

## 激光与光电子学进展

## 激光功率对 Fe-TiC 复合涂层组织及硬度的影响

李天澍<sup>1</sup>, 邓德伟<sup>1,2\*</sup>, 李振华<sup>1</sup>, 胡冰<sup>2</sup>, 孙奇<sup>2</sup>, 张勇<sup>2</sup><sup>1</sup>大连理工大学材料科学与工程学院辽宁省激光 3D 打印装备及应用专业技术创新中心, 辽宁 大连 116024;<sup>2</sup>沈阳鼓风机集团股份有限公司, 辽宁 沈阳 110869

**摘要** 为增强 304 不锈钢表面性能, 利用激光熔覆技术在其表面制备了 TiC 颗粒增强 Fe 基复合涂层, 研究了激光功率对涂层几何特征、组织特征及硬度的影响规律和原因, 引入灰关联分析综合表征熔覆层的组织特征, 并推测出激光熔覆过程中 TiC 颗粒的溶解机制。结果表明, 随激光功率的增加, 熔覆层高度、气孔率、未熔 TiC 颗粒含量降低, 宽度、深度、稀释率、析出 TiC 的二次枝晶臂间距增加, 析出 TiC 含量先增加后降低、基体的二次枝晶臂间距先降低后升高且在 1800 W 时分别达到最高和最低。当激光功率为 1800 W 时, 熔覆层表面成形良好, 其组织特征均衡发展且灰关联度达到最大, 平均硬度为 801.5 HV<sub>0.5</sub>, 达到基体的 4.5 倍左右。另外, TiC 颗粒在激光熔覆中共有两种溶解机制, 其特征分别为由外向内和整体分解, 两种机制共同作用导致 TiC 颗粒的完全溶解。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; Fe-TiC 复合涂层; 激光功率; 微观组织; 硬度; 灰关联分析

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221435

## Effect of Laser Power on Microstructure and Hardness of Fe-TiC Composite Coatings

Li Tianshu<sup>1</sup>, Deng Dewei<sup>1,2\*</sup>, Li Zhenhua<sup>1</sup>, Hu Bing<sup>2</sup>, Sun Qi<sup>2</sup>, Zhang Yong<sup>2</sup><sup>1</sup>Technology Innovation Centre for Laser 3D Printing Equipment and Applications (Liaoning Province), School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;<sup>2</sup>Shenyang Blower Group Corporation, Shenyang 110869, Liaoning, China

**Abstract** Laser cladding technology was used to prepare TiC particle-reinforced Fe-based composite coatings on 304 stainless steel to improve its surface properties. The effects and reasons of laser power on the geometrical microstructure characteristics and hardness of the cladding layer were investigated. The microstructure characteristics of the cladding layer were comprehensively characterized by grey relational analysis. The height, porosity, and content of unmelted TiC particles reduced as laser power rose, whereas the width, depth, dilution rate, and secondary dendrite arm spacing of precipitated TiC increased. The amount of precipitated TiC increased and then decreased, whereas the secondary dendrite arm spacing of the matrix decreased and then increased, reaching their maximum and lowest points at 1800 W, respectively. The surface of the cladding layer is well-formed when the laser power reaches 1800 W. It has a well-balanced microstructure and the grey relational grade is maximum. The cladding layer has an average hardness of 801.5 HV<sub>0.5</sub>, which is roughly 4.5 times that of the substrate. In addition, the dissolving mechanisms of TiC particles during the laser cladding process were deduced. There are two dissolving mechanisms for TiC particles, which are distinguished by outward-inward and integral decomposition. Both processes work together to cause TiC particles to dissolve completely.

**Key words** laser technique; laser cladding; Fe-TiC composite coatings; laser power; microstructure; hardness; grey relational analysis

## 1 引言

激光熔覆技术是通过高能激光束在金属表面制备

具有所需性能熔覆层的一种表面强化技术,其优点在于能量密度高、稀释率低、热影响区(HAZ)小,目前已成为表面强化领域的热点技术,在航空、汽车、石油化

收稿日期: 2022-04-27; 修回日期: 2022-05-28; 录用日期: 2022-06-13; 网络首发日期: 2022-06-23

基金项目: 辽宁重大装备制造协同创新中心基金(DUT2017031)、高端控制阀产业技术协同创新中心基金(2018WZ003)

通信作者: \*cailiaoqingqibing@163.com

工等行业备受瞩目<sup>[1-2]</sup>。

304 不锈钢由于良好的耐蚀性被广泛应用于食品、化工领域<sup>[3-4]</sup>,然而硬度低、耐磨性差的缺点限制了其在其他方面的应用,因此有必要对其进行表面强化<sup>[5-6]</sup>。一些学者利用激光熔覆技术在 304 不锈钢表面分别制备了钴基<sup>[7]</sup>、镍基<sup>[8]</sup>、铁基<sup>[9]</sup>合金涂层并发现能够显著提升其表面性能。其中,铁基合金粉末具有润湿性好、成本低的优点,应用广泛<sup>[10-11]</sup>。

目前,利用激光熔覆技术制备陶瓷颗粒增强 Fe 基复合涂层来提高基体表面性能的方式越来越受到关注,用于增强 Fe 基合金的陶瓷颗粒主要有 WC<sup>[12]</sup>、SiC<sup>[13]</sup>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>[14]</sup>、TiC<sup>[15]</sup>等。其中,TiC 具有强度高、硬度高、耐磨性好的优点,常被用作熔覆材料的增强体<sup>[16]</sup>。Zhang 等<sup>[17]</sup>利用脉冲激光熔覆在 40Cr 齿轮钢表面制备了 Fe-TiC 复合涂层,当 TiC 的质量分数为 50% 时,涂层最大硬度为 1022 HV<sub>0.2</sub>,磨损率为基体的 16.6%。王乾廷等<sup>[10]</sup>在 Cr12 钢表面制备了 Fe50-TiC 复合涂层,当 TiC 的质量分数为 35% 时,熔覆层内缺陷较少且硬度达到基体的 2.4 倍。周丹等<sup>[18]</sup>在 45 钢表面制备了高性能铁基 TiC 复合涂层,结果表明,随 TiC 含量增加,硬度和耐磨性提高,当 TiC 的质量分数为 30% 时,涂层的最高硬度为 1400 HV。Wang 等<sup>[19]</sup>研究了 Fe50/TiC 多道激光熔覆的工艺参数优化,结果表明,在最优参数下,熔覆层的硬度可达 60 HRC,耐磨性可达基体的 8.14 倍,此外,还有学者研究了激光工艺参数对 TiC 颗粒增强 Fe 基复合涂层成形质量和

性能的影响,结果表明,优化后熔覆层的性能有显著提升<sup>[20-22]</sup>。

综上所述,利用激光熔覆制备 Fe-TiC 复合涂层能够有效提高基体表面性能,且激光参数对复合涂层的制备有显著影响。激光功率作为重要参数之一,研究其对 Fe-TiC 复合涂层组织及硬度的影响具有重要意义,然而,目前关于此方面的研究不多,特别是其对 Fe-TiC 复合涂层微观组织影响的研究更是鲜有报道。此外,激光熔覆层有多个组织特征,单个组织特征优异可能无法保证涂层的性能和可靠性,因此,有必要对组织特征进行综合表征。鉴于此,本研究在 304 不锈钢表面通过激光熔覆制备了 Fe-TiC 复合涂层,在保证其他参数一致的前提下,研究了激光功率对熔覆层几何特征、组织特征、硬度的影响和原因,同时引入灰关联分析法对熔覆层组织特征进行综合表征。此外,推测了 TiC 颗粒在激光熔覆过程中的溶解机制。

## 2 试验材料和方法

### 2.1 试验设备

试验采用激光熔覆系统,如图 1 所示,激光熔覆系统包括六轴机械臂(ZH 30/60 III, KUKA)、半导体激光器(LDF 4.000-100, Laserline, 德国)、激光熔覆头(YC52, Precitec, 德国)、保护气气瓶等。激光束由激光器产生,经光纤传输到激光熔覆头后进行聚焦输出,另外,利用高纯氩气作为保护气体通过管路输送到熔覆头内部并吹出,防止熔覆层被氧化。

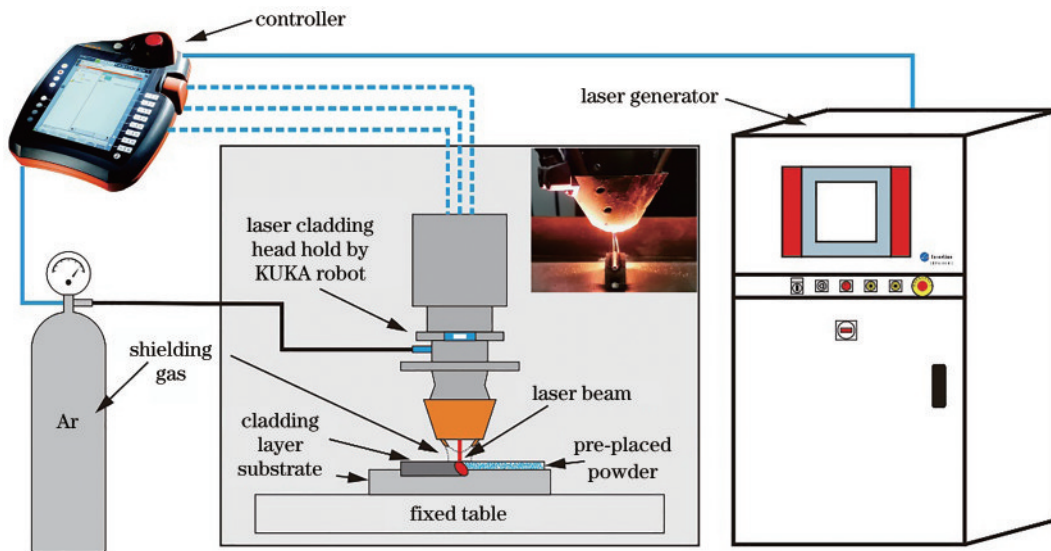


图 1 激光熔覆系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser cladding system

### 2.2 试验材料

试验采用的熔覆粉末是 Ferro 55 合金粉末与 TiC 粉末的混合物,粉末粒径为 50 ~ 430 μm,如图 2 所示,试验前将两种粉末按质量比 7:3 放入球磨机中混合

1 h 后,烘干处理。基体材料为 304 不锈钢,尺寸为 55 mm × 15 mm × 13 mm,试验前进行打磨处理,并放在无水乙醇中超声清洗 5 min。Ferro 55 合金粉末和基体材料的化学成分如表 1 所示。

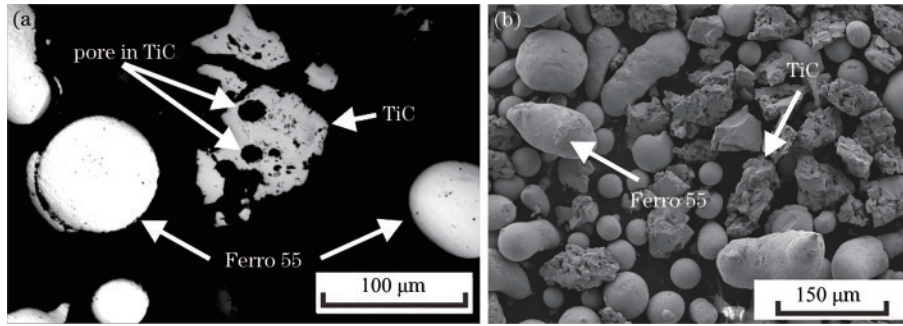


图 2 熔覆粉末形貌。(a) 光学显微镜图片；(b) 扫描电子显微镜图片

Fig. 2 Morphology of cladding powder. (a) Optical microscope picture; (b) scanning electron microscope picture

表 1 基体和 Ferro 55 合金粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of the substrate and Ferro 55 alloy powder

Material	Mass fraction / %								
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Fe	Mo
304 stainless steel	≤0.08	≤2.00	≤0.045	≤0.030	≤1.00	18.0-20.0	8.0-11.0	Bal.	—
Ferro 55	0.35	1.1	—	—	0.3	7	—	Bal.	2.2

### 2.3 试验方法

采用预置粉末法将熔覆粉末预置在基板上, 铺粉厚度为 2 mm, 宽度为 3 mm, 本试验的工艺参数如表 2 所示。

表 2 激光熔覆工艺参数

Table 2 Laser cladding process parameters

Process parameter	1#	2#	3#	4#	5#
Laser power / W	1600	1700	1800	1900	2000
Scanning speed / (mm·s <sup>-1</sup> )	6				
Spot diameter / mm	3				

为观察熔覆层成形质量, 将熔覆后的试样进行渗透探伤检测, 然后沿垂直于扫描速度的方向将其切割成尺寸为 10 mm×15 mm×13 mm 的试样, 对其依次进行打磨、抛光, 并采用电解饱和草酸溶液的方式进行腐蚀, 腐蚀电压为 5 V, 时间为 15 s。采用 Nikon MA-100 金相显微镜观察熔覆层的尺寸及组织, 利用型号为 ZEISS EVO-18 的扫描电子显微镜 (SEM) 和能谱

仪对其组织及成分进行分析。使用 MVC-1000B 型维氏硬度计测量熔覆层的硬度, 由熔覆层顶部向基体方向, 每隔 0.2 mm 打一个点, 载荷为 500 gf (1 gf=0.0098 N), 加载时间为 15 s, 并且在熔覆层中线附近取 10 个点计算平均硬度, 测量硬度时避开了未熔 TiC 颗粒。使用图像处理软件在金相图片中测定熔覆层中未熔 TiC 颗粒、气孔率、析出 TiC 的含量, 并在扫描电子显微镜下对不同视场中析出 TiC 和基体的二次枝晶臂间距测试至少 20 次, 并取平均值。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 激光功率对熔覆层缺陷及几何特征的影响

图 3 为不同激光功率下, 熔覆层的表面形貌以及渗透 (PT) 探伤结果。当激光功率为 1600 W 时, 熔覆层表面出现了裂纹。当激光功率高于 1600 W 时, 熔覆层的表面不存在裂纹、气孔等缺陷, 并且表面光滑致密, 呈金属光泽。

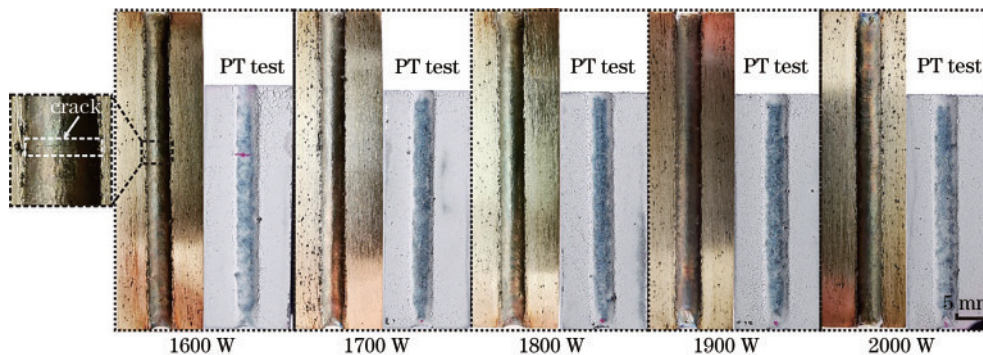


图 3 不同激光功率下熔覆层的宏观形貌和渗透检测结果

Fig. 3 Macroscopic morphology and penetrant test results of cladding layer at different laser powers

当激光功率为 1600 W 时, 热输入量较小, 熔池达到的峰值温度较低, 熔覆层中存在大量的未熔 TiC 颗

粒。未熔 TiC 颗粒的存在对熔覆层裂纹的产生有两方面作用: 1) 根据图 2 可知, 本研究所使用的 TiC 颗粒形



状不规则且预先存在缺陷,这些预先存在的缺陷很容易成为裂纹源或者裂纹扩展的路径<sup>[23]</sup>;2)TiC 颗粒与 Ferro 55 粉末的热膨胀系数差异较大,熔池冷却时,易在未熔的 TiC 颗粒附近产生较大的残余应力,最终导致裂纹的形成<sup>[18, 23-24]</sup>。因此,降低熔覆层中未熔 TiC 颗粒的含量有利于降低熔覆层的裂纹敏感性。

图 4 为激光功率对熔覆层几何特征和部分组织特征的影响,随着激光功率的增加,熔覆层的高度、未熔 TiC 颗粒含量、气孔率降低,深度、宽度、稀释率也增

加。激光功率的增加导致熔池温度升高,更多的 TiC 颗粒被完全熔化,熔池内部的对流作用增强,熔融的金属液由中间向两侧流动,导致熔覆层的高度降低、宽度增加<sup>[25]</sup>。同时,熔池存在时间的增加使得熔池内气体有充足时间溢出,熔覆层中的气孔率也因此降低。另外,激光功率的增加使得输入熔池的能量增加,从而导致熔深增加。熔覆层的稀释率主要与熔覆层的高度和深度有关,熔覆层高度降低、深度增加导致稀释率增加,基体对熔覆层的稀释作用增强。

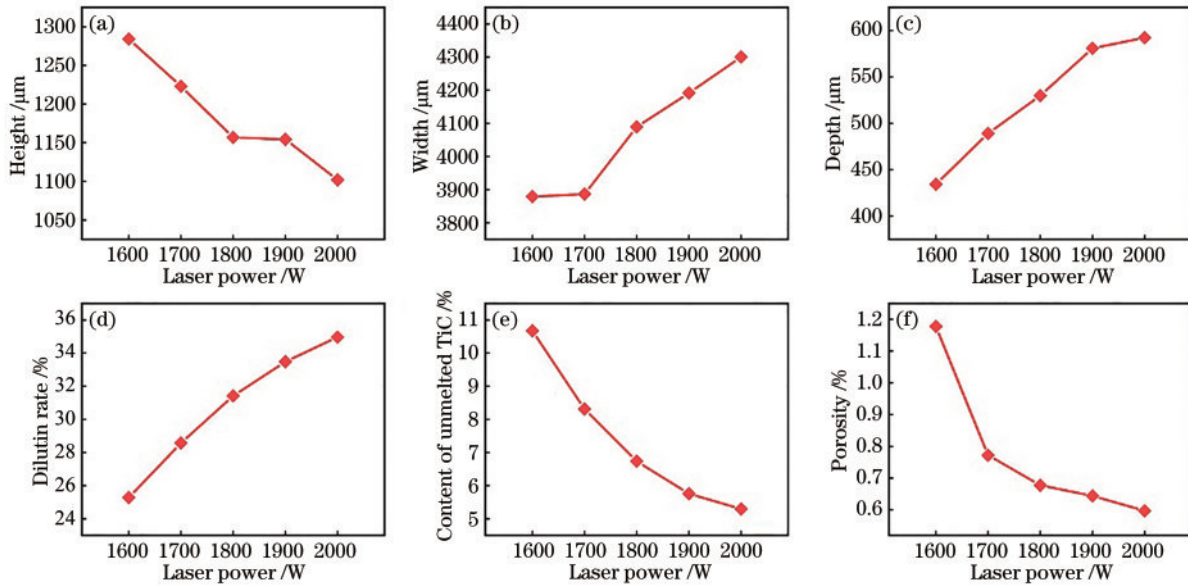


图 4 激光功率对熔覆层参量的影响。(a)高度;(b)宽度;(c)深度;(d)稀释率;(e)未熔 TiC 颗粒含量;(f)气孔率

Fig. 4 Influence of laser power on parameters of cladding layer. (a) Height; (b) width; (c) depth; (d) dilution rate; (e) content of unmelted TiC; (f) porosity

### 3.2 激光功率对熔覆层组织的影响

图 5 为保持扫描速度为 6 mm/s 不变,激光功率分别为 1600 W、1700 W、1800 W、1900 W、2000 W 时熔覆层顶部、中部、底部区域的微观组织图,可以看出,熔覆层各区域微观组织主要由析出 TiC 枝晶和基体枝晶组成。在不同的熔覆层位置,析出 TiC 的枝晶尺寸不同:在底部区域,析出 TiC 的枝晶尺寸最小;在中部区域,析出 TiC 的枝晶尺寸较大;在顶部区域,析出 TiC 的枝晶尺寸介于底部和中部区域之间。这一现象主要与熔池的存在时间和凝固速度有关。在激光熔覆过程中,底部区域直接与基板相连,由于金属基板导热较快,熔池中的热量被快速导出,熔覆层底部区域在很短时间内冷却并凝固,枝晶尺寸较小。在顶部区域,熔池与空气相接触,热量通过热辐射的方式散失,导致顶部区域凝固速度相对较快,枝晶尺寸相对较小。对于中部区域,其既不与基板接触,又不与空气接触,此区域凝固速度较慢,析出 TiC 有充足的生长时间,因此,枝晶尺寸较大。

此外,本文统计了熔覆层各区域析出 TiC 的含量,如图 6 所示。从图 5 和图 6 可以看出,随着激光功率的

增加,析出 TiC 的含量先升高后降低。这是激光熔覆过程中两方面原因的综合作用造成的,一方面,随着激光功率的增加,热输入增加,促进了熔覆材料中添加的 TiC 颗粒熔化,导致析出的 TiC 含量增加,另一方面,随着激光功率的增加,熔覆层的面积和稀释率增加,当析出的 TiC 均匀分布在熔覆层中时,其含量降低。这两方面综合作用导致了熔覆层中析出的 TiC 含量随激光功率增加呈现先升高后降低的趋势,当激光功率为 1800 W 时,熔覆层的顶部、中部、底部区域析出 TiC 的含量最高。同时,不同区域析出的 TiC 含量也有差异,从图 6 可以看出,相同激光功率下,顶部区域中析出 TiC 的含量最高,底部区域析出 TiC 的含量最低。这是因为在激光熔覆过程中,顶部区域和中部区域首先被熔化,且凝固时间相对较长,添加的 TiC 颗粒有足够的时间发生熔化和析出,而底部区域最后被激光熔化,且凝固时间相对较短,被熔化的 TiC 含量较低。另外,相对于 Fe 基合金来说,TiC 的密度较小,在熔池凝固过程中,热浮力流的作用使得析出的 TiC 向上流动<sup>[26]</sup>,因此熔覆层顶部区域析出的 TiC 含量较高。

为了定量分析析出 TiC 枝晶和基体枝晶的尺寸,

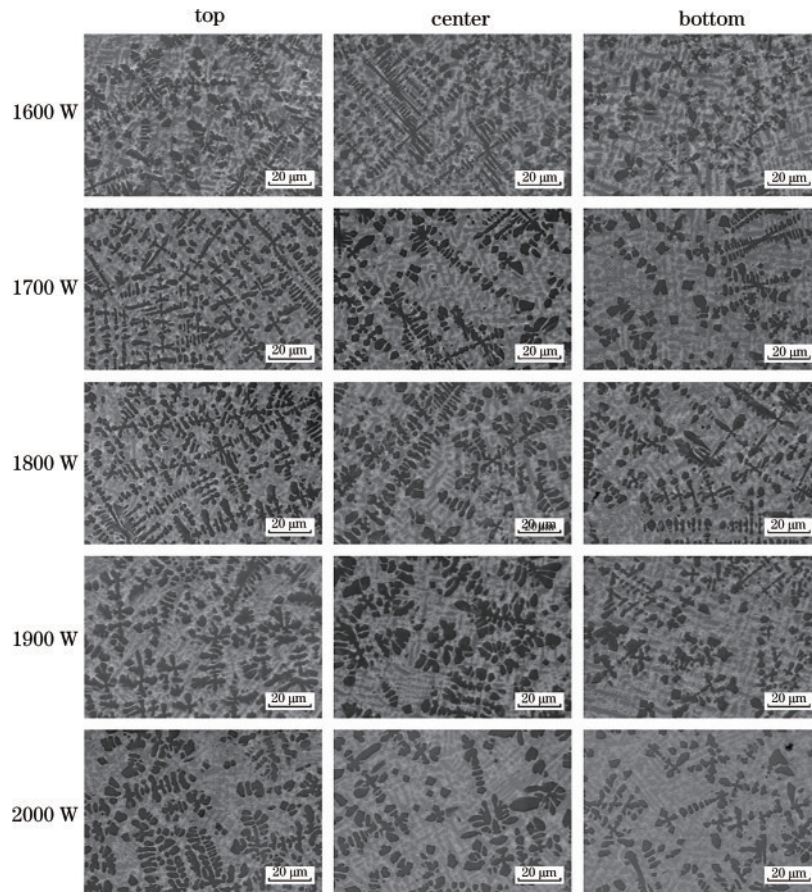


图 5 不同激光功率下熔覆层顶部、中部、底部区域显微组织的 SEM 图

Fig. 5 SEM images of the microstructure of the top, center, and bottom areas of the cladding layer at different laser powers

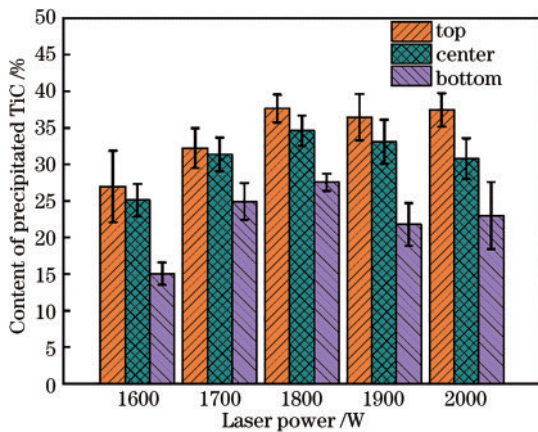


图 6 激光功率对熔覆层中析出的 TiC 含量的影响

Fig. 6 Effect of laser power on the content of precipitated TiC in the cladding layer

对图 5 中凝固组织的二次枝晶臂间距进行了测量和统计,得到了激光功率对析出 TiC、基体的二次枝晶臂间距的影响,如图 7 所示。从图 7(a)可以看出,随着激光功率的增加,析出 TiC 的二次枝晶臂间距逐渐增加。这是因为激光功率增加,导致热输入量增加,熔池存在时间增加,降低了熔池的凝固速度,从而使得析出 TiC 生长充分。由图 7(b)可知,随着激光功率的增加,基体的二次枝晶臂间距先降低后增加。这主要是两方面

原因综合作用所造成的,一方面,随着激光功率的增加,熔池存在时间增加,凝固时间较长,枝晶有足够时间生长,二次枝晶臂间距因此而增加,另一方面,析出的 TiC 枝晶嵌入到基体枝晶间,对基体枝晶的生长具有阻碍作用。由图 6 可知,随着激光功率的增加,析出 TiC 的含量先升高后降低,换句话说,其对基体枝晶生长的阻碍作用先增强后减弱。在这两方面综合作用下,基体的二次枝晶臂间距呈现出先降低后增加的趋势。

### 3.3 熔覆层微观组织的综合表征

根据以上对熔覆层组织特征的描述可知,组织特征之间存在此消彼长的趋势,为了综合评价熔覆层的组织特征,得到理想的熔覆层微观组织,在此引入灰关联分析法。灰关联分析法是邓聚龙教授在 20 世纪 80 年代提出并发展起来的一种用于多目标系统综合评价的方法<sup>[27]</sup>。

为了减少熔覆层缺陷,降低熔覆层的裂纹敏感性,本研究制备的 TiC 颗粒增强 Fe 基复合涂层应尽可能降低气孔率( $P_o$ )和未熔 TiC 颗粒含量( $U_b$ )。同时,为了保证熔覆层的性能,应尽可能提高析出 TiC 的含量( $P_b$ )并且减小析出 TiC 的二次枝晶臂间距( $S_b$ )和基体的二次枝晶臂间距( $S_m$ ),从而增强弥散强化和细晶强化的作用。根据以上目标,可利用灰关联分析法将



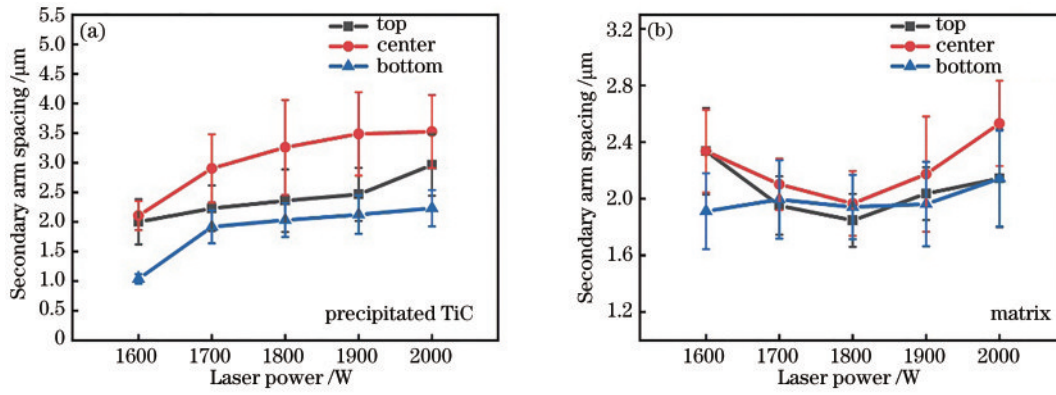


图 7 激光功率对熔覆层组织二次枝晶臂间距的影响。(a)析出 TiC;(b)基体

Fig. 7 Effect of laser power on the secondary dendrite arm spacing of the cladding layer microstructure. (a) Precipitated TiC; (b) matrix

5个组织特征转化为单一灰关联度(GRG)用于综合评价熔覆层的组织特征。灰关联分析法共有三个步骤,分别为归一化处理、灰关联系数计算、灰关联度计算<sup>[27]</sup>。

首先,为了消除量纲并转化为整体可比的数据,需根据不同目标按下式进行归一化处理。本研究中用到的归一化目标分别为望大(LTB)和望小(STB),望大表示越大越好,望小表示越小越好。

$$X_i(k) = \begin{cases} \frac{Y_i(k) - \min Y_i(k)}{\max Y_i(k) - \min Y_i(k)} & , \text{LTB} \\ \frac{\max Y_i(k) - Y_i(k)}{\max Y_i(k) - \min Y_i(k)} & , \text{STB} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $X_i(k)$ 为第  $k$  个组织特征的第  $i$  组试验数据的归一化值; $Y_i(k)$ 为第  $k$  个组织特征的第  $i$  组试验数据值; $\max Y_i(k)$ 和  $\min Y_i(k)$ 分别代表第  $k$  个组织特征的最大值和最小值。

其次,为了得到归一化数据与理想值之间的关系,需按下式分别计算不同组织特征的灰关联系数。需要说明的是,此时各组织特征数据已经按照目标进行了归一化处理,因此,组织特征的灰关联系数值越高,则

代表该组织特征越符合期望。

$$G_{\text{GRC}_i}(k) = \frac{\min_i |x_i^0 - x_i(k)| + \xi \max_i |x_i^0 - x_i(k)|}{|x_i^0 - x_i(k)| + \xi \max_i |x_i^0 - x_i(k)|} \quad (2)$$

式中: $G_{\text{GRC}_i}(k)$ 为第  $k$  个组织特征的第  $i$  组试验的灰关联系数值; $x_i^0$ 为试验的理想值,在本研究中  $x_i^0 = 1$ ; $\xi$ 为分辨系数,其取值范围为  $0 \sim 1$ ,本研究中  $\xi = 0.5$ 。

最后,按照下式计算灰关联度,用于综合评价熔覆层的组织特征,灰关联度越大,表明熔覆层的组织特征越符合期望。

$$G_{\text{GRG}_i} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n G_{\text{GRC}_i}(k) \quad (3)$$

式中: $G_{\text{GRG}_i}$ 是指第  $i$  组试验的灰关联度值; $G_{\text{GRC}_i}(k)$ 为第  $k$  个组织特征的第  $i$  组试验的灰关联系数的值; $n$ 为响应量的数量,本研究中, $n = 5$ 。

图 8(a)为不同激光功率下,熔覆层气孔率( $P_o$ )、未熔 TiC 颗粒含量( $U_h$ )、析出 TiC 含量( $P_h$ )、基体二次枝晶臂间距( $S_m$ )、析出 TiC 二次枝晶臂间距( $S_h$ )灰关联系数的雷达图,图中灰关联系数值越大,代表组织特征越符合期望。当激光功率为 1800 W 时,熔覆层各个组织特征发展均衡且较为理想。

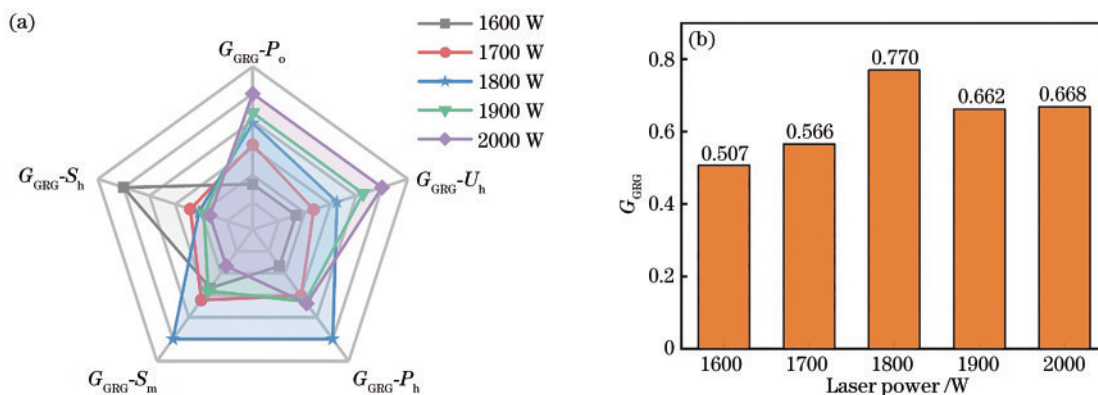


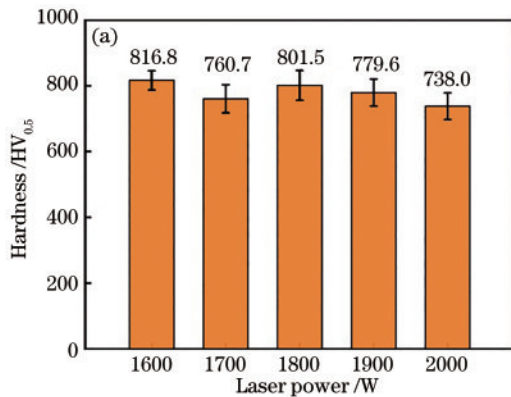
图 8 激光功率对熔覆层各组织特征的影响。(a)各组织特征灰关联系数雷达图;(b)灰关联度的变化

Fig. 8 Effect of laser power on the microstructure characteristics of the cladding layer. (a) Radar chart of the grey relational coefficient of each microstructure characteristics; (b) variation of the grey relational grade

图 8(b) 为不同激光功率下, 熔覆层组织特征的灰关联度的值, 可以看出, 随着激光功率的增加, 灰关联度先增加后降低再增加。当激光功率小于 1800 W 时, 从图 8(a) 可以看出, 熔覆层的组织特征存在析出 TiC 二次枝晶臂间距最小但其他特征较差 (1600 W 时), 或者综合特征均衡但都不理想 (1700 W 时) 的情况。当激光功率为 1800 W 时, 灰关联度达到最高, 结合图 8(a) 可以看出, 熔覆层各个组织特征发展较为均衡, 且都趋向于理想状态。这说明在本研究的工艺区间内, 激光功率为 1800 W 时所制备熔覆层的综合组织特征最为理想。然而, 当激光功率大于 1800 W 时, 结合图 8(a) 可以看出, 熔覆层的组织特征趋向于另一个极端的情况, 即气孔率、未熔硬质相含量趋于最理想的状态, 但由于热输入的增加, 熔池存在时间增加且稀释率增加, 熔覆层发生晶粒粗化且析出的 TiC 含量降低, 细晶强化、弥散强化作用降低, 将会损害熔覆层的性能。综上所述, 从熔覆层的组织特征来看, 激光熔覆制备 TiC 增强 Fe 基复合涂层的最优激光功率为 1800 W。

### 3.4 激光功率对熔覆层硬度的影响

图 9(a) 为激光功率对熔覆层平均硬度影响的柱

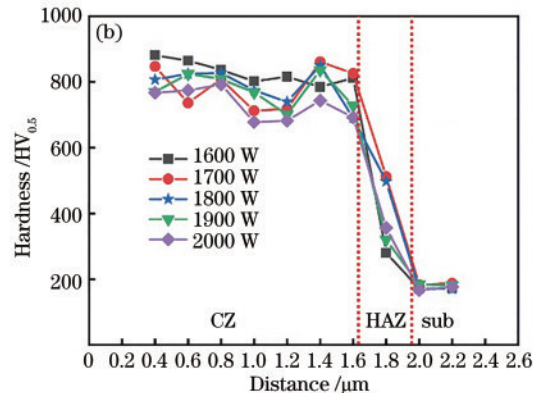


状图, 可以看出, 随着激光功率的增加, 熔覆层的平均硬度先降低, 后升高, 再降低。当激光功率为 1600 W 时, 熔覆层的硬度最高, 其次为 1800 W 时。在本研究中, 未熔的 TiC 颗粒以及析出的 TiC 枝晶能够增强熔覆层的性能, 随着激光功率的增加, 未熔的 TiC 颗粒含量降低, 析出的 TiC 枝晶含量先升高后降低且在激光功率 1800 W 时达到最大。此外, 随着激光功率的增加, 熔覆层的稀释率增加, 这会导致熔覆层硬度降低。晶粒的细化对熔覆层性能的提高有积极作用, 由图 7 可知, 析出 TiC 的二次枝晶臂间距随激光功率的增加逐渐增加, 基体的二次枝晶臂间距随激光功率的增加先降低后增加且在 1800 W 时达到最小。综合以上分析可知: 在 1600 W 时所制备熔覆层硬度最高的原因在于未熔 TiC 颗粒含量较多, 增强作用明显; 在 1800 W 时所制备熔覆层硬度相对较高的原因在于析出 TiC 含量最大, 基体二次枝晶臂间距最小, 熔覆层内缺陷相对较少, 这就意味着析出 TiC 的弥散强化、基体晶粒的细晶强化作用较大, 缺陷对性能的伤害较小。以上三方面的共同作用使得激光功率为 1800 W 时制备的熔覆层硬度略低于 1600 W。

图 9 激光功率对熔覆层硬度的影响。(a) 平均硬度; (b) 硬度梯度

Fig. 9 Effect of laser power on the hardness of the cladding layer. (a) Average hardness; (b) gradient for hardness

图 9(b) 为不同激光功率下熔覆层硬度的梯度曲线。可以看出, 从熔覆层的顶部到熔合线处, 熔覆层的硬度呈下降趋势, 而在熔合线附近存在硬度突然上升的区域, 这主要是因为, 此处熔池存在时间短、凝固速



度快, 保留了较多的未熔 TiC 颗粒, 因此硬度得到显著的提高。

度快, 保留了较多的未熔 TiC 颗粒, 因此硬度得到显著的提高。

### 3.5 TiC 颗粒的溶解机制

基于本研究中的金相照片和其他学者的相关研究, 推测了 TiC 颗粒的两种溶解机制。

如图 10(a) 所示, A1~A5 表示 TiC 颗粒溶解过程的示意图, 每个过程中均存在未熔的 TiC 颗粒作为核心, 因此可推断 TiC 颗粒的溶解由外向内进行<sup>[16]</sup>。当激光熔覆过程开始后, TiC 颗粒在边缘处开始熔化, 特别是不规则 TiC 颗粒的尖角处首先发生熔化, 导致 TiC 颗粒边缘趋于圆滑, 如 A2 阶段。在激光熔覆过程中, 大尺寸 TiC 颗粒熔解析出的 TiC 以未熔 TiC 颗粒作为形核点进行异质形核并逐渐生长, 如 A3 阶段。随着 TiC 颗粒的进一步熔化, 析出的 Ti、C 增加, 进一步促进析出 TiC 的生长, 如 A4 阶段。最终, TiC 颗粒被



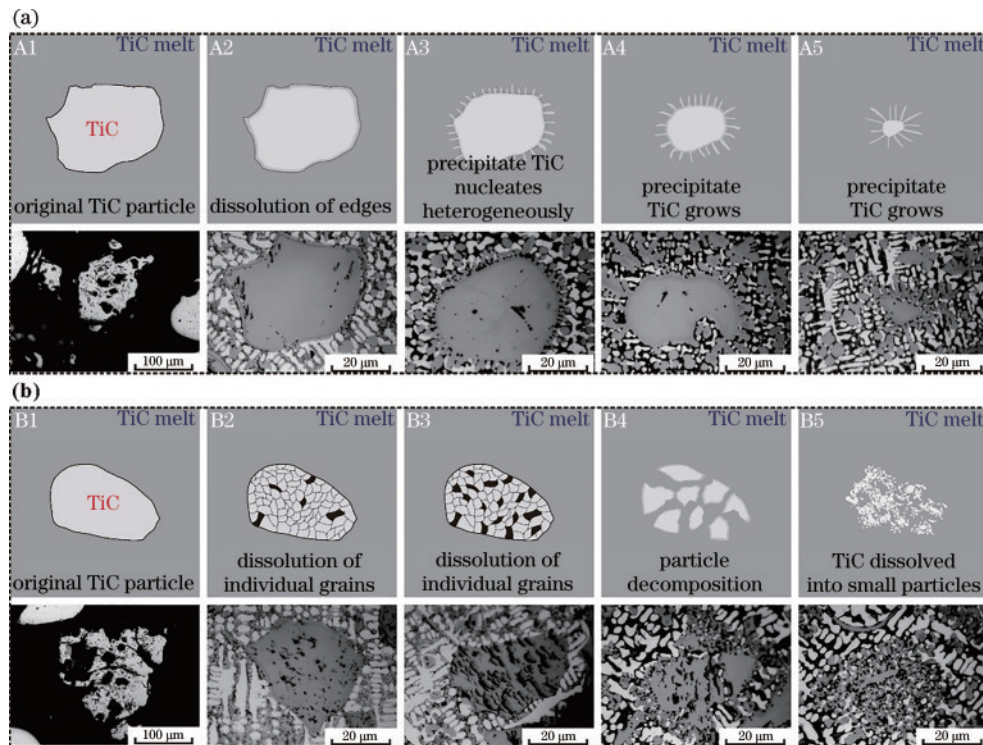


图 10 TiC 颗粒的两种熔解机制示意图。(a)由外向内;(b)整体分解

Fig. 10 Schematic diagram of the two dissolution mechanisms of TiC particles. (a) From the outside to the inside; (b) integral decomposition

完全熔解。

如图 10(b)所示, B1~B5 表示了 TiC 颗粒的另一种熔解过程, 此时每个阶段并不以未熔的 TiC 颗粒为核心, 而是呈现出整体分解的特点。TiC 颗粒为多晶材料, 当激光作用于 TiC 颗粒时, 其表面出现了类似“点蚀”迹象, 如 B2 阶段, 由文献[23]可知, 这是激光熔覆加热阶段 TiC 颗粒内单个晶粒的熔解所造成的。随着激光熔覆的进行, TiC 颗粒中越来越多的单个晶粒发生熔解并相互连接, 如 B3 阶段, 这导致大尺寸的 TiC 颗粒分解为多个小尺寸的 TiC 颗粒, 如 B4 阶段, 随后, 这些小尺寸的 TiC 颗粒分别完成熔化, 使得 TiC 颗粒被完全熔解。

根据试验结果可以发现, 这两种 TiC 颗粒的熔解机制并非单独存在。在激光熔覆过程中, 这两种机制同时进行, 最终导致大尺寸 TiC 颗粒的完全熔解。

## 4 结 论

本文采用激光熔覆技术在 304 不锈钢表面成功制备了 TiC 颗粒增强 Fe 基复合涂层, 研究了激光功率对熔覆层几何特征、组织特征及硬度的影响, 所得结论如下:

1) 随着激光功率的增加, 熔池对流增强, 熔覆层高度降低, 宽度、深度、稀释率增加, 气孔率、未熔 TiC 颗粒含量降低, 析出 TiC 的含量先增加后降低且在 1800 W 时达到最高, 析出 TiC 的二次枝晶臂间距逐渐增加, 基体的二次枝晶臂间距先降低后增加且在 1800 W 时达

到最小。

2) 通过灰关联分析, 将熔覆层的 5 个微观组织特征按照所需目标转化为灰关联度作为综合指标, 在激光功率为 1800 W 时, 熔覆层各组织特征均衡发展, 且熔覆层组织特征的灰关联度达到最高。

3) 随着激光功率的增加, 熔覆层的硬度先降低后增加再降低。当激光功率为 1600 W 时, 熔覆层的硬度达到试验范围的最大值, 但此时熔覆层的表面出现了裂纹。当激光功率为 1800 W 时, 相较于 1600 W 时硬度虽稍有降低, 但具有符合期望的微观组织特征且不存在表面缺陷, 其平均硬度为 801.5 HV<sub>0.5</sub>, 达到基体硬度的 4.5 倍左右。根据组织特征和硬度判断, 激光功率 1800 W 为本研究参数范围内最优的工艺参数。

4) 在本研究中, 推测 TiC 颗粒共有两种熔解机制。一方面, TiC 颗粒的熔化由外向内进行, 伴随着析出 TiC 的异质形核, 另一方面, TiC 颗粒整体分解, 具有类似“点蚀”特征, 其主要机理为 TiC 内部单个晶粒的熔解。在激光熔覆过程中, 以上两种机制共同进行导致了 TiC 颗粒的完全熔解。

## 参 考 文 献

- [1] Siddiqui A A, Dubey A K. Recent trends in laser cladding and surface alloying[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 134: 106619.
- [2] Tan C L, Weng F, Sui S, et al. Progress and perspectives in laser additive manufacturing of key



- aeroengine materials[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021, 170: 103804.
- [3] Mahmoud E R I. Characterizations of 304 stainless steel laser clad with titanium carbide particles[J]. Advances in Production Engineering & Management, 2015, 10(3): 115-124.
- [4] Yang J J, Wang Y, Li F Z, et al. Weldability, microstructure and mechanical properties of laser-welded selective laser melted 304 stainless steel joints[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(9): 1817-1824.
- [5] 李大艳. 304 不锈钢表面激光熔覆高熵合金涂层研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018: 11-12.  
Li D Y. Research of laser cladding high-entropy alloy coatings on 304 stainless steel surface[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018: 11-12.
- [6] 王港, 刘秀波, 刘一帆, 等. 304 不锈钢激光熔覆 Co-Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 自润滑复合涂层微观组织与摩擦学性能[J]. 材料工程, 2021, 49(11): 105-115.  
Wang G, Liu X B, Liu Y F, et al. Microstructure and tribological properties of Co-Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> self-lubricating composite coatings on 304 stainless steel by laser cladding[J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(11): 105-115.
- [7] 方振兴, 祁文军, 李志勤. 304 不锈钢激光熔覆搭接率对 CoCrW 涂层组织与耐磨及耐腐蚀性能的影响[J]. 材料导报, 2021, 35(12): 12123-12129.  
Fang Z X, Qi W J, Li Z Q. Effect of laser cladding lap ratio of 304 stainless steel on microstructure, wear resistance and corrosion resistance of CoCrW coating[J]. Materials Reports, 2021, 35(12): 12123-12129.
- [8] 杨丹, 宁玉恒, 赵宇光, 等. 工艺参数对 304 不锈钢表面激光熔覆 Ni 基金属涂层的组织、耐磨性及耐腐蚀性的影响[J]. 材料导报, 2017, 31(24): 133-140.  
Yang D, Ning Y H, Zhao Y G, et al. Influence of processing parameter on microstructure, wear-resistance and corrosion-resistance of laser cladding Ni-based alloy on the surface of 304 stainless steel[J]. Materials Review, 2017, 31(24): 133-140.
- [9] 易湘斌, 刘多霞, 梁泽芬, 等. 不锈钢激光熔覆 Fe60 合金层的微观组织和性能研究[J]. 热处理, 2017, 32(1): 25-29.  
Yi X B, Liu D X, Liang Z F, et al. Microstructure and performance of laser-clad Fe60 alloy layer on stainless steel[J]. Heat Treatment, 2017, 32(1): 25-29.
- [10] 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.
- [11] 李洪玉, 魏连峰, 王泽明, 等. 激光熔覆铁基涂层的热疲劳性能[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0714003.  
Li H Y, Wei L F, Wang Z M, et al. Thermal fatigue properties of laser cladding Fe-based coating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 0714003.
- [12] 曹俊, 卢海飞, 鲁金忠, 等. WC 对激光熔覆热作模具的组织 and 磨损性能的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0702001.  
Cao J, Lu H F, Lu J Z, et al. Effects of tungsten carbide particles on microstructure and wear resistance of hot-working die prepared via laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0702001.
- [13] 段晓溪, 高士友, 顾勇飞, 等. 激光熔覆 316L+SiC 的强化机制和摩擦磨损性能研究[J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0103004.  
Duan X X, Gao S Y, Gu Y F, et al. Study on reinforcement mechanism and frictional wear properties of 316L-SiC mixed layer deposited by laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 0103004.
- [14] 周建忠, 何文渊, 徐家乐, 等. 激光熔覆 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe901 复合涂层的强化机制及耐磨性[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0514001.  
Zhou J Z, He W Y, Xu J L, et al. Strengthening mechanism and wear resistance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe901 composite coating prepared by laser cladding[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0514001.
- [15] Emamian A, Corbin S F, Khajepour A. Tribology characteristics of *in-situ* laser deposition of Fe-TiC[J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206(22): 4495-4501.
- [16] 靳鸣, 贺定勇, 王曾洁, 等. 激光熔覆 2205 双相不锈钢/TiC 复合涂层的显微组织与性能[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 111403.  
Jin M, He D Y, Wang Z J, et al. Microstructure and properties of laser clad 2205 dual-phase stainless steel/TiC composite coatings[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 111403.
- [17] Zhang Z H, Wang X, Zhang Q Q, et al. Fabrication of Fe-based composite coatings reinforced by TiC particles and its microstructure and wear resistance of 40Cr gear steel by low energy pulsed laser cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 119: 105622.
- [18] 周丹, 郭计山, 熊大辉, 等. TiC 含量对激光熔覆铁基涂层特性的影响[J]. 应用激光, 2021, 41(6): 1189-1195.  
Zhou D, Guo J S, Xiong D H, et al. Effect of TiC content on the properties of Fe based coating by laser cladding[J]. Applied Laser, 2021, 41(6): 1189-1195.
- [19] Wang Q T, Zeng X B, Chen C R, et al. An integrated method for multi-objective optimization of multi-pass Fe50/TiC laser cladding on AISI 1045 steel based on grey relational analysis and principal component analysis[J]. Coatings, 2020, 10(2): 151.
- [20] Emamian A, Corbin S F, Khajepour A. Effect of laser cladding process parameters on clad quality and *in situ* formed microstructure of Fe-TiC composite coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 205(7): 2007-2015.
- [21] Khalili A, Mojtahedi M, Qaderi A, et al. Effect of pulse laser parameters on the microstructure of the *in situ* Fe-TiC hard layer: simulation and experiment[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 135: 106693.
- [22] Emamian A, Corbin S F, Khajepour A. The influence of

- combined laser parameters on *in situ* formed TiC morphology during laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 206(1): 124-131.
- [23] Radhakrishnan M, Hassan M M, Long B E, et al. Microstructures and properties of Ti/TiC composites fabricated by laser-directed energy deposition[J]. Additive Manufacturing, 2021, 46: 102198.
- [24] 陈滋鑫, 周后明, 徐采星. 激光熔覆裂纹研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0700006.  
Chen Z X, Zhou H M, Xu C X. Cladding crack in laser cladding: a review[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 0700006.
- [25] 王鑫林. 三元叶片特征结构的激光直接制造工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019: 40-41.  
Wang X L. Study on laser material deposition process of 3D-flow blade feature structures[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019: 40-41.
- [26] Duan S Y, Zhan X H, Wu M Y, et al. Analysis of elements non-uniform distribution of FeCoCrNi high-entropy alloy coatings on Ti-6Al-4V surface by laser cladding[J]. Metals and Materials International, 2021, 27(3): 467-480.
- [27] Šibalija T V, Majstorović V D. Advanced multiresponse process optimisation[M]. Cham: Springer, 2016.