

Inconel 625 激光直接金属沉积成形参数无量纲化及其对单道几何形貌的影响

李进宝, 商 硕, 孙有政, 郭快快, 刘常升

东北大学材料各向异性与织构教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819

摘要 为了对激光直接金属沉积成形技术中不同参数进行规范,对 Inconel 625 球形合金粉末进行了激光直接金属沉积成形试验,对成形参数进行了无量纲化,得到了以接触角为几何形貌评价参数的加工图,并对工艺参数与单道沉积层几何形貌间的关系进行了分析讨论。结果表明,特征能量比为 0.5~0.7 时,粉末完全熔化且不造成能量剩余,沉积层呈现平滑的椭圆形;送粉速率是控制沉积层高度的首要因素,当送粉速率恒定时,激光功率对熔池深度影响较大。

关键词 激光技术; 激光直接金属沉积; 几何形貌; 无量纲化; Inconel 625

中图分类号 TG39 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201744.0302010

Parameter Nondimensionalization in Laser Direct Metal Deposition Formation of Inconel 625 and Its Influence on Single Track Geometric Morphology

Li Jinbao, Shang Shuo, Sun Youzheng, Guo Kuaikuai, Liu Changsheng

Key Laboratory for Anisotropy and Texture of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China

Abstract In order to standard different parameters in the laser direct metal deposition (LDMD) formation technology, the experiment of LDMD formation of Inconel 625 spherical alloy powders and the nondimensionalization of the formation parameters are conducted, and the working diagram with the contact angle as an evaluation parameter of geometric morphology is obtained. The relationship between the geometric morphology of single track deposited layer and the process parameters is discussed. The results show that, when the ratio of characteristic energy is between 0.5 and 0.7, the deposited layer shows a relatively smooth oval because of incomplete melting of powder and less energy redundancy. Feeding rate is the primary factor to control the height of deposited layers. When the feeding rate is constant, the laser power has a great influence on the depth of molten pools.

Key words laser technique; laser direct metal deposition; geometric morphology; nondimensionalization; Inconel 625

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 240.6700; 000.3860

1 引言

Inconel 625 合金具有良好的高温力学性能、优异的耐蚀性能、高温疲劳蠕变性能和抗氯离子应力腐蚀开裂的能力,广泛应用于航空航天、石油化工、航海船舶和能源动力等领域^[1]。然而,这类合金部件形状复杂、制备工艺繁琐、成形加工难。激光直接金属沉积(LDMD)成形技术结合了计算机辅助设计和控制技术的

收稿日期: 2016-10-25; **收到修改稿日期:** 2016-12-06

基金项目: 教育部高等学校基本科研业务费项目(N130810001)、NSFC-辽宁联合基金重点项目(U1508213)、广东省前沿与关键技术创新专项资金(2015B010122001)

作者简介: 李进宝(1988—),男,博士研究生,主要从事激光增材制造方面的研究。E-mail: ljb88126@163.com

导师简介: 刘常升(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光加工技术与激光表面改性方面的研究。

E-mail: csliu@mail.neu.edu.cn(通信联系人)

高度自动化能力,可以实现快速、少后甚至无后加工的近净成形^[2-4],弥补了其在制备复杂结构件方面的不足,受到了广泛重视^[5]。

LDMD 作为金属 3D 打印技术的一种,其核心包含了能量传递和粉末传递及快速熔凝的直接沉积过程^[6-7]。研究者们希望通过对成形参数的研究与优化,实现对熔池和沉积过程的控制,进而改善成形件的力学性能。单道沉积层几何形貌是多层沉积成形的基础,激光成形参数对单道几何形貌的控制影响着多层沉积成形构件的重熔区深度、搭接区宽度等重要参数,进而影响其组织结构。王志坚等^[8]采用 AutoCAD 软件对单道横截面形貌进行了图形模拟,结果表明,几何形貌截面上部轮廓线可以用一段圆弧模拟。高士友等^[9]提出了单一参数控制截面形貌的曲线方程,建立了描述横截面形貌变化规律的几何模型。陶喜德等^[10]探讨了激光比能、振幅、频率等工艺参数对接触角的影响,并构建了函数模型。Abioye 等^[11]针对送丝法中激光沉积过程的线能量密度对沉积层的宽高比、稀释率等的影响进行了研究,发现随着激光功率的增加,稀释率和宽高比增大而接触角减小。Lu 等^[12]对面能量密度、扫描速度、送粉速率与单道沉积层的沉积高度、宽度和沉积质量间的关系进行了研究。Li 等^[13]以激光功率密度作为影响成形质量的一个参数进行了研究,结果表明,适当的激光功率密度可以保持固定的沉积层高度,提高成形质量。Thomas 等^[14]总结了电子束熔融沉积、激光选区烧结等铺粉情况下的搭接率、铺粉厚度对沉积体晶粒大小及硬度的影响。Liu 等^[15]建立了粉末流分布的解析模型,将成形参数简并,同时计算了粉末效率和成形速率并与试验值进行对比。LDMD 成形设备和沉积材料的多样性使其单道沉积层几何形貌受各个因素的共同影响。各影响因素之间相互关联且整体呈非线性的特点,致使不同研究结论的参考价值较低,且存在重复性工作的问題。因此,对送粉法成形控制参数进行标准化,建立参数选择与性能预测模型,有利于加快成形工艺的研究,为 LDMD 理论模型的完善提供支持。

本文从材料快速吸热熔化、放热凝固的角度出发,将成形过程中主要物理量进行无量纲化,研究了无量纲能量密度、无量纲送粉速率和特征能量密度对沉积层几何形貌和晶粒形态的影响及其变化规律。结合成形参数调节沉积层高度和宽度,达到控制单道沉积层几何形貌的目的,为 LDMD 的深入研究提供了标准化思路及选择的基础,使具有设备和材料差异化的研究结果可以互相借鉴对比。

2 试验过程与方法

2.1 试验材料与设备

试验选取 316L 不锈钢为基体材料,通过线切割加工成 220 mm×30 mm×10 mm 的基体板,经砂纸打磨并用丙酮、酒精清洗表面油污后吹干备用。粉末材料选用沈阳有色金属研究院的 Inconel 625 雾化球形合金粉,其松装密度为 4.75 g/cm³,粉末粒度范围为 60~180 μm,其成分及热物性参数见表 1、2。使用日本 JEOL 公司 JSM-6510A 扫描电子显微镜(SEM)观察 Inconel 625 合金粉的形貌,如图 1 所示。

表 1 Inconel 625 粉末化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of Inconel 625 powder (mass fraction, %)

Element	Cr	Nb	Mo	Mn	Si	Fe	C	Ni
Content	21.50	3.80	9.25	0.40	0.30	0.55	0.030	Bal.

表 2 Inconel 625 粉末热物性参数

Table 2 Thermal physical parameters of Inconel 625 powder

Parameter	Value
Density /(g/cm ³)	8.4
Melting point /°C	1290-1350
Thermal diffusivity /(m ² /s)	3.5
Thermal conductivity /[W/(m·K)]	12.1
Specific heat capacity /[J/(kg·K)]	430

试样由自主研发的激光直接沉积成形系统制备,该成形系统如图 2 所示,包含波长为 1060 nm 的 GSI 公司 JK1002 型单模连续掺镱光纤激光器、同轴环形自动送粉装置、四轴联动工作台、循环冷却设备以及计

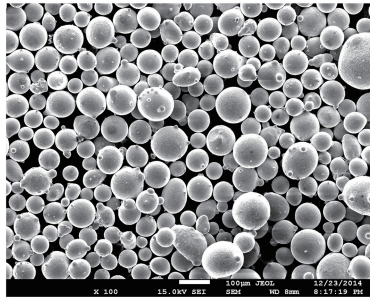


图 1 Inconel 625 粉末 SEM 图

Fig. 1 SEM image of Inconel 625 powder

计算机系统。激光沉积成形过程中采用氩气作为保护气体,束流气流量为 6 L/min,载流气流量为 3 L/min;激光器光斑大小为 2.5 mm,能量分布为高斯光斑,正离焦量为 5 mm。制备好的试样通过电火花线切割,经丙酮浸泡清洗后,采用试样截面进行金相试样制备,腐蚀液由 4.05 g CuSO₄ 溶于 20 ml 浓盐酸形成。使用 OLYMPUS 公司 GX71 型倒置式光学显微镜进行观察,并通过图像处理软件对沉积层的高度、熔池宽度、深度进行统计测量。

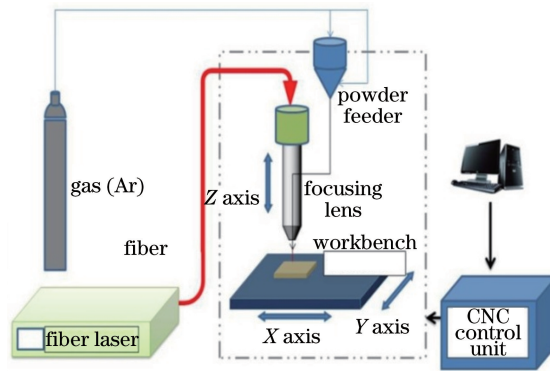


图 2 激光直接沉积系统示意图

Fig. 2 Schematic of LDMD system

2.2 控制参数的选取与无量纲化

LDMD 的过程中要控制试样的精度,同时使成形试样不出现气孔、裂纹等缺陷,就需要确保获得适合的单道沉积几何形貌,其受激光功率、光斑直径、送粉速率、扫描速度、原料吸光率等因素影响^[16]。在一个稳定的 LDMD 系统中,最重要且最易于精确调控的影响因素是激光功率 p 、扫描速度 v 和送粉率 F_v 。

单道沉积示意图如图 3 所示,其中 W 为单道沉积的宽度, H 为沉积层高度, D 为熔池深度, α 为沉积层与基体的接触角,这些参数较为全面地反映了沉积层和熔池几何形状的特征,在一定程度上决定了熔覆层质量; d_c 为树枝晶高度, d_e 为等轴晶高度。试验工艺参数见表 3,每条单道沉积长度为 35 mm。

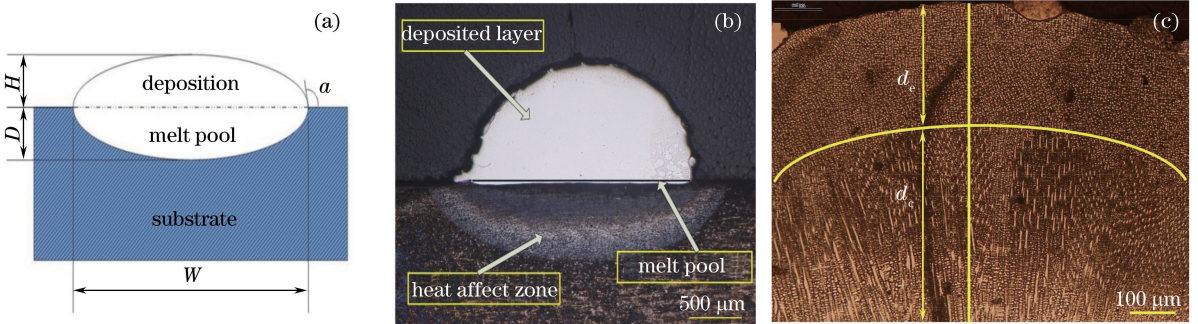


图 3 (a)单道沉积示意图;(b)单道沉积层形貌;(c)单道沉积层晶粒形态

Fig. 3 (a) Schematic image of single track deposition; (b) morphology of single track deposited layer; (c) grain morphology of single track deposited layer

表 3 激光直接沉积成形工艺参数
Table 3 Process parameters of LDMD

Group No.	Power p /W	Feeding rate F_v /(g/min)	Scanning speed v /(mm/s)	Sample number
1	600	18-50	6-12	49
2	700	18-50	6-12	49
3	800	28	6-12	7
4	900	28	6-12	7
5	1000	28	6-12	7

Ion 等^[17]的研究对无量纲激光功率 p^* 和无量纲扫描速度 v^* 给出如下定义:

$$p^* = Ap / [r_B \lambda (T_m - T_0)], \quad (1)$$

$$v^* = vr_B / \beta, \quad (2)$$

式中 A 为材料的等效吸光系数; r_B 为光斑半径; λ 和 β 分别为材料的导热系数和热扩散系数; T_m 和 T_0 分别为材料的熔点和环境温度。 A 的取值范围为 $0.15 \sim 0.5$ ^[18], 激光深熔焊时其可达到 0.8, 通过哈根-鲁宾斯关系式进行推算可得^[19]

$$A(T) = \sqrt{8\epsilon_0 \omega \rho_e(T)}, \quad (3)$$

式中 ω 为入射激光的角频率, ϵ_0 为真空介电常数, $\rho_e(T)$ 为受温度影响的材料电阻系数。为了便于分析, CO_2 激光器的 LDMD 等效吸收系数取 0.5 (Nd:YAG 激光器: $A_{316L} = 0.28$, $A_{\text{Inconel 718}} = 0.36$, $A_{\text{TC4}} = 0.3$ ^[19]), 且材料的热物性参数 λ 和 β 取室温下的值, 并假设不随材料的熔化而改变。在送粉法中, 材料对激光的衰减作用可以忽略。试验中激光能量密度 E_1 采用单位长度能量密度 p/v , 因此其无量纲的表示为

$$E_1^* = p^* / v^* = Ap / [r_B^2 v \rho C_p (T_m - T_0)], \quad (4)$$

式中 ρ 为材料密度, C_p 为材料的比热容。考虑到熔化潜热所需的能量, 从熔化焓 H_{\min} 角度进行分析, 有

$$H_{\min} = \rho C_p (T_m - T_0) + L_m. \quad (5)$$

熔化焓受温度、压力、成分等因素影响, 由理查德定律可知, 金属的熔化焓近似为常数。依据文献[20, 17], 金属和合金的熔化潜热 L_m 约为 $0.5\rho C_p \Delta T$, 因此有

$$H_{\min} \approx 1.5\rho C_p (T_m - T_0), \quad (6)$$

将(6)式代入(4)式, 有

$$E_{1\min}^* = p^* / v^* = 2Ap / [3r_B^2 v \rho C_p (T_m - T_0)]. \quad (7)$$

(7)式表示单位长度上熔化粉末所需的最小能量, 也可以表示原料粉末从 T_0 到 T_m 所需的最小能量。送粉速率是送粉法 LDMD 的重要控制参数, 反映了熔池捕获原料粉末的能力。光斑尺寸与送粉焦点(粉斑)的尺寸共同影响着成形过程的沉积效率, 因此, 对无量纲送粉速率定义如下

$$F_v^* = F_v / (r_B v \rho r_f), \quad (8)$$

式中粉斑半径 r_f 为 2 mm。无量纲能量密度与送粉速率两者可以反映送粉法 LDMD 的物理核心过程, 同时包含了单道成形的的主要影响参数。结合单道沉积层几何形貌的评价参数接触角 α 可以建立加工图, 接触角可由下式求得

$$\alpha = 90^\circ - \arctan(2H/W). \quad (9)$$

将(7)式与(8)式相除, 得到特征能量比 E_0^* 为

$$E_0^* = E_1^* / F_v^* = \frac{2pr_f}{3F_v r_B} \times \frac{A}{C_p (T_m - T_0)}, \quad (10)$$

式中 $2pr_f / (3F_v r_B)$ 包含了 LDMD 所有重要成形参数, $A / [C_p (T_m - T_0)]$ 反映了不同材料的基础热物性参数。特征能量比可以揭示沉积过程中能量与粉末输送量间的匹配关系, 反映粉末沉积过程中经历的热过程, 可判断不同特征能量比与单道沉积层几何形貌间的关系。

3 试验结果与讨论

3.1 沉积层几何形貌

LDMD 单道宏观形貌如图 4 所示,从图 4(a)可以看出,沉积层连续平滑,未出现断裂不连续的水滴状和堆积现象^[9],沉积层形貌随着沉积量的增加越加饱满平整。其中 1# 沉积层的沉积量较小,与基体仅形成了一定的冶金结合,较少的送粉速率未能促进沉积过程中熔池的流动,沉积层形貌不规则。随着沉积层送粉速率的增加,沉积层逐渐圆滑饱满,并且各部分均匀(3# 沉积层)。由图 4(b)可见,单道沉积样品宏观形貌整体连续,表面有细微颗粒;而沉积层圆滑并与基体结合良好。

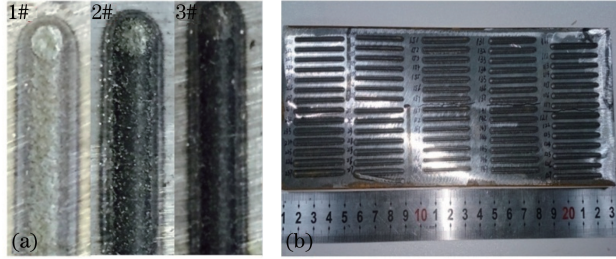


图 4 单道沉积层宏观形貌。(a)不同形貌沉积层;(b)试样

Fig. 4 Macroscopic morphology of single track deposited layer. (a) Deposited layers with different morphologies; (b) samples

判断单道沉积层质量的方法是观察其表面质量和沉积层形貌,其中沉积层形貌是质量评价的重要参考。熔池深度反映了沉积层和基体的结合情况,在保证沉积层有良好冶金结合的情况下,熔池深度越小越好;在 3D 打印中,熔池深度在一定程度上可以反映重熔区的大小。接触角反映了沉积层宽度和高度间的关系,在沉积层形貌的研究中,认为接触角在 $90^\circ \sim 135^\circ$ 时,沉积层宽高比合适,获得一定沉积高度的同时可以获得满意的沉积层几何形貌^[11]。

图 5 是 119 个单道沉积层无量纲化特征参数的接触角分布图。试验中单道沉积层特征能量比在 $0.3 \sim 2$ 范围内,当 E_0^* 相同时,表示其组合的工艺参数维持在一个定值,但并不代表材料的沉积过程相同。当 E_0^* 为 0.5 时,随着 F_v^* 和 E_1^* 的增大,扫描速度和沉积层接触角逐步减小,沉积量逐步增大。此时,接触角减小平缓并且角度变化范围较大,为 $49.2^\circ \sim 135^\circ$,这表明当 E_0^* 为 0.5 并以恒定比例沉积时,随着无量纲激光能量密度和无量纲送粉速率的同步增大,粉末的沉积量逐步增大,无量纲激光能量密度和无量纲送粉速率匹配,激光提供的能量可以熔化相应的送粉量且不造成能量剩余;当 E_0^* 为 0.3 时,沉积层接触角减小较快,迅速下降到 80° 以下,表明在相同无量纲送粉速率增加的情况下,其沉积了更多的粉末,剩余能量过多,因此接触角下降得更快;当 E_0^* 为 1 时,接触角一直处于合格范围内,激光能量密度增大过快使得沉积层熔池深度加大而粉末沉积量减小。因此,当特征能量比位于 area 1 时,激光束捕获等量的粉末,可以使沉积层维持较好的几何形貌;当特征能量比位于 area 2 时,容易出现粉末沉积量过大的现象,沉积层高度偏高导致出现未熔

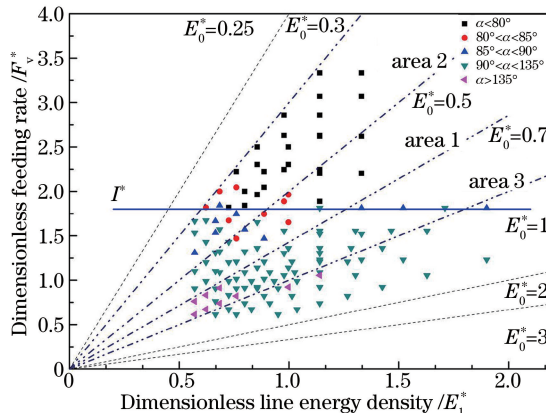


图 5 单道沉积层形貌分布分析图

Fig. 5 Analysis map of morphology distribution of single track deposited layer

粉末和空隙并形成缺陷;当特征能量比在 area 3 时,激光能量密度过高,原料粉末较少,出现过热并且易使上一层的沉积层过多熔化,热应力较大并进一步形成裂纹。但当 F_0^* 大于 1.7 时,粉末沉积过大造成沉积层几何形貌较差。

单道沉积层晶粒形态分为沉积层上部的等轴晶和下部的细长树枝晶或柱状晶,如图 3(c)所示,柱状晶高度与等轴晶高度之比表示不同类型晶粒的分布比率,记为 d_r 。不同的晶粒类型所占体积百分比反映沉积过程温度场的分布情况;WANG 等^[21]研究发现,等轴晶比率随着送粉速率的增加逐步增大,柱状晶比率减小,两者是竞争生长的关系。如图 6(a)所示,当无量纲送粉速率加大时,原料粉末出现未熔粉末,易成为异质形核的形核质点,进而促进了等轴晶的形成,图中左下插图即为等轴晶高倍金相形貌图。如图 6(b)所示,当无量纲送粉速率较小时,相对较大的激光能量密度导致沉积层温度较高、原料粉末熔化充分,快冷后形成较大温度梯度,基体的晶粒通过熔池底部以外延生长的方式形成柱状晶,图中左下插图即为柱状晶高倍金相形貌图。

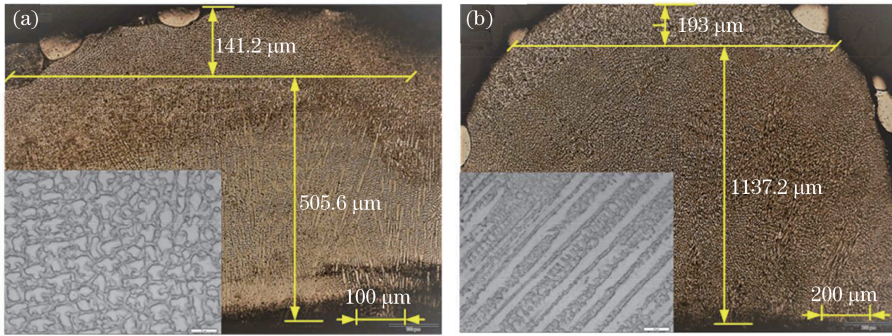


图 6 单道沉积层晶粒形貌。(a)较大无量纲送粉速率;(b)较小无量纲送粉速率

Fig. 6 Grain morphology of single track deposited layer. (a) High dimensionless powder feeding rate; (b) low dimensionless powder feeding rate

图 7 为不同特征能量密度下单道沉积层晶粒形态分布图。当 E_0^* 值较小时,送粉速率较大,柱状晶所占比率较小。当 E_0^* 值较大时,柱状晶所占比率较大。当 E_0^* 为定值时,随着无量纲送粉速率和无量纲激光能量密度的同步增大,柱状晶占比逐步减小。这是因为当送粉速率过大时,未熔或者半熔粉末颗粒成为非匀质形核的质点,加快了非匀质形核过程,增大了等轴晶占比。同时,当送粉速率与激光能量密度不匹配时,未熔粉末的积累效应逐渐显现并在多层沉积时进一步扩大。当 E_0^* 为 0.7 时,随着粉末沉积量逐步增大,粉末输送量的增速小于能量密度的增速,树枝晶减小速度较慢,从 3.37 减慢至 3.18;当 E_0^* 为 0.3 时,柱状晶的减小速度较快,从 8.03 减小至 5.28。

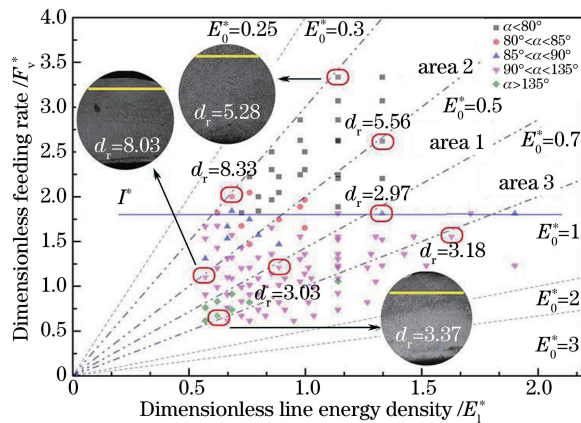


图 7 不同无量纲线能量密度下晶粒形态分布

Fig. 7 Grain morphology distributions under different dimensionless line energy densities

3.2 沉积层高度的影响因素和变化

LDMD 的单道形貌受到激光功率、扫描速度、送粉速率的影响,通过对标准沉积加工形貌图的分析可以迅速准确地发现适用的成形参数组合范围。

图 8 是激光功率为 600 W 时单道沉积层的几何形貌分布图,其中标记黄色五角星的为合格的单道沉积形貌,可以发现沉积层高度差距较大。考虑到对沉积层的精确控制,需要进一步分析单因素对其形貌的影响,进而在众多可选参数组合之间进行细微调整,达到对沉积层几何形貌的准确控制。从图 8 可以发现,随着送粉速率的增大和扫描速度的减小,粉末沉积量越来越多,截面形貌由扁平状快速变为半球状。图 9 表示不同参数对沉积层高度的影响,随着扫描速度的增加,沉积层高度平均下降了 75.32 μm ,而随着激光功率和送粉速率的增加,沉积层高度分别上升了 79.75 μm 和 110.13 μm ,因此,送粉速率是对沉积层高度产生影响的主要因素之一。在图 9(c)中,当激光功率为 900 W 时,沉积层高度都出现下降趋势,激光功率过高使得基体材料过多熔化进而造成熔池尺寸加大,导致沉积层高度出现降低。在恒定激光功率和送粉速率、不同扫描速度下,沉积层高度变化规律趋于一致,说明研究激光能量密度与送粉速率间的对应比例关系是沉积层形貌变化规律的核心,进而辅以扫描速度对沉积层几何形貌的影响,就可以更准确地了解不同材料沉积层形貌的变化规律。

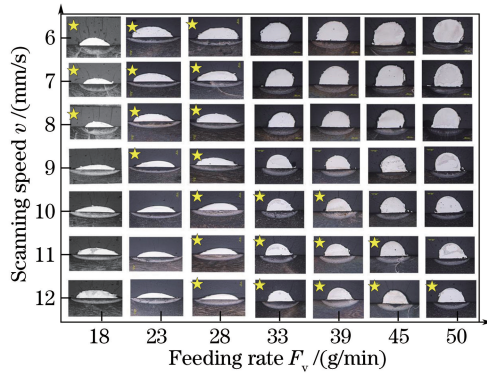


图 8 激光功率为 600 W 时单道沉积层的几何形貌分布

Fig. 8 Geometry morphology distributions of single track deposited layer at laser power of 600 W

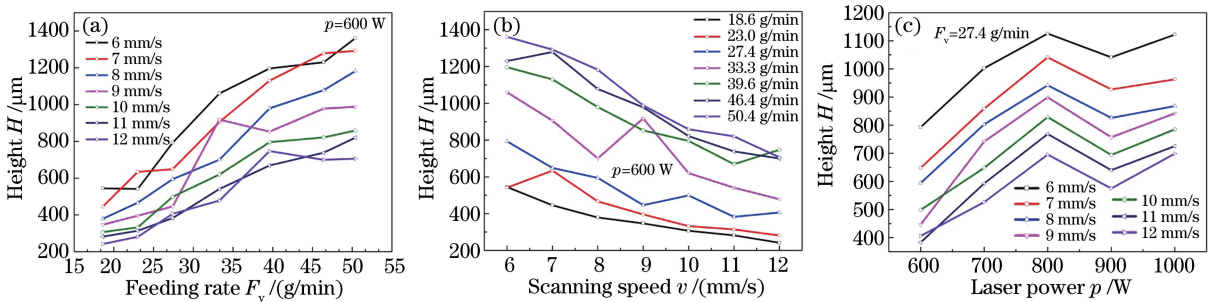


图 9 不同参数对沉积层高度的影响。(a)送粉速率;(b)扫描速度;(c)激光功率

Fig. 9 Influences of different parameters on height of deposited layers. (a) Feeding rate; (b) scanning speed; (c) laser power

3.3 沉积层宽度的影响因素和变化

图 10 表示不同参数对沉积层宽度的影响。由图 10(a)可知,沉积层宽度随着送粉速率的增大而减小,随着激光功率的增大而增大,高送粉速率和较低的激光功率导致原料粉末不能充分熔化且熔池较小,从而使沉积层宽度变小;而充足的激光功率可以充分熔化基体,促进熔池内溶质流动,使沉积层宽度加大。由图 10(b)可知,扫描速度对沉积层宽度的影响较小,其宽度变化整体较为平缓。

3.4 熔池深度的影响因素和变化

熔池深度反映了沉积层的稀释率及沉积层与基体的结合状况,同时也体现了多层沉积,即 3D 金属打印的重熔区深度。控制熔池深度能直接影响到 LDMD 沉积效率和成形件的质量。

单道沉积形貌中,要求在保证基体和沉积层充分冶金结合的条件下,熔池深度尽量较小。图 11 表示不同参数对熔池深度的影响。从图 11(a)可见,熔池深度随着送粉速率的下降迅速降低,在送粉速率到达 33 g/min 时,其深度变化趋于平缓,维持在 10 μm 左右,送粉速率的增大使激光输出能量用于熔化原料粉末,其作用于基体的能量减少,造成熔池深度迅速降低,最后维持在一个平稳的深度。从图 11(b)中可以发

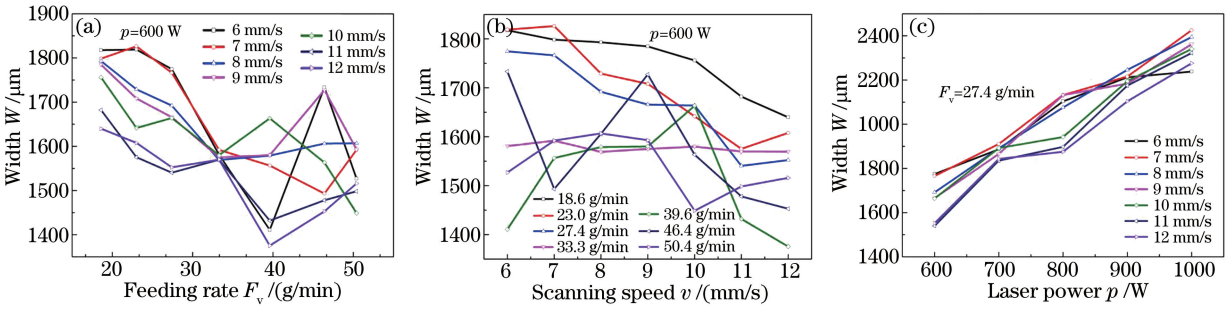


图 10 不同参数对沉积层宽度的影响。(a)送粉速率;(b)扫描速度;(c)激光功率

Fig. 10 Influences of different parameters on width of deposited layers. (a) Feeding rate; (b) scanning speed; (c) laser power

现,扫描速度对熔池深度的影响不大,但当送粉速率较低时,熔池深度随扫描速度的变化出现较大波动,这是由于送粉速率较小时,大部分输入能量用于基体熔化。由图 11(c)可知,熔池深度随激光功率的增加先减小后增大。结合前文结论可知,特征能量比是影响沉积层几何形貌的关键性因素之一,当 E^* 在 0.5~0.7 时,原料粉末充分熔化,可得到接触角和沉积层宽高比合适的几何形貌。

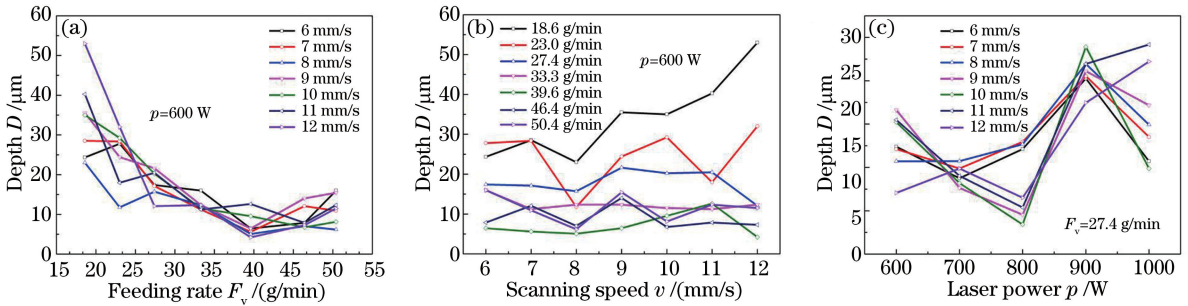


图 11 不同参数对熔池深度的影响。(a)送粉速率;(b)扫描速度;(c)激光功率

Fig. 11 Influences of different parameters on depth of deposited layers. (a) Feeding rate; (b) scanning speed; (c) laser power

4 结 论

研究了 Inconel 625 的 LDMD 单道几何形貌,并进行了参数无量纲化,得到如下结论:LDMD 制备的 Inconel 625 单道沉积层较为连续饱满,未出现堆积、不连续水滴、断裂等明显的缺陷。当特征能量比为 0.5~0.7 时,单道沉积层形貌逐步由扁平椭圆形向半球形转变,质量相对较好;特征能量比数值较小时,送粉速率较大,沉积层中柱状晶所占比率较小。扫描速度对熔池深度和沉积层宽度的影响较小,送粉速率是沉积层高度的首要影响因素;熔池深度受激光功率影响较大,当送粉速率过小时,熔池深度变化较大。

参 考 文 献

[1] Jia Peng, Wang Engang, Lu Hui, *et al.* Effect of electromagnetic field on micro-structure and mechanical property for Inconel 625 superalloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2013, 49(12): 1573-1580.
贾 鹏, 王恩刚, 鲁 辉, 等. 电磁场对 Inconel 625 合金凝固组织及力学性能的影响[J]. *金属学报*, 2013, 49(12): 1573-1580.

[2] Lu Bingheng, Li Dichen. Development of the additive manufacturing (3D) printing technology[J]. *Machine Building & Automation*, 2013, 42(4): 1-4.
卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D)打印技术发展[J]. *机械制造与自动化*, 2013, 42(4): 1-4.

[3] Wang Huaming. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(10): 2690-2698.
王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造:若干材料基础问题[J]. *航空学报*, 2014, 35(10): 2690-2698.

[4] Imran M K, Masood S H, Brandt M, *et al.* Direct metal deposition (DMD) of H13 tool steel on copper alloy substrate: Evaluation of mechanical properties[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 528(9): 3342-3349.

[5] Bi G, Sun C N, Nai M L, *et al.* Micro-structure and mechanical properties of nano-TiC reinforced Inconel 625 deposited

- using LAAM[J]. *Physics Procedia*, 2013, 41: 828-834.
- [6] Wang Huaming, Zhang Shuquan, Wang Xiangming. Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(12): 3204-3209.
王华明, 张述全, 王向明. 大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战[J]. *中国激光*, 2009, 36(12): 3204-3209.
- [7] Chen Dening, Liu Tingting, Liao Wenhe, *et al.* Temperature field during selective laser melting of metal powder under different scanning strategies[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(4): 0403003.
陈德宁, 刘婷婷, 廖文和, 等. 扫描策略对金属粉末选区激光熔化温度场的影响[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0403003.
- [8] Wang Zhijian, Dong Shiyun, Xu Binshi, *et al.* Three-dimensional characterizing technique for geometrical features of single laser cladding[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(2): 581-585.
王志坚, 董世运, 徐滨士, 等. 单道激光熔覆层几何特征的三维表征方法[J]. *中国激光*, 2010, 37(2): 581-585.
- [9] Gao Shiyu, Li Jian, Li Chenguang, *et al.* Research on the variation regularity of single laser tracks cross-section morphology during laser cladding[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0503010.
高士友, 李 健, 李臣光, 等. 激光熔覆单道沉积轨迹横截面形貌变化规律研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0503010.
- [10] Tao Xide, Liu Hongxi, Zhang Xiaowei, *et al.* Cladding angle model and variation law of Fe-based coating fabricated by mechanical vibration assisted laser cladding[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(3): 0303014.
陶喜德, 刘洪喜, 张晓伟, 等. 机械振动作用下铁基涂层熔覆角的模型构建及其变化规律研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0303014.
- [11] Abioye T E, Folkes J, Clare A T. A parametric study of Inconel 625 wire laser deposition[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213(12): 2145-2151.
- [12] Lu Z L, Li D C, Tong Z Q, *et al.* Investigation into the direct laser forming process of steam turbine blade[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(9-10): 1101-1110.
- [13] Li P, Yang T P, Li S, *et al.* Direct laser fabrication of nickel alloy samples[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, 45(11): 1288-1294.
- [14] Thomas M, Baxter G J, Todd I. Normalised model-based processing diagrams for additive layer manufacture of engineering alloys[J]. *Acta Materialia*, 2016, 108: 25-36.
- [15] Liu J, Li L J. Effects of process variables on laser direct formation of thin wall[J]. *Optics and Laser Technology*, 2007, 39(2): 231-236.
- [16] Zhao Hongyun, Yang Xianqun, Shu Fengyuan, *et al.* Comparative analysis on predictions of the geometric form of laser cladding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, 30(1): 51-59.
赵洪运, 杨贤群, 舒凤远, 等. 激光熔覆层形貌预测对比分析[J]. *焊接学报*, 2009, 30(1): 51-59.
- [17] Ion J C, Shercliff H R, Ashby M F. Diagrams for laser materials processing[J]. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1992, 40(7): 1539-1551.
- [18] Pinkerton A J, Li L. Modelling the geometry of a moving laser melt pool and deposition track via energy and mass balances[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2004, 37(14): 1885-1895.
- [19] Lee Y S, Nordin M, Babu S S, *et al.* Influence of fluid convection on weld pool formation in laser cladding[J]. *Welding Journal*, 2014, 93(8): 292-300.
- [20] Gale W F, Totemeier T C. *Smithells metals reference book*[M]. 8th ed. London: Butterworth-Heinemann, 2004.
- [21] Wang T, Zhu Y Y, Zhang S Q, *et al.* Grain morphology evolution behavior of titanium alloy components during laser melting deposition additive manufacturing[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 632: 505-513.