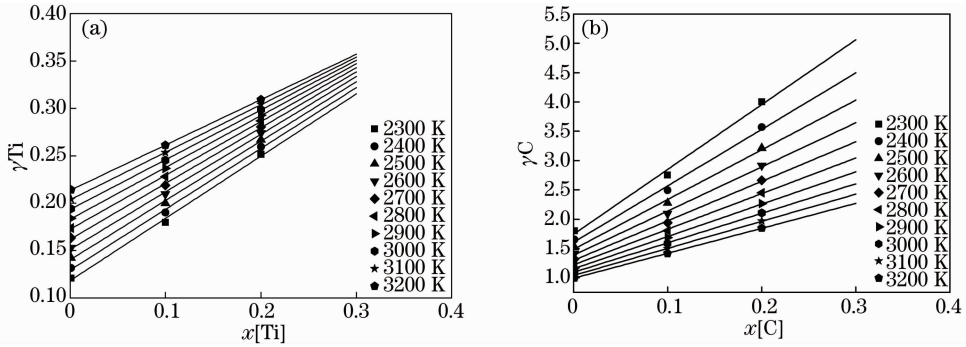


图 6 Fe<sub>80</sub>Al<sub>20</sub> 合金熔体中  $\gamma_{Ti-x[Ti]}$  及  $\gamma_{C-x[C]}$  关系曲线。(a)  $\gamma_{Ti-x[Ti]}$  曲线；(b)  $\gamma_{C-x[C]}$  曲线

Fig. 6  $\gamma_{Ti-x[Ti]}$  and  $\gamma_{C-x[C]}$  profiles in Fe<sub>80</sub>Al<sub>20</sub> alloy melt. (a)  $\gamma_{Ti-x[Ti]}$  profile; (b)  $\gamma_{C-x[C]}$  profile

熔体中发生溶解,并且随着温度的升高溶解趋势也随之变大。将图 7 的三组数据分别进行线性拟合,可以得到, TiC 在 Fe<sub>70</sub>Al<sub>30</sub>、Fe<sub>75</sub>Al<sub>25</sub>、Fe<sub>80</sub>Al<sub>20</sub> 合金熔体中的溶解吉布斯自由能函数分别为:  $212.64 - 0.0977 T$ 、 $206.20 - 0.0977 T$ 、 $199.54 - 0.0984 T$ , 令以上三式的值为零,可以计算出 TiC 在 Fe<sub>70</sub>Al<sub>30</sub>、Fe<sub>75</sub>Al<sub>25</sub>、Fe<sub>80</sub>Al<sub>20</sub> 合金熔体中开始溶解的温度分别为 2176.46 K、2110.54 K、2027.44 K,故 TiC 在 Fe-Al 合金熔体中开始溶解的温度范围为 2000 K~2200 K。激光合金化处理过程中,合金熔池温度远高于以上温度值,因此以粉末原材料形式加入的 TiC 肯定会在 Fe-Al 合金熔体中发生溶解。另一方面,在同一温度下, TiC 在 Fe<sub>70</sub>Al<sub>30</sub>、Fe<sub>75</sub>Al<sub>25</sub> 及 Fe<sub>80</sub>Al<sub>20</sub> 熔体中的溶解吉布斯自由能依次增大,表明随着 Fe-Al 合金熔体中 Fe 元素的增加及 Al 元素的减少,将有利于 TiC 的溶解。

进入 Fe-Al 合金熔体中的 TiC 发生溶解,随后结晶析出,并长成小面晶。如图 2(b) 所示,在 TiC/Fe<sub>3</sub>Al 复合涂层中, TiC 呈明显的小面晶特征。实验结果证实了上述推断的正确性。

## 4 结 论

1) 溶解热力学计算结果表明,温度达到 2000 K~2200 K 时,以粉末原材料形式进入 Fe-Al 合金熔体的 TiC 开始发生溶解,随温度升高,溶解趋势增大;在同一温度下,随着 Fe-Al 合金熔体中 Fe 元素增加及 Al 元素减少将有利于 TiC 的溶解。

2) 激光表面合金化过程中,溶解之后的 TiC 随后凝固析出,以原位增强颗粒的形式弥散分布在 Fe<sub>3</sub>Al 基体上,形成 TiC/Fe<sub>3</sub>Al 复合涂层。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Shaopeng, Fei Jingyin. Research status of Fe<sub>3</sub>Al intermetallic compounds[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(22): 36-38.  
王少鹏, 费敬银. Fe<sub>3</sub>Al 金属间化合物研究进展[J]. 热加工工艺, 2009, 38(22): 36-38.
- 2 Mckamey C G, Devan J H, Tortorell P F, et al.. A review of recent developments in Fe<sub>3</sub>Al-based alloys [J]. J Mater Res, 1991, 6(8): 1779-1805.
- 3 Xue Feng, Sun Yangshan, Min Xuegang. Microstructure and mechanical properties of Fe<sub>3</sub>Al matrix composite reinforced by TiC particles[J]. Journal of Southeast University, 2001, 31(1): 91-94.  
薛 烽, 孙扬善, 闵学刚. TiC 增强 Fe<sub>3</sub>Al 基复合材料的显微组织与力学性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2001, 31(1): 91-94.
- 4 Fan Min, Yu Xinquan, Xue Feng. Erosion resistance of Fe<sub>3</sub>Al/TiC composite at high temperatures [J]. Journal of Southeast University, 1999, 29(6): 136-139.  
范 敏, 余新泉, 薛 烽. Fe<sub>3</sub>Al/TiC 复合材料的耐高温冲蚀性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 1999, 29(6): 136-139.
- 5 Wang Xinhong, Zhang Min, Zou Zengda, et al.. Investigation on the microstructure and properties of laser clad TiCp/NiCrBSi alloys composite coating [J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(6): 562-566.  
王新洪, 张 敏, 邹增大, 等. 激光熔覆 TiCp/NiCrBSi 复合涂层

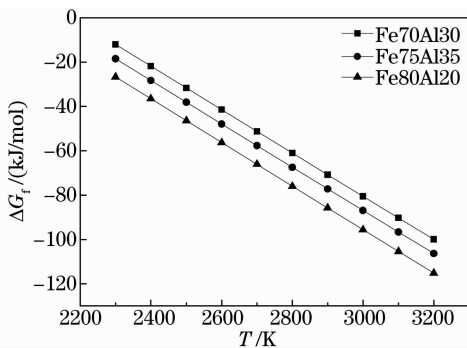


图 7 TiC 在 Fe-Al 合金熔体中的溶解吉布斯自由能随温度变化曲线

Fig. 7 Dissolution Gibbs free energy of TiC in Fe-Al alloy melt as a function of temperature

TiC 的 Jackson 因子很高,在激光快速加热条件下,析出的 TiC 具有典型的小面晶体特征,而且随着凝固冷却速度的增加不会发生由侧向生长机制向连续生长机制转变<sup>[16]</sup>。由此可以推断:在本文所述激光表面合金化处理过程中,以粉末原材料形式

- 的组织与摩擦学性能[J]. 中国激光, 2003, 30(6): 562-566.
- 6 Zhang Weiping, Liu Zhonghua. Study on microstructure of *in-situ* synthesis of TiC-Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>-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-Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>-Ti-Ni 金属复合材料涂层[J]. 中国激光, 2008, 35(7): 1091-1094.
- 7 Shao Dechun, Li Xin, Liu Keyong. Improvement in resistance to high temperature oxidation of titanium alloy by laser surface alloying with Al+Nb[J]. Chinese J Lasers, 1997, 24(3): 281-285.  
绍德春, 李 鑫, 刘克勇. 激光表面合金化提高钛合金高温抗氧化性能的研究[J]. 中国激光, 1997, 24(3): 281-285.
- 8 Gu Shengting, Hou Yifang, Chai Guozhong, *et al.*. Laser cladding of elasto-plastical properties of particle reinforced H13-TiC composite coatings[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603019.  
顾盛挺, 侯义芳, 柴国钟, 等. 激光熔覆 H13-TiC 颗粒增强复合涂层的弹塑性能[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603019.
- 9 Xu Ning, Zhang Qunli, Yao Jianhua. Microstructure of *in-situ* synthesis TiC hardened coating by laser irradiation[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(10): 2653-2657.  
徐 柠, 张群莉, 姚建华. 激光原位反应制备 TiC 强化涂层的显微结构[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2653-2657.
- 10 Chen Yao, Wang Huaming. Wear resistance of laser clad TiC reinforced FeAl intermetallic matrix composite coatings[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003, 32(10): 840-843.  
陈 瑶, 王华明. 激光熔覆 TiC 增强 FeAl 金属间化合物基复合材料涂层磨损性研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(10): 840-843.
- 11 Wang Yaohua, Gao Qingzhen, Zhang Xiaonan, *et al.*. High temperature friction and wear and oxidation properties of Fe-Al/TiC laser cladding layer [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2011, 35(5): 39-42.  
王耀华, 高清振, 张晓南, 等. Fe-Al/TiC 激光熔覆层的高温摩擦磨损和氧化性能[J]. 机械工程材料, 2011, 35(5): 39-42.
- 12 Nan Minbo. Nano Materials Testing Technology[M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2009. 87-88.  
蓝闵波. 纳米材料测试技术[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2009. 87-88.
- 13 Barin. Thermochemical Data of Pure Substances [M]. Chen Nailiang, Niu Sitong, Xu Guiying, *et al.* Transl. Beijing: Science Press, 2003. 1674.  
伊赫桑·巴论. 纯物质热化学数据手册[M]. 程乃良, 牛四通, 徐桂英, 等译. 北京: 科学出版社, 2003. 1674.
- 14 Huang Xigu. Steel Metallurgy Principle [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013. 59.  
黄希祜. 钢铁冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013. 59.
- 15 Huang Xigu. Steel Metallurgy Principle [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013. 29-30.  
黄希祜. 钢铁冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013. 29-30.
- 16 Chen Yao, Wang Huaming. Liquid/solid interface structure and growth mechanism of MC carbide under non-equilibrium solidification condition[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 39(3): 254-258.  
陈 瑶, 王华明. MC 碳化物非平衡凝固液/固界面结构及生长机制[J]. 金属学报, 2003, 39(3): 254-258.

栏目编辑: 张浩佳