

激光熔覆 Ni/WC 涂层温度场及形貌模拟

叶 寒, 朱小刚, 余 廷

(南昌大学机电工程学院, 江西 南昌 330031)

摘 要:根据同轴送粉激光熔覆的特点,利用有限元软件 ANSYS 模拟温度场的动态过程,采用生死单元法求得熔覆层形貌的三维模型,模拟中加入了熔覆粉末的温升、激光的衰减、相变潜热以及温度对材料热物理性能的影响等因素的影响作用,并且对温度场的结果进行了分析和试验验证。结果表明,熔池前方温度梯度比后方大,熔池最高温度在短时间之后会基本保持稳定。在高锰钢表面采用 4000 W 多模光纤激光器熔覆镍包 WC 复合粉末,涂层组织主要为细化树枝晶,通过对熔覆层横截面形貌、组织形貌、温度场分布的观察分析,验证了模拟结果的准确性,可作为制备涂层的工艺的理论参考。

关键词:激光熔覆;熔覆层形貌;温度场;有限元法

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.04.003

Simulation of temperature field and morphology of laser cladding Ni/WC coating

YE Han, ZHU Xiao-gang, YU Ting

(College of mechanical and electrical engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: According to the characteristics of coaxial powder laser cladding, the dynamic process of temperature field was simulated by using the finite element software ANSYS, and three-dimensional model of cladding morphology was obtained by life-death method. The influence factors such as the attenuation of laser energy, the temperature rise of powder particles, latent heat of phase change and temperature on thermal physical properties were analyzed in the model, and the results of the temperature field were analyzed and verified. The results show that the temperature gradient in front of the molten pool is larger than that of the back molten pool, and the maximum temperature of the molten pool will remain stable after a short time. Ni-based WC composite powders were deposited on the high manganese steel surface using 4000 W multimode fiber laser. The microstructure of Ni60A coating is mainly refined dendrite. Through the observation and analysis of the cross-section morphology, microstructure and temperature distribution of the cladding layer, the accuracy of the simulation results is verified. It provides a theoretical reference for the preparation process of coating.

Key words: laser cladding; cladding morphology; temperature field; finite element method

1 引 言

高锰钢在强烈的冲击下表现出优异的耐磨性,

由此而被常用于矿山、冶金、铁路、电力等行业,现阶段我国用于矿山行业的破碎机的衬板所用材料一般

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 51565035);江西省自然科学基金项目(No. 20151bab206045)资助。

作者简介:叶 寒(1976-),男,博士,副教授,研究领域为先进制造技术。E-mail: nuaayehan@163.com

收稿日期:2017-07-24; **修订日期:**2017-09-06

为高锰钢。高锰钢具有很高的冲击韧度,但在没有冲击载荷作用下的硬度较低^[1]。高锰钢仅在强的冲击下才出现加工硬化效果,而对于冲击载荷不大的工况而言其耐磨性无法明显提高。并且高锰钢在加工硬化后,其屈服极限并不是很大,在超过此极限的外力作用下,工件有时会产生开裂,导致使用寿命达不到预期结果^[2-3]。

如何提高高锰钢的抗磨性能的问题受到广大材料工作者的关注。作为一种应用前景十分广阔的激光熔覆表面强化技术是提高其耐磨性的有效手段。在激光熔覆过程中,温度场分布对熔覆层质量产生重要影响,但温度场的测量又由于激光熔覆中材料的升温 and 冷却速度很大的特点而变得很难,因此,如何通过数值模拟的手段获得温度场的分布的方法越来越受到学者们的关注^[4]。本文利用 ANSYS 软件对 ZGMn13Cr2 表面激光熔覆镍包 WC 复合涂层瞬态温度场进行了动态的模拟,做了与之对应的试验,并且对熔覆层横截面形貌、组织形貌、温度场分布进行观察及分析,试图验证模拟结果的准确性,为优化涂层制备工艺提供理论参考。

2 激光熔覆温度场的模拟

2.1 基本假设

为了计算方便,做出如下假设:

(1) 激光束作用于基体表面的能量分布为基模高斯分布^[5]:

$$I(s) = \frac{2P}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{2s^2}{r^2}\right) \quad (1)$$

式中, P 为激光功率; r 为基模高斯光束的半径; s 为距光斑中心的距离。激光的加热作用以在基体表面上施加热流密度来完成^[6]。由于粉末对激光有衰减的作用和基材对激光的吸收的大小,表面热源表示为:

$$q(r) = \frac{A_1(1-\eta)}{\pi r^2} \int_0^r I(s) \cdot 2\pi s \cdot ds \quad (2)$$

式中, η 为熔覆粉末对激光的衰减率,激光能量衰减率 η 取 0.15^[7]; A_1 为基材的激光吸收率, ZGMn13Cr2 的激光吸收率 A_1 取 0.35^[9]。

(2) 由于随温度变化的对流系数和辐射的存在,使得问题具有非常大的非线性,所以,为了简化计算,模型中通过一个综合表面散热系数 h_c 来综合考虑辐射和对流换热现象^[9],即:

$$h_c = 2.41 \times 10^{-3} \varepsilon T^{1.61} \quad (3)$$

式中, T , ε 分别为与空气接触的表面温度和发射率。

(3) 材料熔化、凝固速度很快,熔池尺寸很小,不考虑熔池的流动作用及粉末颗粒和熔池的对流换热。忽略材料的汽化,用焓值法来考虑材料的相变产生的潜热^[6]。

2.2 数学模型

在基材表面建 x, y 坐标, z 方向为待强化表面的外法线方向,热传导方程为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v \quad (4)$$

式中, ρ , c , λ 分别为材料的密度、比热容和热导率; q_v 为内热源的强度; t 为时间。

2.3 模型及网格

温度场模拟的有限元模型如图 1 所示,其中,基体尺寸为 14 mm × 7 mm × 4 mm,熔覆层尺寸为 10 mm × 3 mm × 1 mm。采用 SOLID70 单元对模型进行网格划分, x 轴为激光扫描方向、 y 轴为熔覆层宽度方向,这两个方向网格尺寸设为 0.1 mm, z 轴为待强化表面的外法线方向,其网格尺寸设为 0.01 mm。为了提升运算速度,减少计算时间和结果数据所占空间,基体远离熔覆层的网格逐渐变大。熔覆层的生长过程通过 ANSYS 中的生死单元技术实现,激光熔覆前,“杀死”所有熔覆层单元,随着熔覆过程的进行,“杀死”的单元再被选择性的“激活”。

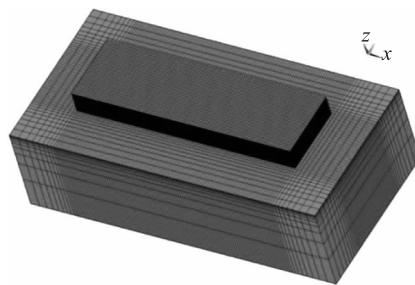


图1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

2.4 初始条件及边界条件

对于公式(4),为了得到唯一解,需给出确定的初始条件以及边界条件。对于基体材料的初始条件,其为基材的初始温度 T_0 , 取为 20 °C。对于熔覆材料,其初始条件为熔覆粉末到达熔池前由于吸收激光能量所达到的温度 T_a ^[10]。

$$T_a - T_0 = \frac{3h}{4\pi r_p \rho_p C_p V_p} \left(\pi r_p^2 A_2 q - 4\pi r_p^2 \varepsilon \sigma T^4 - 4\pi r_p^2 H \left(\frac{T}{2} \right) \right) \quad (5)$$

式中, r_p, ρ_p, C_p, V_p 分别为熔覆粉末的半径、密度、比热容、平均速度; h 为粉末到达熔池前移动的距离; σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数; A_2 为粉末对激光的吸收率; H 为粉末颗粒表面温度 $T/2$ 处的对流换热系数。熔覆粉末 Ni60A 对激光的吸收率 A_2 取 0.35^[11]。

本文中温度场模拟包含有如下两类边界条件:

一类为基体表面加载的热源即热流密度:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda \frac{\partial T}{\partial z} n_z = q(r) \quad (6)$$

式中, n_x, n_y, n_z 为材料边界外法线方向的余弦。

另一类为边界面与环境物质间的热互换,即:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda \frac{\partial T}{\partial z} n_z = h_c (T - T_0) \quad (7)$$

2.5 热物性参数的确定

本试验中,基体材料为 ZGMn13Cr2,熔覆材料为镍包 WC 复合粉末,由于激光熔覆产生很大的温度梯度,导致严重的材料非线性,这对计算结果有较大的影响,所以需给出随温度变化的热物性参数。一般高温下的材料热物性比较难获得,所以通过已知材料常低温下的热物性数值采取插值法获得高温下的热物性参数值。

2.6 计算方法

本文中瞬态温度场的模拟需把激光熔覆的过程离散化为多个载荷步,后一载荷步的初始条件基于前一载荷步计算的温度场。各载荷步需要完成两个任务:(1)计算温度场分布,获得熔池半径。(2)通过得到的熔池半径选择性的激活被“杀死”的单元,根据熔覆过程中的质量守恒定律得到:

$$\rho_p V_l = \xi V_s \Delta t \quad (8)$$

式中, V_l 为“杀死”的单元中被重新激活的单元体积; Δt 为时间步长; ξ 为熔覆粉末的利用率; V_s 为送粉速率。

通过大量的试验,单道熔覆层的上表面主要受表面张力控制,可用球冠状模拟熔覆层截面形状^[12],即:

$$V_l = \pi h_k^2 \left(R_k - \frac{h_k}{3} \right) \quad (9)$$

式中, h_k, R_k 分别为第 k 个载荷步中球冠的高度和

半径; h_k, R_k 与第 k 个载荷步中捕捉到的熔池半径 $R_{m,k}$ 有如下关系:

$$(R_k - h_k)^2 + R_{m,k}^2 = R_k^2 \quad (10)$$

通过式(8)、(9)、(10)便可确定熔覆层形状尺寸。

前一个载荷步完成后,通过 APDL 中的循环语句来达到热源的移动的效果,再更新边界条件,后一步的起始条件是基于前一步计算的温度场,再完成上述的两个任务,如此循环至整个激光熔覆过程的结束。

3 模拟结果的试验验证

采用德国 IPG 公司的 YLS-4000 多模光纤激光器进行激光熔覆试验,试验基体为 ZGMr13Cr2,熔覆材料是 75% Ni60A + 25% 球形 WC 的复合粉末。以同轴送粉形式进行送粉,用氩气对熔覆层进行保护。本试验内容为不同扫描速度下的激光熔覆的试验,试验的工艺参数见表 1。

表 1 激光熔覆工艺参数

Tab. 1 Process parameters of laser cladding

工艺参数	数值
激光功率 P/W	1000
光斑直径 D/mm	2
扫描速度 $V/(mm \cdot min^{-1})$	600, 650, 800, 900
送粉速率 $V_s/(g \cdot min^{-1})$	10.4
载气流速 $Q/(L \cdot min^{-1})$	15

试验完成后,将熔覆后的试样用线切割机沿熔宽方向切割,对横截面进行打磨抛光,用王水腐蚀 20 s。然后,利用蔡司 AxioCamMRc5 型金相显微镜观察熔覆层横截面形貌。

3.1 模拟结果

图 2 是激光扫描速度为 500 mm/min 时,不同时刻温度场分布及熔覆层形貌图。从图 2 中可以看出,温度场有拖尾现象,似彗星状,从图中可以看出温度场分布呈勺状,激光中心达到最高温度,而基体边缘区域仍为初始温度,熔池前方温度梯度比熔池后方大,这是由于激光扫描速度较快,热量无法及时传导,导致热量在熔池后方积累造成的。

图 3 为熔池的最高温度随时间的变化曲线,在 $t = 1.375$ s 时,熔池最高温度达到 1876 °C,之后由

于通过传导、表面辐射和对流等消耗的热量和激光产生的热量达到一个平衡,熔池最高温度在 0.375 s 之后就基本保持稳定了。

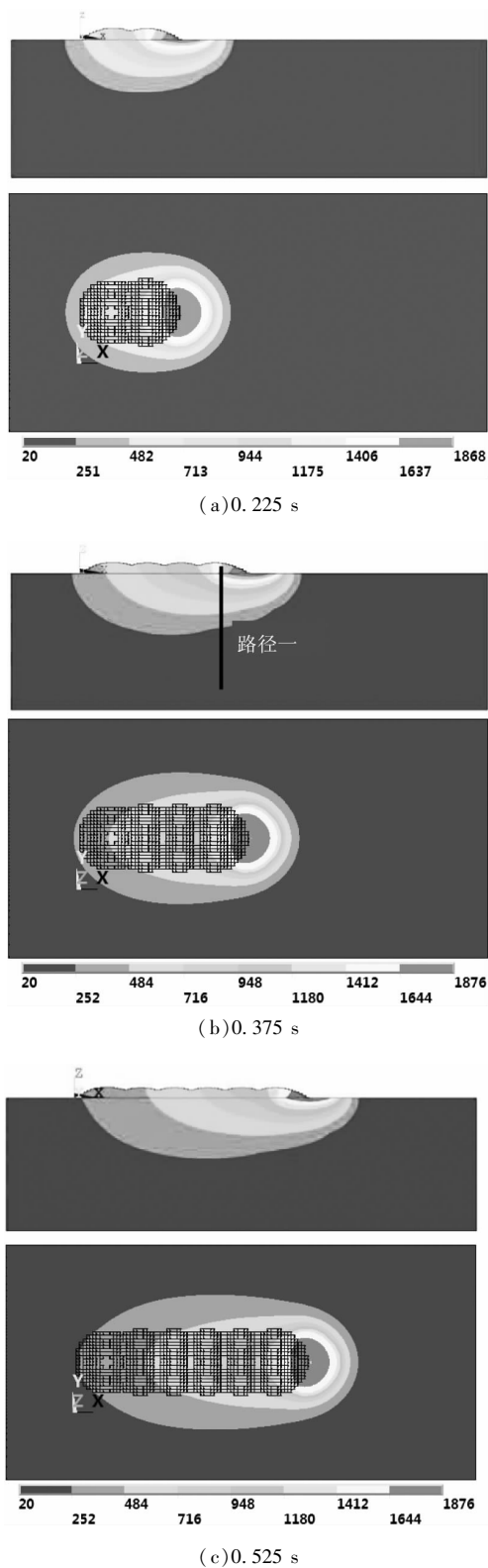


图 2 不同时刻温度场分布和熔覆层形貌

Fig. 2 Distribution of temperature field and morphology of cladding layer at different time

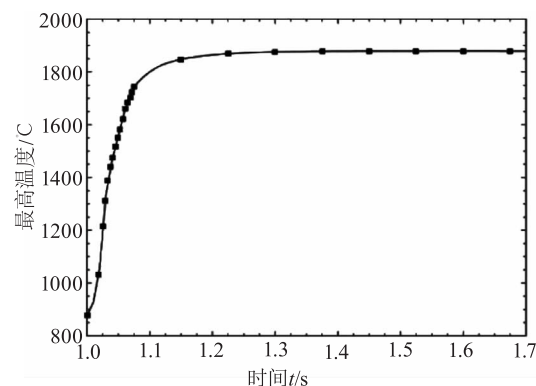


图 3 最高温度随时间变化

Fig. 3 The maximum temperature varies with time

图 4 为如图 2(b) 中所示路径 1 上的温度梯度随离基体表面距离的变化曲线,从图中可以得到最大温度梯度达到 $2 \times 10^6 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$,极大的温度梯度和凝固速度使得凝固界面推进速率大于溶质原子析出速率,溶质原子来不及扩散便被固相捕获,造成非平衡凝固,从而形成择优生长的细化树枝晶。图 5 为 AxioCamMRc5 型金相显微镜观察到的细小树枝晶。

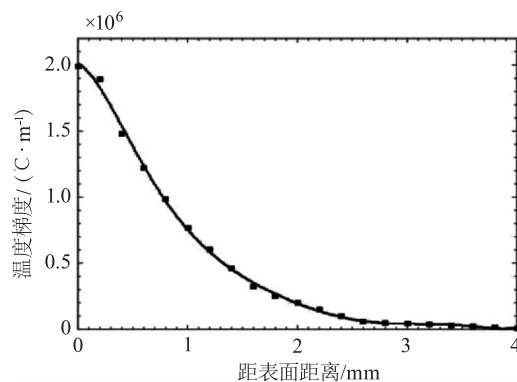


图 4 路径 1 上的温度梯度分布

Fig. 4 Temperature gradient distribution on path 1

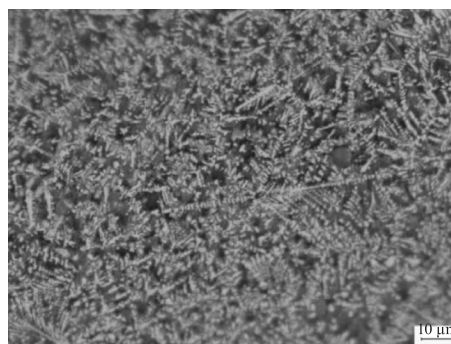


图 5 熔覆层组织

Fig. 5 Microstructure diagram of cladding layer

3.2 试验验证

图 6 为扫描速度分别为 600 mm/min、650 mm/min、

800 mm/min, 900 mm/min 下熔覆层横截面几何形貌模拟和试验结果的对比图, 左侧为模拟结果, 右侧为试验结果, 左侧模拟结果中的较浅色区域为熔覆层, 熔覆层是由每个激活单元组成的, 所以其外部轮廓线呈锯齿状, 锯齿大小会随划分网格时所设单元尺寸的减小而变得光滑。从图 6 可以定性的看出, 通过模拟得到的熔覆层的形状、尺寸大小和试验结果基本保持一致。

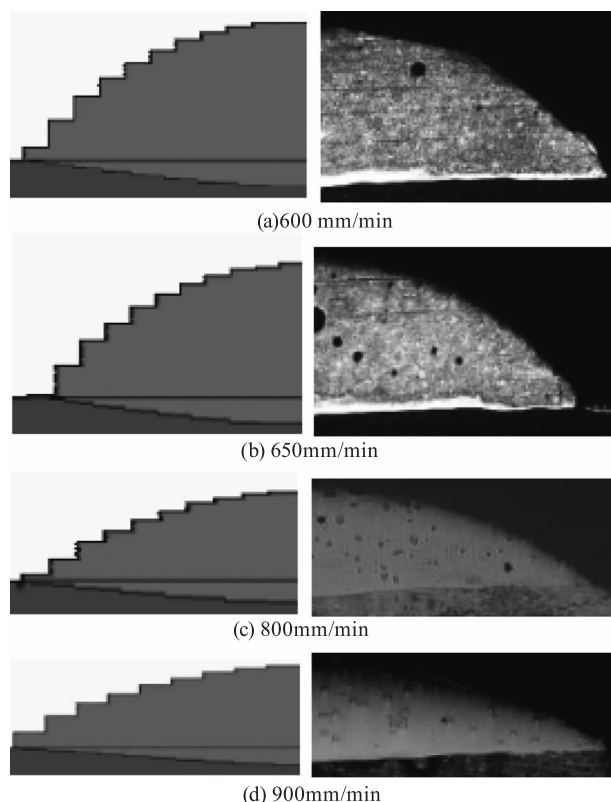


图 6 不同扫描速度下熔覆层横截面形貌模拟和试验结果对比

Fig. 6 Comparison of simulation and experimental results of cross section morphology of cladding layer at different scanning speeds

表 2 为模拟结果和试验结果的数值对比, 从熔覆层熔高、熔宽、熔深三个数据进行比较, 从表 2 中可以看出, 模拟结果与试验结果的误差较小, 所以本模型可以为激光熔覆工艺参数的优化提供理论依据。

表 2 模拟和试验结果对比

Tab. 2 Comparison of simulation and test results

扫描速度/ (mm · min ⁻¹)	熔宽/mm		熔高/mm		熔深/mm	
	试验	模拟	试验	模拟	试验	模拟
600	2.19	2.18	0.54	0.54	0.10	0.15
650	2.07	2.05	0.49	0.50	0.08	0.13
800	1.98	1.94	0.31	0.32	0.06	0.11
900	1.91	1.88	0.25	0.26	0.06	0.09

4 结 论

本文使用有限元软件 ANSYS 对温度场及熔覆层几何形貌进行了模拟, 并做了对应试验与之做对比。得出如下结论:

(1) 提供了 Mn13Cr2 表面激光熔覆镍包 WC 复合涂层瞬态温度场及熔覆层几何形貌的数值模拟方法。熔覆层温度场有拖尾现象, 激光中心达到最高温度, 而基体边缘区域仍为初始温度, 熔池前方温度梯度比后方大, 熔池最高温度在短时间之后会基本保持稳定。

(2) 根据模拟及试验结果, 熔深方向上的极大的温度梯度和凝固速度使得凝固界面推进速率大于溶质原子析出速率, 溶质原子来不及扩散便被固相捕获, 造成非平衡凝固, 从而形成择优生长的细化树枝晶。

(3) 将模拟得到的熔覆层熔高、熔宽、熔深三个数据与试验数据做对比, 两者保持一致, 所以本模型可以为激光熔覆工艺参数的优化提供了理论依据。

参考文献:

- [1] LI Yongtang, FU Jianhua, LEI Bufang, et al. Research on manufacturing process for complex low-alloyed wear-resisting crusher liner[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(12): 72-77. (in Chinese)
李永堂, 付建华, 雷步芳, 等. 多元低合金耐磨钢破碎机衬板制造工艺研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(12): 72-77.
- [2] LIU Jungang, FENG Jing, CAI Xiaojuan, et al. Present situation and analysis of wear-resistant steel production[J]. Laigang Science & Technology, 2010, (2): 1-3. (in Chinese)
刘军刚, 冯璟, 蔡晓娟, 等. 耐磨钢生产现状与分析[J]. 莱钢科技, 2010, (2): 1-3.
- [3] CHEN Xijie. High manganese steel[M]. BeiJing: Machinery Industry Press, 1989. (in Chinese)
陈希杰. 高锰钢[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [4] YING Lixia, WANG Liqin, CHENG Guanci, et al. Simulation and calculation of 3D laser cladding temperature field of ceramic-metal composite coatings by finite element method[J]. Heat Treatment of Metals, 2004, (7): 24-28. (in Chinese)
应丽霞, 王黎钦, 陈观慈, 等. 3D 激光熔覆陶瓷-金属复合涂层温度场的有限元仿真与计算[J]. 金属热处理

- 理,2004,(7):24-28.
- [5] LI Junchang. Diffraction of laser and calculation on thermal acting [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- 李俊昌. 激光的衍射及热作用计算[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [6] ZHANG Y J. Numerical study of thermal history in laser aided direct metal deposition process [J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2012, 55 (8): 1431-1438.
- [7] JIN Shaowei, HE Xiuli, WU Yang, et al. Laser powder attenuation by powder flow in coaxial laser cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, (9): 73-78. (in Chinese)
- 靳绍巍, 何秀丽, 武扬, 等. 同轴送粉激光熔覆中粉末流对光束能量的衰减作用 [J]. 中国激光, 2011, (9): 73-78.
- [9] Alimardani M, Toyserkani E, Huissoon J P. A 3D dynamic numerical approach for temperature and thermal stress distributions in multilayer laser solid freeform fabrication process [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2007, 45 (12): 1115-1130.
- [10] YANG Xianqun. Predicting the quality of clad in laser cladding by powder and numerical simulation of cladding process [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
- 杨贤群. 送粉式激光熔覆质量预测与熔覆过程数值模拟 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [11] LIU Anmin, ZHANG Chonghao. Nickel based ceramic alloy powder dedicated to continuous wave fiber laser cladding [P]. CN103602948A, 2014-02-26. (in Chinese)
- 柳岸敏, 张翀昊. 专用于连续波光纤激光熔覆的镍基金属陶瓷合金粉末 [P]. CN103602948A, 2014-02-26.
- [12] Cheikh H E, Courant B, Branchu S, et al. Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2012, 50(3): 413-422.