DOI: 10.3901/JME.2021.07.253

激光同轴熔注球形 WC 增强颗粒的工艺参数研究*

王 梁^{1,2} 罗 建^{1,2} 胡 勇^{1,2} 夏洪超^{1,2} 姚建华^{1,2}

(1. 浙江工业大学激光先进制造研究院 杭州 310014;

2. 浙江工业大学高端激光制造装备省部共建协同创新中心 杭州 310014)

摘要: 采用同轴送粉方式作为粉末输送形式,以球形 WC 为熔注增强颗粒,探究激光熔注制备 WC 颗粒增强金属基复合材料涂层的工艺参数临界条件。通过建立运动过程中增强颗粒的速度模型与温升模型,分析喷射过程中增强颗粒温度与激光功率、颗粒尺寸以及颗粒初始速度之间的关系,进而获得激光同轴熔注 WC 过程中,确保颗粒保持固态的颗粒尺寸、激光功率和颗粒初始速度等工艺参数的临界条件。同时对不同直径的球形 WC 颗粒进行了同轴熔注试验验证。计算和试验结果表明:在扫描速度为 6 mm/s,送粉率为 10 g/min 的条件下,当激光功率密度为 119 W/mm² 时,为保证颗粒保持固态,颗粒的直径须大于 75 μm。如需要注入直径小于 75 μm 的 WC 颗粒,则必须降低激光功率密度至 95 W/mm² 以下。

关键词: 激光同轴熔注; 增强颗粒; 数值计算; 球形 WC

中图分类号: TG111; TN249

Study on Process Parameters of Coaxial Laser Melt Injection with Spherical WC Reinforcement Particles

WANG Liang^{1,2} LUO Jian^{1,2} HU Yong^{1,2} XIA Hongchao^{1,2} YAO Jianhua^{1,2}

(1. Institute of Laser Advanced Manufacturing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014;

2. Zhejiang Provincial Collaborative Innovation Center of High-end Laser Manufacturing Equipment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014)

Abstract: A movement model and a thermal model of the reinforcement particles are built to study the temperature of particles with different laser power, WC particle diameters and particle initial velocity in the processes of the coaxial laser melt injection. The critical conditions of WC particle diameters, laser power and particle initial velocity are studied to achieve coaxial laser melt injection preparation of the WC particle reinforced metal matrix composite coating, and the WC particle with different diameters have been chosen to inject into 316 stainless steel. The calculation and experimental results show that when scanning speed is 6 mm/s, powder feeding rate is 10 g/min, the laser power density is 119 W/mm², in order to ensure remaining the particles solid state, the particles diameter is proper to be larger than 75 μm under the current coaxial powder feeding nozzle and laser process parameters. To ensure injecting WC particles without melting, the particles diameter is proper to be less than 75 μm and the laser power density has to be reduced below 95 W/mm².

Key words: coaxial laser melt injection; reinforcement particles; numerical calculation; spherical WC

0 前言

激光熔注(Laser melt injection)技术是由美国海军试验室 AYERS^[1]等于 1980 年发明,该技术利用高功率密度的激光束在金属表面形成熔池,同时将

增强颗粒直接注入到熔池中,在熔池快速冷却过程中,注入颗粒被迅速“冻结”来不及熔化,从而形成颗粒增强的金属基复合材料^[2-5]。在传统的激光熔注试验中,一般不采用同轴送粉形式而采用侧向送粉形式,因为侧向熔注能够避免粉末颗粒在进入熔池之前受到激光直接照射^[6-9]。但是,侧向熔注方式存在着一些应用的局限性:如需要导热系数低的基体和较大的激光功率,以形成较长的熔池“拖尾”,

* 国家重点研发计划(52035014)和浙江省属高校基本科研业务费(RF-C2019003)资助项目。20200316 收到初稿,20201208 收到修改稿

使得颗粒能注入到熔池的“拖尾”处；由于须将颗粒准确地注入到熔池后方，工艺参数的调整难度较大^[10-12]，这使得颗粒注入的区域及时间都受到了限制。LIU 等^[13]为减少铸造 WC 与基体的反应，将铸造 WC 颗粒以相对于基体表面法线方向 35° 注入熔池，对激光熔注过程中铸造 WC 颗粒与基体的界面反应进行了试验研究。林守刚等^[14]在送粉角度约为 30° 且与各工艺参数严格匹配的条件下，将 ZrO_2 颗粒由熔池“拖尾”注入，研究了激光熔注过程中 ZrO_2 颗粒的组织演变规律。王涛等^[15]通过正交试验研究了工艺参数对熔注层成形质量的影响，发现送粉速率与热输入的匹配是制备熔注层的关键。如果在同轴送粉方式下能确保增强颗粒在飞行过程中保持固态或微熔状态，则采用激光同轴熔注可避免侧向熔注的上述问题。HANNES 等^[16]研究了激光熔注过程中工艺参数对 WC 颗粒含量的影响，发现在一定扫描速度情况下，WC 颗粒总会出现熔化现象。王涛^[17]等通过同步送粉激光熔注铸造 WC 颗粒对其摩擦磨损性能进行研究，发现 WC 颗粒边界出现 $1.3 \sim 1.7 \mu m$ 的反应层，边界周围呈放射状分布并有大量棒状组织。WANG 等^[18]研究了激光感应复合熔覆 Ni60/WC 涂层中 WC 颗粒的热损伤机制。PERESTORONIN 等^[19]对激光熔注不同尺寸 WC 颗粒附近的微观组织结构进行了研究。他们并没对颗粒熔化的本质进行深入研究，因此，有必要研究激光同轴熔注过程中，颗粒尺寸、激光功率和颗粒初始速度等对颗粒温度的影响。

本文在激光同轴熔注条件下，建立了 WC 颗粒在熔注过程中与激光相互作用的温升模型，用于判断颗粒的熔化状态。通过该模型的计算分析，揭示了颗粒直径、激光功率和颗粒初速度与颗粒温度之间变化的关系，进而获得激光同轴熔注的工艺参数临界条件。同时，通过 316 不锈钢基体上的球形 WC 颗粒同轴熔注试验，利用熔注层中的 WC 颗粒反应层厚度和周围基体组织，判断颗粒在注射飞行过程中的熔化情况。试验分析结果与计算结果一致，表明所建理论分析模型可以为激光同轴熔注技术的可行性及工艺参数的选择提供理论依据。

1 增强颗粒模型的建立

1.1 基本假设和理论模型

图 1 为颗粒在载气(氮气)中从同轴喷嘴射出的示意图。其中 h 为激光焦点到送粉嘴的距离； θ 为激光发散半角； α 为送粉嘴倾角。颗粒喷射距离的

区间为送粉嘴出口到基体之间的距离。激光束和粉束同轴，增强颗粒在载气的作用下沿着送粉嘴倾角方向喷出，在飞行过程中与激光相互作用吸收一部分激光能量而升温，大部分激光能量被基体吸收形成熔池，粉末汇聚点接近熔池的中心，最终以固态形式被熔池捕获形成熔注层。

图 1 激光同轴熔注示意图

由于颗粒在飞行过程中的温度变化与颗粒的速度相关，故在计算颗粒温度变化前，需要对颗粒在飞行过程中的速度进行计算。为计算颗粒在飞行过程中的速度变化规律，首先建立颗粒运动速度与颗粒直径、颗粒初速度之间的关系模型。此处对计算过程进行如下假设：① 增强颗粒始终在保护气体中运动且飞行过程中颗粒不发生碰撞；② 在短喷射距离内，载气的速度大小和方向不变^[20]。

颗粒从喷嘴中出来后一般认为呈高斯分布^[21]，大部分颗粒处于中央位置，因此选取中央位置的颗粒作为本文的研究对象。颗粒在飞行过程中的速度可以通过下列各式解出^[22]。

载气水平方向和竖直方向速度分量

$$\begin{cases} u_x = u_0 \cos \alpha \\ u_y = u_0 \sin \alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中， u_x 和 u_y 为载气初始速度 u_0 的水平和竖直方向的分量。

载气相对于颗粒流动的雷诺数为

$$Re = \frac{\rho_g d_p}{\eta_g} \sqrt{(u_x - v_x)^2 + (u_y - v_y)^2} \quad (2)$$

式中， Re 为雷诺数； η_g 为载气的运动黏度； ρ_g 为载气的密度； d_p 为颗粒直径， v_x 与 v_y 为颗粒速度 v 的水平和竖直方向的分量。

颗粒受到水平及竖直方向载气阻力作用的运动方程

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = \frac{18\eta_g(1+0.15Re^{0.687})(u_x - v_x)}{\rho_p d_p^2} \\ \frac{dv_y}{dt} = \frac{18\eta_g(1+0.15Re^{0.687})(u_y - v_y)}{\rho_p d_p^2} + g \end{cases} \quad (3)$$

式中, ρ_p 为颗粒密度; g 为重力加速度。

颗粒在飞行过程中的速度方程

$$v(t) = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (4)$$

为获得运动粒子在飞行过程中的温升模型, 需要简化复杂的加热过程, 提出以下假设: ① 保护气和环境温度的变化忽略不计; ② 假设颗粒在飞行中不发生熔化, 即不考虑粒子固液相变引起的能量变化; ③ 假设颗粒的比热容不随温度进行变化; ④ 颗粒在加热过程中, 其表面和内部温度整体升高, 且均匀分布。

综合考虑激光辐照、颗粒与保护气之间的传热、颗粒速度等因素, 颗粒在飞行过程中的温度 $T(t)$ 可以通过能量守恒公式(5)解出^[21]。

$$\begin{cases} \frac{dT}{dt} = \frac{6 \left[2 + 0.6 Re^{0.5} \left(\frac{\eta_g C_a}{k_a} \right)^{0.33} \right] (T_g - T_p)}{d_p^2 \rho_p C_p} + \\ \frac{3\beta P}{2\pi d_p \rho_p C_p [(h+y)\tan\theta]^2} \\ T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

式中, C_p 为颗粒比热容; C_a 为载气比热容; k_a 为载气的热传导系数; T_g 为气体温度; T_p 为颗粒温度; T_0 为颗粒初始温度; β 为颗粒表面热吸收率; P 为激光功率; y 为运动粒子纵向位置; h 为激光焦点到送粉嘴出口距离。

1.2 计算方法

在计算颗粒的速度与温度模型时, 假设颗粒为规则的球形碳化钨。由于采用半导体激光器, 激光束能量为均匀分布。采用多项式拟合雷诺数, 并用 Runge-Kutta 方法^[23]求解颗粒的速度、温度模型。分析颗粒随着喷射距离的增加, 颗粒直径和初速度对颗粒飞行速度的影响; 不同激光功率、颗粒尺寸和不同颗粒初速度对飞行过程中颗粒温度的变化。其中, 颗粒的初速度为送粉嘴出口的颗粒速度, 大小为 0.8 m/s, 载气流量为 62 L/min, 载气速度为 2 m/s, 焦点到送粉嘴的距离为 27 mm, 基体表面到送粉嘴出口的距离为 30 mm, 本文计算均基于此条件。其他参数如表 1 所示。

表 1 模型参数

参数	数值
重力加速度 $g/(m/s)$	9.8
初始温度 T_0/K	293
颗粒密度 $\rho_p/(kg/m^3)$	15.5×10^3
颗粒比热 $C_p/(J/(mol \cdot K))$	39.8
载气比热 $C_a/(J/(mol \cdot K))$	29.1
载气密度 $\rho_g/(kg/m^3)$	1.25
载气动力黏度 $\eta_g/(m^2/s)$	15.2×10^{-6}
气体热传导系数 $k_a/(W/(m \cdot K))$	25.83×10^{-3}
颗粒表面热吸收率 β	0.2
激光束的发散半角 $\theta/(^\circ)$	4
同轴喷嘴倾角 $\alpha/(^\circ)$	50
载气初始速度 $u_0/(m/s)$	2
激光焦点到送粉嘴距离 h/mm	27

2 试验材料及方法

2.1 试验材料

基体材料为 316 不锈钢, 试样尺寸为 100 mm×50 mm×10 mm。熔注颗粒为纯 WC 颗粒, 其显微形貌如图 2 所示, 颗粒为近球形, 颗粒直径范围为 50~150 μm 。

图 2 WC 颗粒的显微形貌

2.2 试验方法

激光器采用光纤耦合大功率半导体激光器, 运动机构为 6 轴工业机器人, 最大激光功率为 2 000 W, 送粉嘴出口到基体表面的距离为 30 mm。试验采用激光功率为 1 500 W(功率密度为 119 W/mm²), 光斑直径 4 mm, 扫描速度为 6 mm/s, 送粉率为 10 g/min, 载气流量为 62 L/min, 计算得到本试验所用送粉嘴中, 载气的速度为 2 m/s; 进行激光单道同轴熔注。试验完成后, 用线切割机切取熔注层横截面, 用丙酮对试样进行超声波清洗, 采用 FeCl₃ 硝酸酒精溶液腐蚀, 在扫描电镜下观察熔

注层纵截面中 WC 颗粒的分解情况。

3 结果与分析

3.1 增强颗粒速度分析结果

由于增强颗粒的注射速度与其受到激光束的辐照升温时间密切相关,而不同的颗粒直径和颗粒初速度都会对其注射速度造成影响。因此,首先由式(1)~(4)计算出不同颗粒直径、初速度对颗粒飞行速度的影响,结果如图 3 和图 4 所示。图 3 为颗粒在初速度为 0.8 m/s,载气速度为 2 m/s,送粉嘴倾角为 50° 的条件下,不同直径的颗粒速度随喷射距离的变化规律。随着喷射距离的增加,颗粒的速度都逐渐增加,颗粒在刚离开喷嘴时,加速度较大,颗粒速度增加较快;在离开喷嘴 10 mm 后颗粒速度的增加逐渐减缓;在离开喷嘴约 40 mm 时,颗粒的速度逐渐趋于稳定。这是因为颗粒初始速度较小,在载气的作用下速度逐渐增加,最终速度趋于载气速度。颗粒速度随着颗粒尺寸的增加而减小,这跟气体的黏滞系数相对大小有关^[24]。由此可知,颗粒直径越小,飞行速度将越快,进而受到激光辐射时间越短。从此方面考虑,选择小颗粒是有益于熔注的,但是,实际颗粒的温升还与颗粒表面积大小以及质量相关,因此还需要结合不同颗粒直径与温度的关系进行深入分析。

图 3 颗粒直径对颗粒速度的影响

图 4 为颗粒直径为 60 μm ,载气速度为 2 m/s,送粉嘴倾角为 50° 的条件下,不同的初速度对颗粒在飞行过程中速度的影响。由图可得,在颗粒喷出的初始阶段(喷射距离 < 10 mm),由颗粒初速度不同造成飞行速度不同的差异较为明显。但是在继续飞行的过程中,颗粒的飞行速度差异逐渐减小,最终还是逐渐接近载气速度。虽然颗粒最终速度将趋向一致,但是较快的初速度有利于减少颗粒与激光束的接触时间,降低颗粒的温升。同时,载气速度的提高也可加快颗粒的飞行速度。但是,较高的载气

速度需要大幅提高载气的流量与压力,进而对颗粒的汇聚、熔池液面的稳定和熔池表面的传热边界都会造成影响。因此,载气速度无法任意调高,需要与激光熔注的其它工艺参数进行匹配。

图 4 初速度对颗粒速度的影响

3.2 工艺参数与颗粒温升关系

计算颗粒温升与各工艺参数之间的关系,需要综合考虑各工艺参数以及颗粒速度对颗粒温升的影响。计算在不同颗粒尺寸、激光功率和颗粒初速度的情况下,颗粒在飞行过程中的温度变化,通过式(5)的计算结果如图 5~7 所示。当颗粒在飞行 30 mm 后到达熔池,因此,将该喷射距离作为临界的判断依据。图 5 中的横坐标、纵坐标和颜色分别代表了颗粒的直径、喷射距离和颗粒温度。由图可知,在颗粒初速度为 0.8 m/s,激光功率为 1 500 W 和较短喷射距离的条件下,颗粒温度不高,不同粒径的颗粒温度相差不大;随着喷射距离的增加,小颗粒的温度要明显高于大颗粒的温度;这是因为颗粒直径越小,其比表面积越大,吸收的激光比能越多,因此温度越高。从图 5 中可以观察到直径为 75 μm 的颗粒温度约为 3 100 K,而 WC 颗粒的熔点为 3 143 K。可以预测,当颗粒直径小于 75 μm 时,颗粒温度已经接近或超过其熔点温度。因此在此工艺参数下,要确保颗粒不熔化的理论临界直径约为 75 μm 。

图 5 颗粒直径对颗粒温度的影响

图 6 中的横坐标、纵坐标和颜色分别为激光功

率、喷射距离和颗粒温度。由图 6 可知, 在颗粒初速度为 0.8 m/s 和颗粒直径为 $75 \mu\text{m}$ 的条件下, 随着激光功率的增大, 颗粒的温度逐渐提高。在喷射距离为 30 mm 条件下, 可以观察到激光功率为 1500 W (功率密度为 119 W/mm^2) 时, 直径为 $75 \mu\text{m}$ 的颗粒温度达到 3100 K 左右, 接近颗粒的熔点。表明在此工艺参数条件下, 激光功率的理论临界值约为 1500 W (功率密度为 119 W/mm^2)。

图 6 激光功率对颗粒温度的影响

图 7 中的横坐标、纵坐标和颜色分别代表颗粒初始速度、喷射距离和颗粒温度。由图 7 可知, 在激光功率为 1500 W 和颗粒直径为 $75 \mu\text{m}$ 的条件下, 虽然颗粒的初速度不同, 但是在飞行过程中均被迅速加热, 初速度较大的颗粒其温度稍低于初速度较小的颗粒, 但两者的温升差异不显著。这是由于颗粒离开喷嘴后, 其飞行速度均快速接近载气速度, 在飞行 30 mm 后, 其速度差异已经不大(图 4)。而且, 送粉嘴与工作平面的距离较近, 颗粒飞行时间有限。因此在当前试验条件下, 颗粒初速度对颗粒的温升并不敏感。

图 7 颗粒初速度对颗粒温度的影响

3.3 试验验证

结合对 WC 颗粒温升模型的计算, 采用同轴送粉方式进行不同直径球形 WC 颗粒的熔注试验, 采用的激光工艺参数与第 2.2 节中描述一致。分析颗

粒在熔池中的分解情况, 从而验证颗粒的温升模型。因为熔注层表面颗粒在熔池中的时间短, 受到熔池的加热作用小, 因此取熔注层近表面的 WC 颗粒进行分析。图 8a 为扫描电镜背散射模式下拍摄的熔注层纵截面。所用 WC 颗粒直径范围在 $75 \sim 150 \mu\text{m}$, 颗粒直径主要集中在 $100 \mu\text{m}$ 左右。图 8b 为相同激光工艺参数条件下, 熔注小颗粒 WC 的纵截面, WC 颗粒直径范围在 $50 \sim 75 \mu\text{m}$, 颗粒直径主要集中在 $60 \mu\text{m}$ 左右。由图 8 可知, 无论采用的是大颗粒 WC 还是小颗粒 WC, 都能在熔注层中观察到大量球形的 WC 颗粒, 且颗粒的分布相对均匀。该现象表明在当前激光同轴熔注工艺条件下, 直径在 $50 \sim 150 \mu\text{m}$ 的 WC 颗粒均未发生完全的熔融分解。但是, 通过对图片进一步地放大分析可以发现, 大颗粒和小颗粒 WC 的分解情况出现较显著的差异。

图 8 激光同轴熔注层表面宏观形貌及纵截面 WC 颗粒分布

当 WC 进入熔池高温区域后, WC 表面与基体熔融金属相接触而分解出 W 和 C 原子, 并在颗粒近表面形成富 W 和富 C 区。根据 Fe-W-C 三元相图, 将会发生如下反应

式中, η 相为 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$, WC 颗粒边缘的反应层和周围呈十字花状的组织为以 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 为主的过共晶组织^[26]。

结合图 9 对 WC 颗粒的分解情况进行进一步分析。图 10a 是图 8a 中白色虚线框所示区域中的 WC 颗粒, 可以观察到颗粒周围没有存在 WC 分解的初生相, WC 颗粒表面反应层较薄 (A 所示)。图 10b 是图 8b 中白色虚线框内所示区域中的 WC 颗粒, 可以观察到颗粒周围存在大量 WC 分解出的初生相, 主要呈柱状和十字花状(主要为 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$)^[27]; WC 颗粒表面存在着明显的反应层, 反应层厚度约为 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 。WC 表面的反应层是颗粒在熔池中分解而生成的, 与颗粒的温度以及其在液态熔池中的保留时间相关。在相同熔池保留时间下, 不同的反应层厚度反映了颗粒的分解情况, 即颗粒温度的不同。

图 9 Fe-W-C 三元液相图^[25]

图 10a、10b 中虚线框位置为 WC 颗粒周围的基体组织, 保留了基体金属激光熔凝后的组织形态。图 10a 虚线框中的组织主要为共晶状组织, 而图 10b 虚线框中的组织主要为共晶和过共晶组织, 这与李福泉等得出的结果相同^[27]。两者组织之间的差异主要与颗粒注入到熔池中的状态有关。从图 10a 中可以观察到, 颗粒在进入熔池后, 仅靠熔池对流作用, WC 颗粒仅分解出少量的含 W 和 C 元素, 与基体形成少量鱼骨状的共晶组织。从图 10b 组织形貌可以观察到 WC 颗粒周围不仅存在大片鱼骨状的共晶组织, 还存在大量的十字花状初生相(过共晶组织), 仅靠熔池对流作用是很难让 WC 发生大量分解。

因此, 当激光功率为 $1\ 500\ \text{W}$ (功率密度为 $119\ \text{W}/\text{mm}^2$) 时, 可以认为小直径 WC 颗粒在进入熔池前, 表面温度已经较高, 颗粒表面发生局部熔化, 表层液态的 WC 被搅入熔池中, 使得基体中的 W 和 C 含量显著上升, 达到共晶或过共晶成分时, 基体中的组织形态也随即发生变化^[28]。从图 10a 与 10b

对比可以得出大直径 WC 颗粒在进入熔池前, 可保持固态, 而小直径 WC 颗粒在进入熔池前, 其表面已经发生了微熔, 形成液态的熔融薄层。该现象表明当激光功率为 $1\ 500\ \text{W}$ (功率密度为 $119\ \text{W}/\text{mm}^2$) 时, 如需确保颗粒不发生熔化, 则颗粒的直径要在 $75\ \mu\text{m}$ 以上, 同时也证实了上述温升模型的可靠性。

图 10 扫描电镜下不同直径 WC 颗粒组织形貌

由以上分析可得, 如需确保小直径 WC 颗粒不熔化, 必须降低激光功率。图 11 为小颗粒 WC (直径范围 $50\sim 75\ \mu\text{m}$), 激光功率为 $1\ 500\ \text{W}$ 与 $1\ 200\ \text{W}$ (功率密度为 $119\ \text{W}/\text{mm}^2$ 与 $95\ \text{W}/\text{mm}^2$) 条件下, WC 在熔池中的组织形貌扫描电镜图。

图 11a 为激光功率为 $1\ 200\ \text{W}$ (功率密度为 $95\ \text{W}/\text{mm}^2$) 时的 WC 颗粒分解情况, 由图可知, 颗粒周围组织与图 10a 中的组织形貌类似, 仅有少量 WC 颗粒发生分解, 熔池中只存在少量的共晶组织。这表明在该功率下, WC 颗粒仅发生少量分解, 这表明颗粒的温度较低。图 11b 为激光功率为 $1\ 500\ \text{W}$ (功率密度为 $119\ \text{W}/\text{mm}^2$) 时的 WC 颗粒分解情况, 发现颗粒周围的组织与图 10b 中类似。WC 颗粒表面存在较明显的反应层, 颗粒周围熔凝组织中存在大片的鱼骨状共晶与十字花状过共晶组织, 这说明 WC 颗粒分解较多。从图 11 的两幅图片对比来看, 可以得知 WC 颗粒在激光功率为 $1\ 500\ \text{W}$ (功率密度为 $119\ \text{W}/\text{mm}^2$) 时发生大量分解, 而激光功率为 $1\ 200\ \text{W}$ (功率密度为 $95\ \text{W}/\text{mm}^2$) 时仅发生少量分

解。这表明颗粒在进入熔池前, 颗粒的温度不同造成颗粒在后续进入熔池后分解情况不同, 从而生成的组织不同。在较高的功率下, WC 颗粒在进入熔池前, 颗粒表面温度较高, 已经发生了部分微熔, 进而在进入熔池后与熔池作用生成大量初生相。以上现象证实了图 6 中的计算结果。

图 11 扫描电镜下小直径 WC 颗粒组织形貌

4 结论

(1) 通过激光同轴熔注的 WC 颗粒速度模型, 获得颗粒直径、颗粒初始速度与颗粒飞行速度之间的对应关系。模型计算结果表明, 随着喷射距离的增加, 颗粒的速度逐渐增加, 最终接近载气速度。

(2) 通过激光同轴熔注的 WC 颗粒升温模型, 获得了颗粒直径、激光功率和颗粒初始速度等关键工艺参数与颗粒温度之间的对应关系, 揭示了保持 WC 颗粒不熔化的同轴熔注工艺参数临界条件。由模型计算结果表明, 在当前同轴送粉喷嘴参数和激光工艺参数条件下, 当激光功率为 1 500 W(功率密度为 119 W/mm²)时, 为保证颗粒保持固态, 颗粒的直径须大于 75 μm。如需注入直径小于 75 μm 的 WC 颗粒, 则必须降低激光功率至 1 200 W(功率密度为 95 W/mm²)以下。

(3) 试验结果与模型计算结果吻合良好, 研究结果表明即使采用同轴激光熔注形式, 在合适的工艺范围内, 仍能够确保 WC 颗粒在注入熔池前保持固态, 可以克服激光侧向熔注的部分缺点。

参 考 文 献

- [1] SCHAEFER R J, AYERS J D, TUCKER T R. Surface hardening by particle injection into laser melted surface: US, 4299860[P]. 1981-11-10.
- [2] AYERS J D. Modification of metal surface by the laser melt particle injection process [J]. Thin Solid Films, 1981, 84(4): 323-331.
- [3] AYERS J D, TUCKER T. Particulate TiC hardened steel surfaces by laser melt injection [J]. Thin Solid Films, 1980, 73(1): 201-207.
- [4] DESCHUYTENEER D, PETIT F, GONON M, et al. Influence of large particle size – up to 1.2mm – and morphology on wear resistance in NiCrBSi/WC laser clad composite coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 311: 365-373.
- [5] LI L, WANG D Z, SONG W J, et al. Microstructures and mechanical properties of WC P /Ti-6Al-4V composite coatings by laser melt injection and laser-induction hybrid melt injection [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 385.
- [6] VREELINGVOK J A, PEI Y T, HOSSON J. Laser melt injection in aluminum Alloys: on the role of the oxide skin [J]. Acta Materialia, 2000, 48(3): 4225-4233.
- [7] PEI Y T, OCELIK V, HOSSON J. SiCp/Ti6Al4V functionally graded materials produced by laser melt injection [J]. Acta Materialia, 2002, 50: 2035-2051.
- [8] 刘德健. 激光熔注单晶颗粒增强 WCp/Ti-6Al-4V 梯度复合材料层的界面反应机理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- LIU Dejian. Interfacial reaction of single crystal particulate reinforced WCP/Ti-6Al-4V graded composites coating produced by laser melt injection[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [9] 陈彦宾, 刘德健, 李俐群, 等. 激光熔注 WCp/Ti-6Al-4V 梯度复合材料层形成机制[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1718-1725.
- CHEN Yanbin, LIU Dejian, LI Liqun, et al. Formation mechanism of WCp/Ti-6Al-4V graded metal matrix composites layer produced by laser melt injection[J]. Chinese Journal of Laser, 2008, 35(11): 1718-1725.
- [10] VOLP P, DIETZ J, VOLLERTSEN F. Particle property

- impact on its distribution during laser deep alloying processes [J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 1094-1101.
- [11] 黄瑜, 汤慧萍, 张晗亮, 等. 非球形 Ti-6Al-4V 粉末粒度对激光快速成形的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, 36(z3): 394-399.
- HUANG Yu, TANG Huiping, ZHANG Hanliang, et al. Effect of irregular Ti-6Al-4V powder particle size on rapid laser forming [J]. *Rare Metal Material and Engineering*, 2007, 36(z3): 394-399.
- [12] 李刚, 许新颖, 葛少亮, 等. 65Mn 钢板激光扫描温度场及应变场的数值模拟 [J]. *金属热处理*, 2015, 40(4): 153-157.
- LI Gang, XU Xinying, GE Shaoliang. Numerical simulation of temperature field and strain field of 65Mn steel plate by laser scanning [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2015, 40(4): 153-157.
- [13] LIU D J, HU P P, MIN G Q. Interfacial reaction in cast WC particulate reinforced titanium metal matrix composites coating produced by laser processing[J]. *Optics and Laser Technology*, 2015, 69: 180-186.
- [14] 林守钢, 郭溪溪, 陈浩, 等. 激光熔注制备 ZrO_2 热障涂层过程中 ZrO_2 颗粒的组织演变[J]. *中国激光*, 2019, 46(8): 104-110.
- LIN Shougang, GUO Xixi, CHEN Hao, et al. Microstructure evolution of ZrO_2 particle during manufacture of ZrO_2 thermal barrier coating by laser melt injection [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2019, 46(8): 104-110.
- [15] 王涛. 激光熔注颗粒增强 $WC_p/4Cr5MoSiV1$ 复合材料层磨粒磨损性能及磨损机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- WANG Tao. Study on abrasive wear performance and wear mechanism of particle reinforced $WC_p/4Cr5MoSiV1$ composite layer fabricated by laser melt injection [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2018.
- [16] HANNES F, ANNIKA B, THOMAS S. Determination of the particle content in laser melt injected tracks [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 267: 177-185.
- [17] 王涛, 徐冲, 路媛媛, 等. 同步送粉激光熔注 $WC-W_{2C}_p/4Cr5MoSiV1$ 复合材料层微观组织及摩擦磨损性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2019, 48(5): 1544-1550.
- WANG Tao, XU Chong, LU Yuanyuan, et al. Simultaneous powder feeding laser cladding $wc-w_{2C}_p$ Microstructure and friction and wear properties of P / 4Cr5MoSiV1 composite layer [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2019, 48 (5): 1544-1550
- [18] WANG X Y, ZHOU S F, DAI X Q, et al. Evaluation and mechanisms on heat damage of WC particles in Ni60/WC composite coatings by laser induction hybrid cladding [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2017, 64: 234-241.
- [19] PERESTORONIN A, GRIGORYANTS A, TRETYAKOV R, et al. The features of surface composite layer formation by laser-powder treatment of steel with tungsten carbide particles [C]// *Journal of Physics. Conference Series*, 2018, 1109(1): 012028.
- [20] 杨楠, 杨洗尘. 激光熔覆中金属粉末粒子与激光相互作用模型 [J]. *光学学报*, 2008, 28(9): 1745-1752.
- YANG Nan, YANG Xichen. Model of interaction between metal powder particle and laser beam in laser cladding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008.9, 28(9): 1745-1752.
- [21] 张安峰, 周志敏, 李涤尘, 等. 同轴送粉喷嘴气固两相流流场的数值模拟[J]. *西安交通大学学报*, 2008, 42(9): 1169-1174.
- ZHANG Anfeng, ZHOU Zhimin, LI Dichen, et al. Numerical simulation of gas solid two phase flow field on coaxial nozzle in laser metal direct manufacturing [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2008, 42(9) : 1169-1174.
- [22] 孔珑. 两相流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- KONG Long. Two-phase fluid mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.
- [23] 易大义, 沈云宝, 李有法. 计算方法 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002.
- YI Dayi, SHEN Yunbao, LI Youfa, et al. Computational method [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2002.
- [24] SCHMIDT T, GARTNER F, ASSADI H, et al. Development of a generalized parameter window for cold spray deposition [J]. *Acta Materialia*, 2006, 54(3): 729-742.
- [25] LIU D J, LI L Q, LI F Q, et al. WC p /Fe metal matrix composites produced by laser melt injection [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2008, 202(9): 1771-1777.
- [26] 张相军. Q235 钢表面激光熔注 WC 涂层的组织结构与耐磨性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- ZHANG Xiangjun. Microstructures and wear resistance of coatings produced by laser melt injecting WC on Q235 steel surface [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.

- [27] 李福泉, 陈彦宾, 李俐群. Q235 钢表面激光熔注 WC 涂层的微观组织及耐磨性[J]. 焊接学报, 2010, 31(4): 28-33.
- LI Fuquan, CHEN Yanbin, LI Liqun. Microstructures and wear resistance of coatings produced by laser melt injecting WC on Q235 steel surface [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2010, 31(4): 28-33.
- [28] 刘德健, 李俐群. 激光熔注法制备 WC 颗粒增强金属基复合材料层[J]. 中国激光, 2008, 35(7): 1083-1089.

LIU Dejian, LI Liqun. WC particulate reinforced metal matrix composites layers produced by laser melt injection [J]. Chinese Journal of Laser, 2008, 35(7): 1083-1089.

作者简介: 王梁, 男, 1983 年出生, 博士, 高级工程师, 博士研究生导师, 主要从事多能量场协同激光制造技术方面的研究。

E-mail: ddtwl@foxmail.com

姚建华(通信作者), 男, 1965 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要从事激光表面改性技术的研究。

E-mail: laser@zjut.edu.cn