

# 电磁复合场协同激光熔覆制备 TiB<sub>w</sub>/Ti 网状结构复合涂层

袁莹<sup>1</sup>, 林英华<sup>1</sup>, 王梁<sup>1</sup>, 张杰<sup>1</sup>, 姚建华<sup>1</sup>,  
刘新新<sup>2</sup>, Volodymyr S. Kovalenko<sup>1,3</sup>

(1.浙江工业大学 激光先进制造研究院, 杭州 310014; 2.哈尔滨汽轮机厂有限责任公司,  
哈尔滨 150046; 3.乌克兰国立科技大学 激光技术研究所, 乌克兰 基辅 03056)

**摘要:** **目的** 利用电磁复合场 (EMCF) 辅助激光熔覆制备 TiB<sub>w</sub>/Ti 网状结构复合涂层, 探索电磁场对涂层组织结构的影响。 **方法** 以 TiB<sub>2</sub>:Ti=1:1 (摩尔比) 的混合粉末为熔覆材料, TC4 作为基板材料, 通过外加电磁复合场进行激光熔覆试验。通过扫描电子显微镜 (SEM) 观察洛伦兹力方向对熔覆层组织结构的影响, 利用 X 射线衍射仪 (XRD) 和维氏显微硬度计分析施加电磁复合场前后熔覆层的相组成和硬度分布。 **结果** 未施加电磁复合场的熔覆层组织主要为细针状、粗棒状和颗粒状组织。而施加电磁复合场后, 熔覆层出现了网状结构, 而且方向向下的洛伦兹力可使涂层内部形成空间间距更大的网状结构。此外, 单独施加稳态磁场后, 熔覆层只出现细针状和粗棒状组织。电磁复合场施加前后熔覆层硬度与基体相比, 均有很大的提高。但未施加电磁复合场的熔覆层硬度变化幅度较大; 施加电磁复合场后, 随着距熔覆层表面距离的增加, 硬度的变化幅度比较平缓。 **结论** 在洛伦兹力作用下, 可得到 TiB<sub>w</sub>/Ti 网状结构的复合涂层, 电磁复合场使 TiB<sub>w</sub>/Ti 网状结构强化相均匀分布, 同时提高涂层的显微硬度。

**关键词:** 激光熔覆; 洛伦兹力; 网状结构; TiB; 电磁复合场; 显微组织

**中图分类号:** TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)05-0102-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.05.016

## Fabrication of TiB<sub>w</sub>/Ti Network Microstructure Coating by Electromagnetic Composite Laser Cladding

YUAN Ying<sup>1</sup>, LIN Ying-hua<sup>1</sup>, WANG Liang<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>1</sup>,  
YAO Jian-hua<sup>1</sup>, LIU Xin-xin<sup>2</sup>, Volodymyr S. Kovalenko<sup>1,3</sup>

(1.Institute of Laser Advanced Manufacturing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;  
2.Harbin Turbine Company Limited, Harbin 150046, China; 3.Laser Technology Research Institute,  
National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute", Kiev 03056, Ukraine)

**ABSTRACT:** The work aims to prepare TiB<sub>w</sub>/Ti coating by electric-magnetic compound field (EMCF) with laser cladding and

收稿日期: 2018-10-23; 修订日期: 2019-02-16

**Received:** 2018-10-23; **Revised:** 2019-02-16

**基金项目:** 国家重点研发计划资助 (2017YFB1103601); 国家自然科学基金 (51705464)

**Fund:** Supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFB1103601), the National Natural Science Foundation of China (51705464)

**作者简介:** 袁莹 (1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为激光加工技术。

**Biography:** YUAN Ying (1994—), Female, Master, Research focus: laser processing technology.

**通讯作者:** 王梁 (1983—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为多能量场协同激光制造技术。邮箱: ddtwl@foxmail.com

**Corresponding author:** WANG Liang (1983—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: multi-energy field collaborative laser manufacturing technology. E-mail: ddtwl@foxmail.com

study the influence of electric-magnetic field on the microstructure of coating. The mixed powders (Mole ratio TiB<sub>2</sub> : Ti=1 : 1) were used as the cladding materials, and TC4 was used as the substrate material. The laser cladding experiment was carried out under external electromagnetic field. The effect of Lorentz force on the microstructure of the cladding layer was observed by scanning electron microscopy (SEM) and the phases and hardness of the coatings without and with EMCF were tested by the X-ray diffraction (XRD) and Vickers hardness tester, respectively. The microstructure of coatings without EMCF appeared as thick needles, thick rods and particles form, while the coating with EMCF showed the network characteristics. Moreover, when the Lorentz force was downward direction, the network microstructures had a larger spatial spacing. The microstructure of the laser cladded coating with magnetic compound field (MCF) appeared as thick needles and thick rods. The hardness of the coatings without and with EMCF was greatly improved compared with that of the matrix, but the hardness of the coatings without EMCF varied greatly. With the increase of the distance from the cladding layer surface, the variation of hardness was relatively gentle after the electro-magnetic composite field was applied. The composite coating with TiB<sub>w</sub>/Ti reticular structure can be obtained under Lorentz force, the electromagnetic composite field makes the reinforcement phases of TiB<sub>w</sub>/Ti reticulate structure uniformly distributed, and improves the microhardness of the coating at the same time.

**KEY WORDS:** laser cladding; Lorentz force; network microstructure; TiB; microstructure

TiB<sub>w</sub>/Ti 网状结构是强化相 TiB 晶须 (TiB<sub>w</sub>) 均匀地分布在基体周围, 形成硬质相包围软相的胶囊状结构, 能够在复合涂层中表现出优异的强塑性、抗高温软化能力等<sup>[1]</sup>。但采用粉末冶金方法制备的金属基复合材料 (强化相均匀分布) 表现出较大的室温脆性<sup>[2-4]</sup>。最近, 黄陆军等<sup>[5]</sup>采用球磨与烧结技术制备出网状结构的 TiB<sub>w</sub>/Ti 复合材料, 发现该网状结构的钛基复合材料不仅表现出高的增强效果, 还表现出较高的塑性水平, 如 3.4% 的 TiB<sub>w</sub>/TC4 复合材料, 其室温抗拉强度与延伸率分别达到 1272 MPa 与 9.1%。基于网状结构的钉扎作用, 在钛合金表面制备 TiB<sub>w</sub>/Ti 复合涂层可进一步延长其使用寿命。

激光熔覆技术制备的熔覆层具有组织致密、与基材冶金结合及对基材热影响小等优势, 逐渐成为钛合金表面改性的重要手段<sup>[6-7]</sup>。但目前采用单一的激光熔覆技术在钛合金表面熔覆 TiB<sub>2</sub> 与 Ti 复合粉末, 较难实现大面积网状结构 TiB<sub>w</sub>/Ti 复合涂层的制备<sup>[8-9]</sup>。而在激光熔覆过程中同时耦合电场和磁场, 利用电磁复合场的协同作用, 在激光熔池区域产生感应洛伦兹力和定向洛伦兹力, 可改变激光熔池内部的流动行为及温度分布<sup>[10-12]</sup>, 从而影响其凝固过程, 有望实现网状结构 TiB<sub>w</sub>/Ti 复合材料的制备。因此, 本文采用电磁复合场协同激光原位技术制备 TiB<sub>w</sub>/Ti 网状结构的复合熔覆层, 通过对熔覆层组织结构和显微硬度的分析, 讨论了外加电磁场对类网状结构形成的影响。

1 试验材料与方法

试验基材为热轧态的 TC4 钛合金基板, 具体尺寸为 240 mm×20 mm×10 mm。实验前利用角磨机去除 TC4 基板表面氧化层, 并用无水酒精清洗。预置涂层材料选用纯 Ti 粉末 (纯度 99.5%, 粉末直径 40~50 μm) 和 TiB<sub>2</sub> 陶瓷粉末 (粉末直径 3~5 μm)。按摩

尔比 Ti : TiB<sub>2</sub>=1 : 1 的配比方式对两种粉末进行机械混合, 预置层厚度为 0.4 mm, 并在 120 °C 真空干燥箱中加热 1 h, 以去除水分。

采用电磁复合场辅助激光熔覆制备复合熔覆层, 氩气为保护气, 电磁复合场的模型如图 1 所示。其中, 磁场电源由最大功率为 1500 W 的直流电源提供, 磁感应强度为 0~2.0 T。试验所用激光器为 Laserline LDF400-2000 型 2 kW 光纤耦合半导体激光器, 运动机构为 ABB 工业机器人, 光斑直径为 4 mm。六轴联动机器人携带激光熔覆头按照设定程序完成光斑行走路径, 工艺参数如表 1 所示。

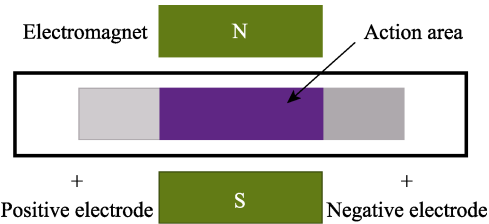


图 1 电磁复合场 (EMCF) 辅助激光熔覆过程示意图  
Fig.1 Schematic diagram of laser cladding process with electric-magnetic compound field (EMCF)

表 1 激光熔覆工艺参数与电磁场参数的选用  
Tab.1 Selection of laser parameters and electromagnetic field parameters

Number	Laser power/ W	Scanning speed/ (mm·s <sup>-1</sup> )	Magnetic intensity/ T	Current intensity/ A	Lorentz force direction
1	1800	6	0	0	Without
2	1800	6	0.6	500	Lorentz force upward
3	1800	6	0.6	500	Lorentz force downward
4	1800	6	0.6	0	Without

熔覆后,采用线切割在熔覆试板中部取样,试样经过研磨、抛光、kroll 试剂 ( $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}=1:2:50$ ) 腐蚀后,利用扫描电子显微镜 (SEM) 观察熔覆层横截面的组织结构。采用 HMV-2TADWXY 型自动式维氏硬度计,所用载荷为 1.961 N,加载时间为 10 s,从熔覆层横截面最高点由表及里,测试复合涂层显微硬度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 熔覆层显微组织

熔覆层试样的 XRD 分析结果如图 2 所示。可以看出,未施加电磁复合场时,试样的衍射图谱中有  $\alpha\text{-Ti}$ 、TiB 和  $\text{TiB}_2$  衍射特征峰;而在施加电磁复合场后,无论洛伦兹力方向向上,还是向下,试样中只出现了  $\alpha\text{-Ti}$  和 TiB 衍射峰,并无  $\text{TiB}_2$  特征峰。

图 3 是电磁复合场施加前后熔覆层的扫描电镜图。可以观察到,未施加电磁复合场的熔覆层组织出现了 3 种不同的形态,即细针状、粗棒状和颗粒状 (图 3a)。根据本课题组前期研究<sup>[13]</sup>,并结合 XRD 分析结果,推断细针状组织为 TiB,粗棒状组织为  $\text{TiB}_2$ ,而颗粒状组织主要由 2 种相构成,即暗黑色颗粒  $\text{TiB}_2$  和浅灰色颗粒 TiB。在电磁复合场施加后,无论是洛

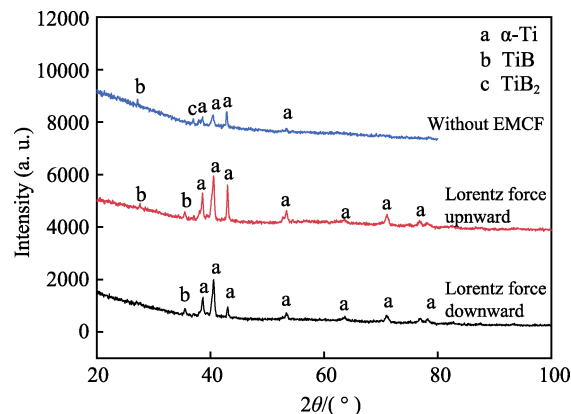


图 2 电磁复合场施加前后的熔覆层 XRD 图谱  
Fig.2 X-ray diffraction patterns of coatings without and with EMCF

伦兹力作用方向向上 (图 3b), 还是方向向下 (图 3c), 获得的熔覆层均只生成了 TiB, 没有  $\text{TiB}_2$  生成, 而且生成的 TiB 呈现出网状结构分布。此外, 洛伦兹力方向向下时产生的网状结构空间尺寸大于洛伦兹力方向向上时的网状结构空间尺寸。

通过 SEM 高倍放大观察了在洛伦兹力作用下得到的两类熔覆层的组织结构, 如图 4 所示。由图 4a、4b 可知, 白色网状结构组织由细针状的  $\text{TiB}_w$  相<sup>[5]</sup>构成。通过对比发现, 电磁复合场施加后, 熔覆层内针

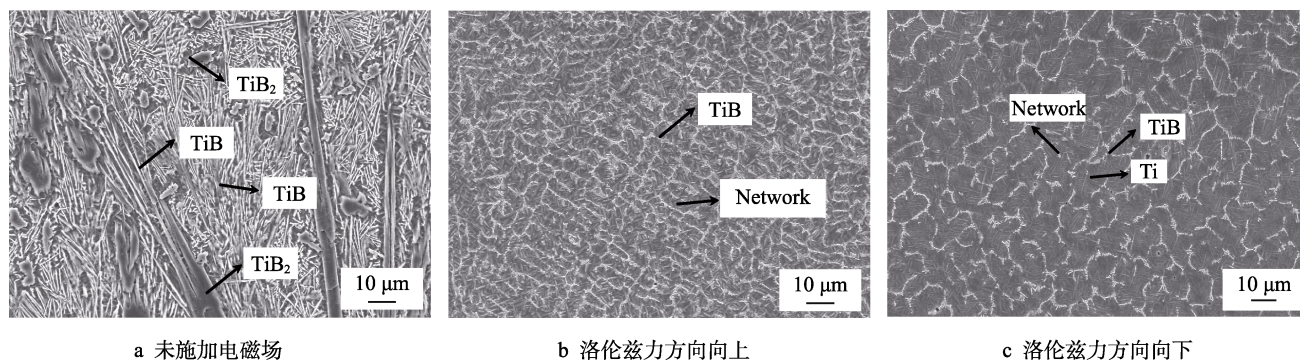


图 3 电磁复合场施加前后的熔覆层中部横截面的显微组织  
Fig.3 Cross-section microstructure of coatings without and with EMCF: a) without EMCF; b) upward Lorentz force direction; c) downward Lorentz force direction

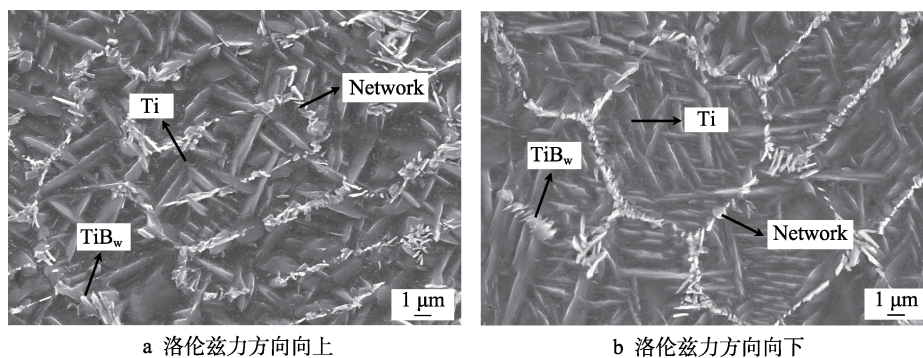


图 4 电磁复合场施加后高倍下熔覆层横截面的扫描电镜图  
Fig.4 SEM images of coatings with EMCF under high magnification: a) upward Lorentz force direction; b) downward Lorentz force direction



状组织的长度得到了明显的抑制,并且几乎不存在颗粒状组织,而且该网状结构中都不存在 TiB<sub>2</sub> 相。另外, TiB<sub>w</sub> 增强相较均匀地分布在熔覆层内部,且宏观上表现出连续性。其他学者<sup>[14-15]</sup>也发现 TiB<sub>w</sub> 和 Ti 基体之间的界面不存在其他杂质,即 TiB<sub>w</sub> 与 Ti 基体之间的界面很洁净,有固定取向关系,并且 TiB<sub>w</sub> 与 Ti 基体之间的界面结合强度很高。这是由于增强相网状分布结构类似于在晶界处定向引入增强相,从而能保证优异的强韧化效果。

## 2.2 熔覆层显微硬度

图 5 所示为施加电磁复合场前后的熔覆层的显微硬度。由图可知,基材平均硬度为 350HV<sub>0.2</sub>,熔覆层硬度显著高于基体材料,且不同洛伦兹力方向制备的涂层的显微硬度有所差别。未施加电磁复合场时,熔覆层显微硬度约为 525HV<sub>0.2</sub>;洛伦兹力方向向上时,熔覆层平均显微硬度为 620HV<sub>0.2</sub>;洛伦兹力方向向下时,熔覆层平均显微硬度为 550HV<sub>0.2</sub>。此外,未施加电磁复合场的熔覆层硬度变化幅度很大,而施加电磁复合场后,无论洛伦兹力方向如何,熔覆层硬度变化幅度都很小。这说明电磁场有助于熔覆层中强化相的均匀分布。由图 4a、4b 可见,洛伦兹力向上时生成的类网状结构空间间距小于洛伦兹力向下生成的网状结构,结合图 5 发现,洛伦兹力向上时的熔覆层平均显微硬度高于洛伦兹力向下时。综合可知,均匀、紧密分布的强化相有利于提高熔覆层的显微硬度。

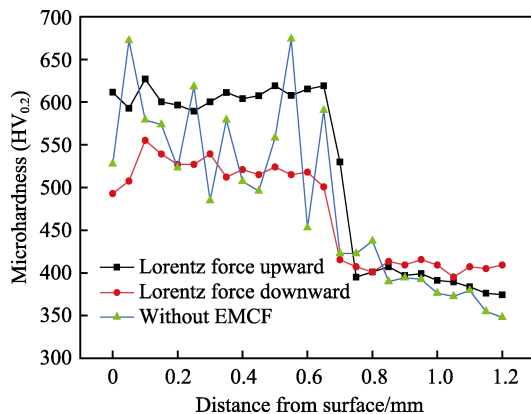


图 5 电磁复合场施加前后的熔覆层的显微硬度  
Fig.5 Micro-hardness of coatings without and with EMCF

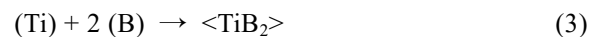
## 2.3 分析讨论

已有研究表明,熔覆层中增强相的形貌和分布与熔池凝固过程的热力学及动力学条件直接相关<sup>[16-17]</sup>。增强相原位合成的反应机制主要有液-固扩散机制和溶解-反应-析出机制<sup>[18-19]</sup>。本文采用纯 Ti 和 TiB<sub>2</sub> 粉末作为熔覆材料,在钛合金表面运用电磁复合场协同激光熔覆制备 TiB<sub>w</sub>/Ti 网状结构复合涂层,网状结构中的增强相 TiB 主要通过 TiB<sub>2</sub> 和 Ti 之间的原位反应

获得。在液-固扩散机制中, TiB 的形成主要通过依附在棒状 TiB<sub>2</sub> 表面生长<sup>[20]</sup>,导致 TiB 的直径和长度都较大(图 3a)。而网状结构中 TiB 增强体主要呈现短杆状特征(图 3b 和图 3c)。因此,网状结构中 TiB 增强体的形成主要通过溶解—反应—析出机制完成。

在激光熔覆过程中,预置的 TiB<sub>2</sub> 颗粒与基材几乎同时发生熔化,形成熔池。根据文献[21]的热力学计算结果可知,在 500~2000 °C 范围内,体系的反应吉布斯自由能为负,说明在激光作用下的熔池温度范围内, TiB 在 Ti 熔体中是可以形成的。在熔池中, TiB<sub>2</sub> 颗粒不断进入 Ti 液中的刚开始阶段, TiB<sub>2</sub> 颗粒处于上层, Ti 液处于下层;而在熔池流动过程中,不断发生渗透,同时在此过程中还伴随着原位反应的进行<sup>[22]</sup>。

在激光熔池形成过程中, TiB<sub>2</sub> 颗粒在熔池中的 Ti 活度比较高,会按式(1)、(2)、(3)发生溶解和反应,释放出的 B 原子首先溶于 Ti 液中,并随后扩散至活化点(TiB 晶核或 TiB<sub>2</sub> 晶核)。根据文献[23]的研究可知, Ti 原子和 B 原子在相同温度条件下, TiB<sub>2</sub> 反应驱动力大于 TiB。但增强相的生成除了满足热力学条件外,还需要满足动力学条件。



根据课题组前期的模拟结果<sup>[10-11]</sup>可知,电磁复合场在熔池中形成了两类体积力——感应洛伦兹力和定向洛伦兹力。感应洛伦兹力方向与熔池对流方向相反,可对熔池流速产生明显的抑制作用;而定向洛伦兹力作为一类与重力类似的体积力,可改变硬质相所受的等效浮力。当 Ti:TiB<sub>2</sub>=1:1 时,未施加电磁复合场的熔覆层中部分 TiB<sub>2</sub> 颗粒没有发生溶解(图 3a),所形成的 TiB 主要呈细针状、浅灰色颗粒状。由于 Ti 添加量减少, TiB<sub>2</sub> 颗粒溶解量降低,从而导致 Ti 液中溶解的 B 原子数量减少。当激光束移走后,熔池开始快速凝固,这个阶段初晶 TiB 晶核可以自由生长。由于该阶段为自由生长阶段, TiB 相沿[010]方向的生长速度比垂直于[100]、[101]和[102]面方向的生长速度更快<sup>[24-25]</sup>,更容易生长成随机取向的细针状,如图 3a 所示。

为了说明网状结构形成是否跟感应洛伦兹力相关,研究了单一稳态磁场对熔覆层内组织结构的影响。图 6 为其他工艺参数相同条件下,即激光功率为 1800 W,扫描速度为 6 mm/s,粉末配比 Ti : TiB<sub>2</sub>=1 : 1,铺粉厚度为 0.4 mm,施加 0.6 T 稳态磁场(MCF),熔覆层中部横截面显微组织。可以看出,施加稳态磁场后,熔覆层内仅形成了粗棒状与细针状组织,可知粗棒状主要为 TiB<sub>2</sub><sup>[13]</sup>,而细针状主要为 TiB。通过多次试验研究,发现仅仅施加稳态磁场无法获得网状结构的组织,说明通过稳态磁场形成的感应洛伦兹力还

无法有效影响熔覆层内网状结构的形成。同时,结合上文显微组织分析,发现形成网状结构的必要条件是  $\text{TiB}_2$  相发生全部溶解。于是,感应洛伦兹力与定向洛伦兹力的相互作用可促使涂层在激光熔池凝固过程中形成网状结构。

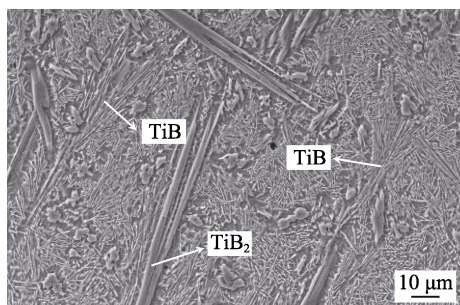


图 6 施加稳态磁场后熔覆层中部横截面的显微组织  
Fig.6 Cross-section microstructure of central part on the coatings with magnetic compound field

### 3 结论

1) 利用 Ti 粉与  $\text{TiB}_2$  粉作为熔覆材料,在钛合金表面采用电磁复合场协同激光原位技术制备得到了  $\text{TiB}_w/\text{Ti}$  网状结构的复合涂层。

2) 在相同工艺参数条件下,方向向下的洛伦兹力可获得空间间距更大的网状结构复合涂层。

3) 熔覆层内网状结构形成需要感应洛伦兹力与定向洛伦兹力共同作用,且  $\text{TiB}_2$  颗粒全部发生溶解。

4) 电磁复合场有助于  $\text{TiB}_w/\text{Ti}$  网状结构强化相的均匀分布,促使复合涂层的显微硬度更加均匀。

#### 参考文献:

- [1] 黄陆军,耿林. 网状结构钛基复合材料研究进展[J]. 中国材料进展, 2016, 35(9): 6-10.  
HUANG Lu-jun, GENG Lin. Progress on titanium matrix composites with network microstructure[J]. Materials China, 2016, 35(9): 6-10.
- [2] ZHANG H, SPRINGER H, APARICIO-FERNANDEZ R, et al. Improving the mechanical properties of Fe- $\text{TiB}_2$  high modulus steels through controlled solidification processes[J]. Acta materialia, 2016, 118: 187-195.
- [3] GAISIN R A, IMAYEV V M, IMAYEV R M. Effect of hot forging on microstructure and mechanical properties of near a titanium alloy/TiB composites produced by casting[J]. Journal of alloys and compounds, 2017, 723: 385-394.
- [4] 卢柯. 梯度纳米结构材料[J]. 金属学报, 2015, 51(1): 1-10.  
LU Ke. Gradient nanostructured materials[J]. Acta metallurgica sinica, 2015, 51(1): 1-10.
- [5] HUANG L J, GENG L, PENG H X. Microstructurally inhomogeneous composites: Is a homogeneous reinforcement distribution optimal?[J]. Progress in materials science, 2015, 71: 93-168.
- [6] 刘洪喜,李正学,张晓伟,等. 热处理对钛合金表面激光原位合成高 Ti-Al 金属间化合物涂层高温抗氧化行为的影响[J]. 金属学报, 2017, 53(2): 75-84.  
LIU Hong-xi, LI Zheng-xue, ZHANG Xiao-wei, et al. Effect of heat treatment on high-temperature oxidation resistance of high niobium Ti-Al intermetallic coating fabricated by laser in situ synthesis on titanium alloy[J]. Acta metallurgica sinica, 2017, 53(2): 75-84.
- [7] MALIUTINA I N, MOHAND H S, SIJOBERT J, et al. Structure and oxidation behavior of  $\gamma$ -TiAl coating produced by laser cladding on titanium alloy[J]. Surface and coatings technology, 2017, 319: 136-144.
- [8] 林英华,雷永平. 激光原位制备高体积分数与长径比的 TiB 短纤维与  $\text{TiB}_2$  增强钛基复合涂层[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 105-111.  
LIN Ying-hua, LEI Yong-ping. High volume fraction and length-diameter ratio of TiB short fiber and  $\text{TiB}_2$  reinforced Ti-based alloy composite coatings by laser synthesis in situ[J]. Chinese journal of lasers, 2014, 41(7): 105-111.
- [9] LIN Y H, YAO J H, LEI Y P, et al. Microstructure and properties of  $\text{TiB}_2$ -TiB reinforced titanium matrix composite coating by laser cladding[J]. Optics and lasers in engineering, 2016, 86: 216-227.
- [10] WANG L, YAO J H, HU Y, et al. Influence of electric-magnetic compound field on the WC particles distribution in laser melt injection[J]. Surface and coatings technology, 2017, 315: 32-43.
- [11] WANG L, YAO J H, HU Y, et al. Suppression effect of a steady magnetic field on molten pool during laser remelting[J]. Applied surface science, 2015, 351: 794-802.
- [12] 王梁,胡勇,姚建华,等. 稳态磁场辅助对激光熔凝层表面波纹的抑制作用研究[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 69-77.  
WANG Liang, HU Yong, YAO Jian-hua, et al. Suppression effect of a steady magnetic field on surface undulation during laser remelting[J]. Chinese journal of lasers, 2015, 42(11): 69-77.
- [13] LIN Y, LEI Y P, LI X Q, et al. A study of  $\text{TiB}_2/\text{TiB}$  gradient coating by laser cladding on titanium alloy[J]. Optics and lasers in engineering, 2016, 82: 48-55.
- [14] FENG H B, ZHOU Y, JIA D C, et al. Stacking faults formation mechanism of in situ synthesized TiB whiskers[J]. Scripta materialia, 2006, 55(8): 667-670.
- [15] TIAN Y S. Growth mechanism of the tubular TiB crystals in situ formed in the coatings laser-borided on Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials letters, 2010, 64(22): 2483-2486.
- [16] KOOI B J, PEI Y T, HOSSON J T M D. The evolution of microstructure in a laser clad TiB-Ti composite coat-

- ing[J]. *Acta materialia*, 2003, 51(3): 831-845.
- [17] 童文辉, 赵子龙, 张新元, 等. 球墨铸铁表面激光熔覆  $\text{TiC}/\text{钴基合金}$  组织和性能研究[J]. *金属学报*, 2017, 53(4): 472-478.
- TONG Wen-hui, ZHAO Zi-long, ZHANG Xin-yuan, et al. Microstructure and properties of  $\text{TiC}/\text{Co}$ -based alloy by laser cladding on the surface of nodular by laser cladding on the surface of nodular graphite cast iron[J]. *Acta metallurgica sinica*, 2017, 53(4): 472-478.
- [18] LI M, HUANG J, ZHU Y Y, et al. Effect of heat input on the microstructure of in-situ synthesized  $\text{TiN-TiB}/\text{Ti}$  based composite coating by laser cladding[J]. *Surface and coatings technology*, 2012, 206(19-20): 4021-4026.
- [19] FRANCESCO B, GIOVANNI B, CARLO G, et al. Diffusion mechanisms and microstructure development in pack aluminizing of Ni-based alloys[J]. *Surface and coatings technology*, 2014, 239: 147-159.
- [20] LIN Y H, YAO J H, WANG L, et al. Effects of  $\text{TiB}_2$  particle and short fiber sizes on the microstructure and properties of  $\text{TiB}_2$  reinforced composite coatings[J]. *Journal of materials engineering and performance*, 2018, 27: 1876-1889.
- [21] ZHANG X N, LV W, ZHANG D, et al. In situ technique for synthesizing  $(\text{TiB}+\text{TiC})/\text{Ti}$  composites[J]. *Scripta materialia*, 1999, 41(1): 39-46.
- [22] 林英华, 陈志勇, 李月华.  $\text{TC4}$  钛合金表面激光熔覆原位制  $\text{TiB}$  陶瓷涂层的微观组织特征与硬度特性[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(10): 2694-2698.
- LIN Ying-hua, CHEN Zhi-yong, LI Yue-hua. Microstructure and hardness properties of  $\text{TiB}$  ceramic coating prepared by laser cladding on  $\text{TC4}$  titanium alloy surface[J]. *Infrared and laser engineering*, 2012, 41(10): 2694-2698.
- [23] 吕维洁, 张获. 原位合成钛基复合材料的制备, 微结构及力学性能[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 19-21.
- LV Wei-jie, ZHANG Di. Fabrication, microstructure and mechanical properties of in situ synthesized titanium matrix composites[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005: 19-21.
- 
- (上接第 89 页)
- [4] CHEN X, LIA X G, DU C W, et al. Effect of cathodic protection on corrosion of pipeline steel under disbonded coating[J]. *Corrosion science*, 2009, 51(9): 2242-2245.
- [5] MARSHAKOVA A I, IGNATENKO A V E, BOGDANOV R I, et al. Effect of electrolyte composition on crack growth rate in pipeline steel[J]. *Corrosion science*, 2014, 83: 209-216.
- [6] 弓晓园, 吴志生, 吴磊, 等.  $\text{AZ31}$  镁合金盐浴渗铝改善耐蚀性机制分析[J]. *焊接学报*, 2017, 38(1): 99-103.
- GONG Xiao-yuan, WU Zhi-sheng, WU Lei, et al. Research on properties of diffusion aluminizing layer on  $\text{AZ31B}$  magnesium alloy[J]. *Transactions of the china welding institution*, 2017, 38(1): 99-103.
- [7] MAWDSLEY J R, SU Y J, FABER K T, et al. Optimization of small-particle plasma-sprayed alumina coatings using designed experiments[J]. *Materials science and engineering*, 2001, 308: 189-199.
- [8] 任蓓蕾, 缪强, 梁文萍, 等. 渗铝温度对  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  合金高温抗氧化性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2015, 36(12): 241-246.
- REN Bei-lei, MIAO Qiang, LIANG Wen-ping, et al. Effect of surface aluminizing temperature on oxidation resistance of  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  alloy[J]. *Transactions of materials and heat treatment*, 2015, 36(12): 241-246.
- [9] ZOIS D, LEKATOU A, VARDAMOULIAS M, et al. Nanostructured alumina coatings manufactured by air plasma spraying: Correlation of properties with the raw powder microstructure[J]. *Journal of alloys and compounds*, 2010, 495: 611-616.
- [10] LI He-ping, KE Zhi-qiang, LI Jing. An effective low-temperature strategy for sealing plasma sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -based coatings[J]. *Journal of the european ceramic society*, 2018, 38: 1871-1877.
- [11] DIAB M, PANG Xin, JAHED H. The effect of pure aluminum cold spray coating on corrosion and corrosion fatigue of magnesium (3%  $\text{Al}$ -1%  $\text{Zn}$ ) extrusion[J]. *Surface and coatings technology*, 2017, 309: 423-435.
- [12] BARCHI L, BARDI U, CAPORALI S, et al. Electroplated bright aluminium coatings for anticorrosion and decorative purposes [J]. *Progress in organic coatings*, 2010, 67: 146-151.
- [13] GOLRU S S, ATTAR M M, RAMEZANZADEH B. Studying the influence of nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles on the corrosion performance and hydrolytic degradation resistance of an epoxy/polyamide coating on AA-1050[J]. *Progress in organic coatings*, 2014, 77: 1391-1399.
- [14] QIAO J H, BOLOT R, LIAO H L, et al. A 3D finite-difference model for the effective thermal conductivity of thermal barrier coatings produced by plasma spraying[J]. *International journal of thermal sciences*, 2013, 65: 120-126.
- [15] CHEBBI A, GUIPONT V, ELLEUCH K, et al. Effects of 316SS addition on the properties of the coatings based on  $\text{Al}_2\text{O}_3$  applied by plasma spraying[J]. *Journal of composite materials*, 2018, 52(19): 2597-2608.
- [16] MARCINAUSKAS L. Deposition of alumina coatings from nanopowders by plasma spraying[J]. *Materials science*, 2010, 16(1): 47-51.