

## 激光与光电子学进展

## TiC 含量对激光熔覆 Fe 基涂层形貌与力学性能研究

程才<sup>1</sup>, 师文庆<sup>1\*</sup>, 吴腾<sup>1</sup>, 王杉杉<sup>1</sup>, 陈熙淼<sup>1</sup>, 彭文<sup>2</sup><sup>1</sup>广东海洋大学电子与信息工程学院, 广东 湛江 524088;<sup>2</sup>佛山市骨科内置物(施泰宝)工程技术研究中心, 广东 佛山 528051

**摘要** 为了探究 TiC 含量对铁基涂层熔覆形貌与成形质量的影响,提升 65Mn 钢表面力学性能。采用激光熔覆技术在 65Mn 钢表面制备铁基 TiC 复合涂层,对比分析了不同 TiC 添加量对铁基熔覆层的成形质量(气孔率)、宽高比、显微硬度的影响。结果表明,随着 TiC 添加量的增高,宽高比呈现先增大后减小的趋势,当 TiC 的质量分数为 30% 时,宽高比达到最高 5.31,此时的气孔率有所下降。适量地添加 TiC 能够有效提升复合涂层的硬度,但过高的 TiC 含量会造成熔池中气体过多,气孔率增大,无法获得良好的涂层性能。该研究结果对农机刀具领域具有一定的指导作用。

**关键词** 激光熔覆; 复合涂层; 显微硬度; 碳化钛

中图分类号 TG174.44

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221359

## Study of the Effect of TiC Content on the Morphology and Mechanical Properties of Laser Cladding Fe-Based Coatings

Cheng Cai<sup>1</sup>, Shi Wenqing<sup>1\*</sup>, Wu Teng<sup>1</sup>, Wang Shanshan<sup>1</sup>, Chen Ximiao<sup>1</sup>, Peng Wen<sup>2</sup><sup>1</sup>College of Electronics and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, Guangdong, China;<sup>2</sup>Foshan Orthopedic Implant (Stable) Engineering Technology Research Center, Foshan 528051, Guangdong, China

**Abstract** TiC-reinforced Fe-based composites are prepared to improve the surface mechanical properties of 65Mn steel and explore the effect of TiC content on the cladding morphology and forming quality of Fe-based coatings. The TiC/Fe-based ceramic composite coating was fabricated on the surface of 65Mn steel by laser cladding technology. The effects of different TiC contents on the quality (porosity), aspect ratio, and microhardness of the cladding layer are compared. The results show that with increasing TiC content, the aspect ratio first increases and then decreases. When the mass fraction of TiC is 30%, the aspect ratio reaches a maximum of 5.31, and the porosity decreases. The addition of an appropriate amount of TiC can effectively improve the hardness of the composite coatings, but very high TiC content results in excessive gas in the molten pool. Thus, the porosity increases and good coating performance cannot be obtained. The results of this study are expected to play a guiding role in the field of agricultural machinery tools.

**Key words** laser cladding; composite coating; microhardness; TiC

## 1 引言

近年来,激光熔覆技术在农机领域被许多学者广泛研究,并被应用于农机零部件修复与强化中<sup>[1-6]</sup>。农业机械是农业生产中必不可少的装备,农机零件要求具有较高的强度、硬度、耐磨性以及韧性,国内常用 65Mn 来制造各种农机零部件,如圆盘耙、深松铲、犁铧、旋耕刀等<sup>[7-8]</sup>,在使用过程中不可避免会受到来自

土壤、石块等的摩擦磨损作用,其硬度、耐磨性要达到一定的使用条件,如不能满足使用要求,容易发生磨损失效,频繁更换农机零件,导致农业生产劳动成本的增加<sup>[9]</sup>。激光熔覆技术作为表面改性技术的一种,具有光点小、能量集中、稀释率低、涂层与基体冶金结合能力强的特点<sup>[10-15]</sup>,因此可以显著提升基材的表面力学性能。铁基合金因成分与基体相近,其成形效果和价格都比较适合农机装备修复<sup>[16]</sup>,TiC 作为硬质增强相,

收稿日期: 2022-04-20; 修回日期: 2022-05-16; 录用日期: 2022-06-13; 网络首发日期: 2022-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(62073089)、广东省普通高校重点领域专项项目(2020ZDZX2061)

通信作者: \*swqafj@163.com

常被用作提升 65Mn 钢表面涂层性能的重要材料之一<sup>[17-19]</sup>。65Mn 钢表面铁基涂层中 TiC 的加入可有效减少涂层中气孔、裂纹等缺陷,对涂层的成形质量和综合力学性能有显著的提升<sup>[20]</sup>,对拓宽其应用范围具有重要的意义。

许多国内外学者对激光熔覆铁基 TiC 复合涂层的力学性能进行了研究。王植等<sup>[21]</sup>对 45 钢表面激光熔覆铁基 TiC 复合涂层,结果表明,TiC 的加入,大幅提升了熔覆层的硬度与耐磨性。曹金龙等<sup>[22]</sup>在 45 钢表面熔覆 Ni60-TiC 复合涂层,研究了不同 TiC 含量(质量分数)对涂层力学性能的影响,结果表明,TiC 的加入可以有效改善涂层的耐磨性能,提高涂层硬度。皮自强等<sup>[23]</sup>在高锰钢表面制备了不同 WC 含量的 Fe-WC 复合熔覆层,得出结论:随着 WC 颗粒添加量增多,Fe-WC 熔覆层的硬度和耐磨性增大,WC 颗粒在熔覆层中起到骨架作用,合金基体起到支撑作用,二者协同使得熔覆层耐磨性增加。王乾廷等<sup>[24]</sup>采用激光熔覆技术在 Cr12 模具钢表面制备了 Fe50-TiC 复合熔覆层,结果表明,Fe50-TiC 复合涂层可以明显提升 Cr12

模具钢的表面性能,熔覆层的平均硬度约为基体的 2.4 倍。

由以上研究可知,激光熔覆铁基 TiC 复合涂层对于提升基材的力学性能有显著效果。对于 65Mn 钢表面激光熔覆铁基 TiC 复合涂层的研究,鲜有报道。综上所述,本文采用激光熔覆技术在 65Mn 钢表面制备了铁基 TiC 复合涂层,研究其形貌、宽高比、气孔率以及表面硬度,使用优化后的工艺参数进行多道搭接试验验证。研究结果对农机刀具领域性能提升具有一定的指导作用。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 试验材料

试验中使用的材料为 90 mm×50 mm×2 mm 的 65Mn 钢,熔覆材料为铁基合金粉末 Fe60 和陶瓷粉末 TiC(纯度为 99.98%),其主要化学成分如表 1 和表 2 所示。分别添加质量分数为 15%、30%、45% 的 TiC 粉末作为硬质增强相,所用 Fe60 粉末和 TiC 粉末形貌如图 1 所示。

表 1 65Mn 钢基体的化学成分

Table 1 Chemical composition of 65Mn steel substrate

Material	Mass fraction / %						Fe
	C	Mn	P	S	Si	N	
65Mn	≤0.62	≤0.9	≤0.015	≤0.003	≤0.23	≤0.0013	Bal.

表 2 Fe60 粉末的化学成分

Table 2 Chemical composition of Fe60 powder

Material	Mass fraction / %						Fe
	C	Si	B	Cr	Ni		
Fe60	0.8-1.2	1.0-2.0	3.8-4.2	16-18	9.0-12		Bal.

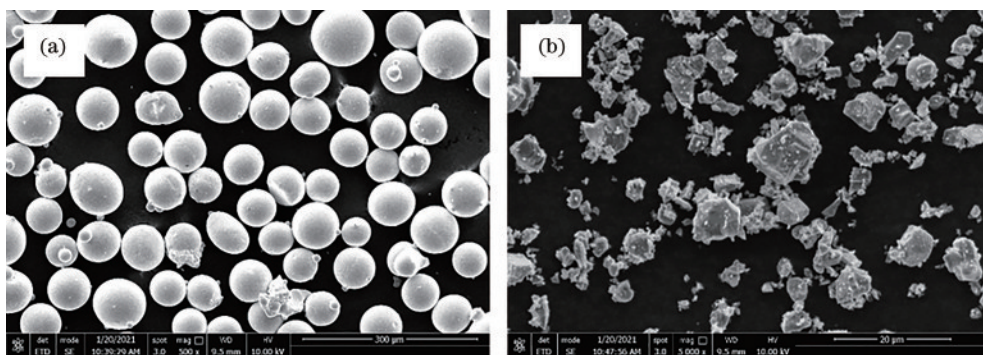


图 1 熔覆粉末的扫描电子显微镜图。(a)Fe60 粉末;(b)TiC 陶瓷粉末

Fig. 1 Scanning electron microscope images of cladding powder. (a) Fe60 powder; (b) TiC ceramic powder

### 2.2 试验方法

试验前选用 800#、1200# 金相砂纸依次打磨 65Mn 钢表面,并使用无水乙醇进行清洗,去除杂质和多余油污,烘干备用。采用 XL-F2000W 光纤激光加工系统进行激光熔覆试验,铺粉方式为粉末预置法,粉末预置厚度约 1 mm,激光熔覆工艺参数设置如下:激光功率

为 800 W,扫描速度为 300 mm/min,离焦量为 +5 mm。激光熔覆完成后用线切割机沿垂直于激光扫描方向切割试样,使用金相镶嵌机(XQ-2B)制成试样,依次用 400#、600#、800#、1500#、2000# 的金相砂纸打磨试样,在金相磨抛机上使用 1 μm 金刚石研磨膏研磨试样,使用体积分数 5% 硝酸盐腐蚀试样表面。显



微硬度使用上海钜晶精密仪器生产的数显显微硬度计 (MHVD-1000AT) 加载力 500 gf (1 gf=0.0098 N), 保压 10 s。从涂层顶部至基材向下等间距 (0.15 mm) 测出熔覆层和基体的硬度值, 每一个间距测三个点取平均值。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 截面宏观形貌分析

不同 TiC 质量分数的单道熔覆层截面形貌如图 2 所示。可以看出, 不同 TiC 质量分数对熔覆层宏观形貌影响较大, 熔覆层与基体的界面结合良好。未添加 TiC 时 (仅有 Fe60 粉末), 熔覆层截面形貌有少量气孔

和裂纹, 这主要是因为铁基合金自溶性差、抗氧化性差、流动性不好。随着 TiC 含量的增加, 熔覆层截面形貌变差, 这是因为在激光熔覆过程中, 当高能量密度激光热源作用于铁基 TiC 复合涂层时, 部分 TiC 熔解析出 C, C 又与空气中的氧气反应生成 CO, 再加之激光熔覆具有急热急冷特性, 使得 CO 气体不易排出, 涂层截面形貌进一步变差<sup>[25]</sup>。由此可见, 随着 TiC 含量的增加, 熔覆层产生裂纹和气孔的几率就会增加, 熔覆层的截面形貌也会逐渐变差。多道熔覆层截面形貌如图 3 所示, 随着 TiC 含量的增加, 裂纹和气孔也随之逐渐增加, 进一步验证了单道熔覆效果。

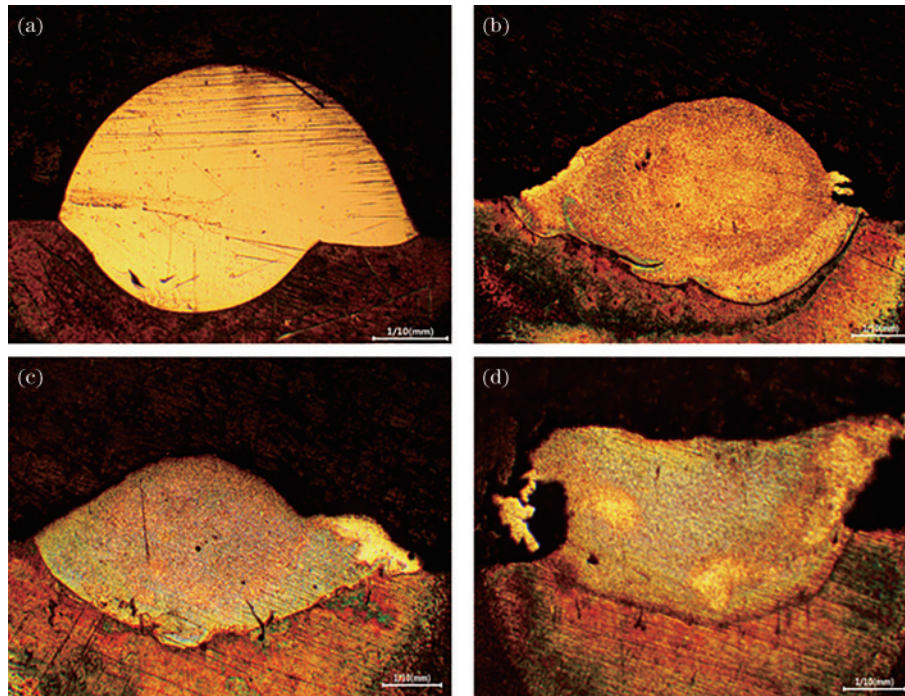


图 2 不同质量分数 TiC 的单道熔覆层截面形貌图。(a) 不含 TiC; (b) TiC 质量分数为 15%; (c) TiC 质量分数为 30%; (d) TiC 质量分数为 45%

Fig. 2 Cross-sectional morphology of single-pass cladding layer with different TiC mass fractions. (a) Without TiC; (b) TiC mass fraction is 15%; (c) TiC mass fraction is 30%; (d) TiC mass fraction is 45%

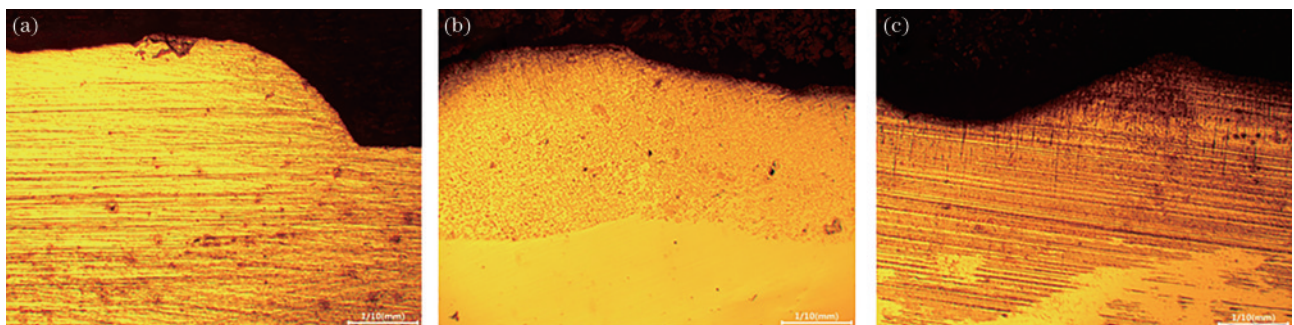


图 3 不同质量分数 TiC 的多道熔覆层截面形貌图。(a) TiC 质量分数为 15%; (b) TiC 质量分数为 30%; (c) TiC 质量分数为 45%

Fig. 3 Cross-sectional morphology of multi-pass cladding layers with different TiC mass fractions. (a) TiC mass fraction is 15%; (b) TiC mass fraction is 30%; (c) TiC mass fraction is 45%

#### 3.2 气孔率分析

对图 2 所示的熔覆层截面图像进行分析, 得到熔覆层气孔率分布情况, 如图 4 所示。随着 TiC 含量的

增加, 气孔率呈波浪式增长的趋势, 最高气孔率为 0.29%, 此时 TiC 质量分数为 45%, 当 TiC 质量分数为 30% 时, 气孔率有所下降, 气孔率为 0.17%。这是因

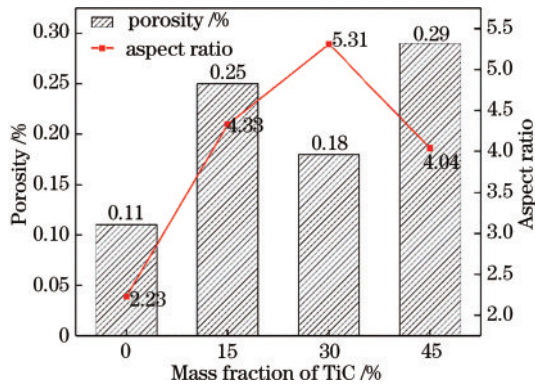


图 4 熔覆层中的气孔率和宽高比分布图

Fig. 4 Distribution of porosity and aspect ratio of cladding layers

为在激光熔覆过程中, TiC 含量增加, TiC 熔化的速率大于分解的速率, 熔池中 C 含量降低, 从而使熔池中 C 含量减少, 生成的 CO 气体也随之减少, 因此气孔率降低<sup>[26]</sup>。由此可知, 当复合涂层中 TiC 质量分数为 30% 时, 熔覆层熔覆质量为最优。

### 3.3 宽高比分析

熔覆层宽度与高度的比值是评价熔覆层质量的关键指标<sup>[27]</sup>。图 4 给出了宽高比, 由图可知, 随着 TiC 含量的增加, 宽高比整体呈先增高后降低的趋势: 在 TiC

质量分数为 30% 时达到最大, 宽高比为 5.31; 在 TiC 质量分数为 45% 时, 宽高比下降到 4.04, 此时未溶的 TiC 粉末增多, 导致更多的 TiC 粉末来不及熔化, 从而滞留在熔池中, 造成熔池尺寸减小, 随之宽高比变小。因此, TiC 质量分数为 30% 时可以得到最大的宽高比和较低的气孔率。

### 3.4 显微硬度分析

使用数显显微硬度计 (MHVD-1000AT) 加载力 500 gf, 保压 10 s。从涂层顶部至基材向下等间距 (0.15 mm) 测出熔覆层和基体的硬度值, 每一个间距测三个点取平均值。由图 5 可知, 不同 TiC 质量分数的试样, 其单道多道显微硬度均得到提高, 这是因为 TiC 作为硬质相, 涂层硬度整体提高。其中: 当 TiC 质量分数 30% 时, 熔覆层显微硬度约为基体的 3.6 倍, 且随着 TiC 添加量的增加而逐渐增大; 当 TiC 质量分数为 45% 时, 测得显微硬度为最高。这说明适当添加 TiC 对涂层硬度的提升有很大的影响, 出现这样的原因是: 1) Ti 元素在熔池中熔化起到了固溶强化的作用; 2) 熔覆层中 C 含量的增加, 导致碳化物的增多, 从而使硬度增加; 3) 随着 TiC 的加入, 未溶的 TiC 因此弥散在熔池中起到了弥散强化的效果<sup>[23]</sup>。65Mn 基体未经加工硬化处理, 其硬度在 250 HV<sub>0.5</sub> 左右, 硬度较低。

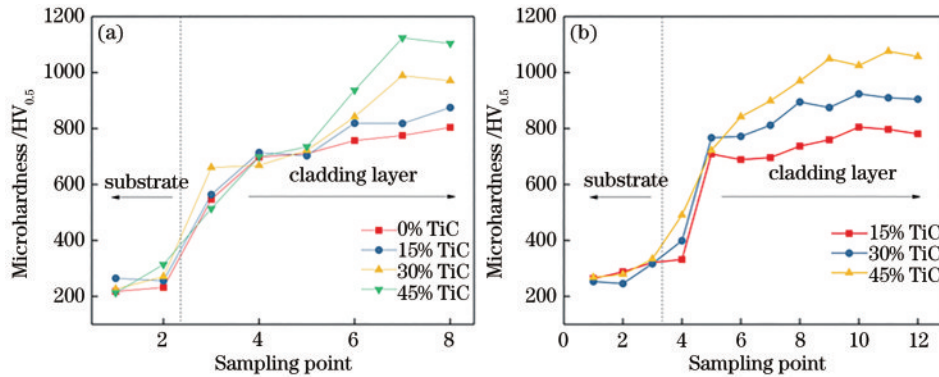


图 5 熔覆层显微硬度分布图。(a) 单道复合涂层平均显微硬度; (b) 多道复合涂层平均显微硬度

Fig. 5 Microhardness distributions of cladding layers. (a) Average microhardness of single-pass composite coatings; (b) average microhardness of multi-pass laser composite coatings

## 4 结 论

本文采用激光熔覆技术在 65Mn 钢表面制备了铁基 TiC 复合涂层, 研究了 TiC 含量对复合涂层截面形貌、宽高比、气孔率以及显微硬度的影响, 并进行多道试验验证分析, 得到以下结论:

1) 在 Fe60 粉末中加入不同含量 TiC 后, 所得涂层硬度与基材相比都有很大的提升, 且随着 TiC 含量的增加, 熔覆层的硬度逐渐增大, 当 TiC 质量分数为 45% 时, 硬度最大。

2) TiC 添加量对涂层性能有很大的影响, 但是过多的 TiC 含量会造成熔覆质量变差、熔池中气体增加, 从而气孔率变大。因此 TiC 的添加量应该在合理的区

间内。从本试验结果来看, 当 TiC 的质量分数为 30% 时, 激光熔覆所制备的复合涂层性能最优。

3) 经多道搭接试验验证后, 添加 TiC 的涂层硬度明显优于未添加 TiC 的涂层。

### 参 考 文 献

- [1] 张慧, 庞铭. Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 含量对 Q235B 钢表面激光熔覆 Fe 基耐磨涂层性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(1): 148-156.  
Zhang H, Pang M. Effect of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> content on performance of laser cladding Fe-based wear-resistant coating on Q235B steel surface[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2022, 43(1): 148-156.
- [2] 许令峰, 田冲, 刘腾, 李法德, 宋占华, 曹成铭, 袁恒泰. 激



- 光熔覆 Ni 基 WC 复合材料制备自磨刃割刀[J]. 农业工程, 2020, 10(04):72-78.
- Xu L F, Tian C, Liu T, et al. Preparation of knife with self-sharp edge by laser cladding Ni-based WC composite coating[J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(04):72-78.
- [3] 陈翔, 张德强, 李金华, 等. 激光辐照区中心温度对高速钢刀具熔覆 WC/Co 陶瓷层裂纹与组织的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(4): 113-124.
- Chen X, Zhang D Q, Li J H, et al. Effect of laser irradiation area central temperature on crack and microstructure of M2 high-speed steel cutter surface coating WC/Co by laser cladding[J]. Surface Technology, 2021, 50(4): 113-124.
- [4] 牟雪雷, 于磊, 甘露, 等. 激光加工技术在农机制造中的应用及发展[J]. 农机化研究, 2011, 33(6): 249-252.
- Mu X L, Yu L, Gan L, et al. Application and prospects of laser technology processing in agricultural machinery manufactory[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(6): 249-252.
- [5] 张津超, 石世宏, 龚燕琪, 等. 激光熔覆技术研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 1-11.
- Zhang J C, Shi S H, Gong Y Q, et al. Research progress of laser cladding technology[J]. Surface Technology, 2020, 49(10): 1-11.
- [6] 刘艳, 刘朋帅, 郭洋, 等. 激光熔覆超高强度钢的稀释率研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(23): 2314005.
- Liu Y, Liu P S, Guo Y, et al. Dilution rate of laser clad ultrahigh strength steel[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(23): 2314005.
- [7] 李宇佳, 龙伟民, 孙志鹏, 等. 钎涂增材在农机触土部件上的应用及发展趋势[J]. 电焊机, 2021, 51(8): 64-69, 115, 178.
- Li Y J, Long W M, Sun Z P, et al. Application and development trend of braze coating technology in soil-engaging components of agricultural machinery[J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(8): 64-69, 115, 178.
- [8] 吴俣, 马朋召, 白文倩, 等. 不同扫描策略下 316L/AISI304 激光熔覆过程中温度场-应力场的数值模拟[J]. 中国激光, 2021, 48(22): 2202002.
- Wu Y, Ma P Z, Bai W Q, et al. Numerical simulation of temperature field and stress field in 316L/AISI304 laser cladding with different scanning strategies[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(22): 2202002.
- [9] 宋玲玲, 马晓磊, 郭健, 等. 65Mn 铁基等离子堆焊层组织及耐磨性能研究[J]. 铸造技术, 2018, 39(7): 1528-1529, 1532.
- Song L L, Ma X L, Guo J, et al. Microstructure and wear resistance of 65Mn based on ferrous composite coating by plasma surfacing welding[J]. Foundry Technology, 2018, 39(7): 1528-1529, 1532.
- [10] 朱刚贤, 张安峰, 李涤尘. 激光熔覆工艺参数对熔覆层表面平整度的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 296-301.
- Zhu G X, Zhang A F, Li D C. Effect of process parameters on surface smoothness in laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(1): 296-301.
- [11] 张群莉, 王梁, 梅雪松, 等. 激光表面改性技术发展研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 71-77.
- Zhang Q L, Wang L, Mei X S, et al. Development of laser surface modification technology[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 71-77.
- [12] 王士顺, 张婷, 向梦辉, 等. 激光辅助涂层技术和表面改性质量的研究概述[J]. 表面技术, 2021, 50(8): 201-209.
- Wang S S, Zhang T, Xiang M H, et al. Research overview of laser-assisted coating technology and surface modification quality[J]. Surface Technology, 2021, 50(8): 201-209.
- [13] 张凯, 陈小明, 张磊, 等. 激光熔覆制备耐磨耐蚀涂层技术研究进展[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2019, 24(4): 308-314.
- Zhang K, Chen X M, Zhang L, et al. Research progress of wear-resistant and corrosion-resistant coatings prepared by laser cladding[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2019, 24(4): 308-314.
- [14] 文向东, 陈志勇, 朱卫华, 等. 激光原位熔覆制备 TiC/TiB 硬质陶瓷复合涂层[J]. 激光与红外, 2013, 43(4): 371-375.
- Wen X D, Chen Z Y, Zhu W H, et al. *In-situ* synthesized TiC/TiB ceramic particle composite coating by laser cladding on TC4 titanium alloy[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(4): 371-375.
- [15] 刘志鹏, 伍文星, 李胜, 等. 激光熔覆 Fe 基合金涂层组织与性能研究[J]. 机械工程师, 2021(4): 18-19, 23.
- Liu Z P, Wu W X, Li S, et al. Research on microstructure and properties of laser cladding Fe-base alloy coating[J]. Mechanical Engineer, 2021(4): 18-19, 23.
- [16] 张志虎, 孙文磊, 黄勇, 等. 高速激光熔覆和重熔复合技术制备铁基涂层的组织性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(21): 2114009.
- Zhang Z H, Sun W L, Huang Y, et al. Microstructures and properties of Fe-based coating prepared by high-speed laser cladding and remelting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(21): 2114009.
- [17] 赵龙志, 杨海超, 赵明娟, 等. 激光熔覆 TiC/FeAl 原位复合涂层[J]. 材料研究学报, 2017, 31(11): 860-866.
- Zhao L Z, Yang H C, Zhao M J, et al. *In-situ* TiC/FeAl composite coating fabricated by laser cladding[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2017, 31(11): 860-866.
- [18] 练国富, 张浩, 陈昌荣, 等. 激光熔覆 Ni35A+TiC 复合材料熔覆形貌及成形效率影响研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2020, 50(6): 715-725.
- Lian G F, Zhang H, Chen C R, et al. Study on the effect of laser cladding Ni35A + TiC composite cladding morphology and forming efficiency[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2020, 50(6): 715-725.
- [19] 张艺, 马志凯, 孙铂, 等. 激光熔覆材料的研究现状及发展[J]. 热加工工艺, 2015, 44(14): 40-44.
- Zhang Y, Ma Z K, Sun B, et al. Present status and development of material for laser cladding[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(14): 40-44.
- [20] 王宏立. 65Mn 钢表面激光熔覆铁基合金组织及摩擦磨损性能[J]. 应用激光, 2016, 36(4): 385-390.

- Wang H L. Microstructure and tribological behavior of iron-based alloy coating on surface of 65Mn steel by laser cladding[J]. *Applied Laser*, 2016, 36(4): 385-390.
- [21] 王植,雷剑波,姜伟,等.激光熔覆 Fe 基 TiC 涂层的组织与性能[J].*粉末冶金材料科学与工程*,2016,21(1):43-49.
- Wang Z, Lei J B, Jiang W, et al. Microstructure and properties of Fe-based TiC laser cladding coatings[J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*. 2016, 21(1): 43-49.
- [22] 曹金龙,杨学锋,王守仁,等.45 钢表面激光熔覆 Ni60-TiC 陶瓷涂层的耐磨耐蚀性能[J].*稀有金属材料与工程*,2020,49(2):611-617.
- Cao J L, Yang X F, Wang S R, et al. Wear and corrosion resistance of laser cladding Ni60-TiC ceramic coating on 45 steel surface[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(2): 611-617.
- [23] 皮自强,杜开平,郑兆然,等.高锰钢表面激光熔覆 Fe-WC 复合涂层的组织与性能[J].*热喷涂技术*,2021,13(2):77-84.
- Pi Z Q, Du K P, Zheng Z R, et al. Microstructure and properties of Fe-WC laser cladding layers on the high manganese steel substrate[J]. *Thermal Spray Technology*, 2021, 13(2): 77-84.
- [24] 王乾廷,曾宪斌,陈昌荣,等.Cr12 模具钢 Fe50-TiC 复合激光熔覆层的形貌、组织和力学性能[J].*激光与光电子学进展*,2021,58(7):0714002.
- Wang Q T, Zeng X B, Chen C R, et al. Morphology, microstructure, and mechanical properties of Fe50-TiC composite laser cladding layer on Cr12 mold steel[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(7): 0714002.
- [25] 姚爽,刘洪喜,张晓伟,等.H13 钢表面激光原位自生 TiC 颗粒增强复合涂层的微观结构和摩擦磨损性能[J].*中国激光*,2014,41(10):1003004.
- Yao S, Liu H X, Zhang X W, et al. Microstructure and wear property of TiC particle reinforced composite coatings on H13 steel surface by laser *in situ* synthesis[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(10): 1003004.
- [26] Zhan X H, Qi C Q, Gao Z N, et al. The influence of heat input on microstructure and porosity during laser cladding of Invar alloy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 113: 453-461.
- [27] 孙文强,张德强,陈翔,等.Ni/Wc 粉末单道熔覆层宏观形貌的实验研究[J].*机械设计与制造*,2021(12):125-129.
- Sun W Q, Zhang D Q, Chen X, et al. Experimental study on macro-morphology of Ni/Wc powder single cladding layer[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2021(12): 125-129.