

激光金属直接成形中形貌自稳定效应研究

皮刚, 张安峰, 朱刚贤, 李涤尘, 卢秉恒

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了在开环控制条件下直接制备出表面平整的薄壁零件, 针对同轴送粉条件下粉末离焦对单道熔覆层厚度的影响, 建立了理论模型, 分析了成形表面出现的凹凸不平现象, 对激光离焦和粉末离焦对单道熔覆层形貌的影响进行了实验研究. 研究表明, 激光离焦主要影响单道熔覆层的宽度, 而粉末离焦主要影响单道熔覆层的厚度. 在粉末负离焦条件下, 激光金属直接成形过程具有形貌自稳定效应, 能消除成形层的凹凸现象, 从而制造出成形表面平整的薄壁零件样件. 由于计算结果与实验结果的趋势能保持一致, 形貌自稳定效应能够提高开环系统下薄壁零件的制造精度, 因此具有实际的应用价值.

关键词: 激光金属直接成形; 激光离焦; 粉末离焦; 形貌自稳定效应

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)11-0077-05

Self-Regulation-Effect in Laser Direct Metal Manufacturing

PI Gang, ZHANG Anfeng, ZHU Gangxian, LI Dichen, LU Bingheng

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To fabricate fine thin-wall parts with smooth surface by open-loop laser direct metal manufacturing (LDMM) system, the uneven formed surface in forming process is analyzed and the effect of off-focused laser and off-focused powder on the shape of single-trace cladding layer, is investigated by single-trace cladding experiments. The results show that off-focused laser exerts a significant effect the thickness of single-trace cladding layer, and off-focused powder affects mainly the height of single-trace cladding layer. It is suggested that self-regulation-effect in the process of LDMM in the condition of negative off-focused powder enables to perfect the uneven shaped surface caused by instability of process parameters. The theoretical model of the influence of off-focused powder on deposition thickness in the condition of coaxial powder feeding is constructed, and regular pattern obtained from the model matches well with experimental results. Several thin-wall parts with smooth formed surface are fabricated in terms of the self-regulation-effect.

Keywords: laser direct metal manufacturing; off-focused laser; off-focused powder; self-regulation-effect

由于激光金属直接制造 (LDMM) 技术可实现对零件外形尺寸、微观结构和组织性能的柔性控制, 因此得到了广泛的关注^[1-2]. 激光金属直接成形过程中的工艺参数较多, 任何工艺参数的不稳定 (如送粉

量波动、激光功率波动) 都会使成形表面产生凹凸不平现象, 若不能得到控制, 多层堆积后会形成凹凸不平, 将严重影响成形质量, 甚至使成形过程无法继续进行. 为了保证零件的成形质量, 国内外许多学者致

力于成形过程的闭环控制研究,钟敏霖等人^[3-4]通过对系统中送粉量实现闭环控制来消除凹凸不平现象,Bi 等人^[5]采用基于路径的闭环功率控制方法提高了薄壁零件的成形精度,Liu 等人^[6]采用了实时运动调整策略,以消除成形缺陷.

本文实验研究了激光离焦和粉末离焦与单层熔覆层形貌之间的关系,得到了形貌自稳定效应的工艺规律,建立并验证了相应的理论模型,解决了成形表面凹凸不平的问题,提高了开环控制系统下薄壁零件的成形精度.与闭环控制系统相比较,本文在保证零件成形精度的情况下,降低了设备的成本.

1 实验过程

激光金属直接制造系统由激光器、送粉系统、数控工作台和循环冷却系统 5 个子系统组成. 激光器透镜焦距 $f_1=160$ mm,激光束通过聚焦透镜处的光束直径 $D=27$ mm,聚焦处的光斑直径 $d_0=0.48$ mm,喷嘴粉腔水平间距 $a=1$ mm,粉末汇聚中心距喷嘴底端距离 $\delta=4$ m,粉末汇聚半径 $R_p=1.5$ mm. 实验用金属粉末为 316L 不锈钢粉末,粒度为 $15\sim45\ \mu\text{m}$;基材为 316L 不锈钢,尺寸为 $150\text{ mm}\times100\text{ mm}\times8\text{ mm}$. 316L 不锈钢的化学成分如表 1 所示,载送粉末的气体为氩气,环境初始温度为室温.

表 1 316L 不锈钢粉末的化学成分 %							
$w(\text{C})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{P})$	$w(\text{S})$	$w(\text{Cr})$	$w(\text{Ni})$	$w(\text{Mo})$
0.024	0.51	1.53	0.024	0.003	16.75	10.17	2.05

实验所用的基本工艺参数如表 2 所示. 单道薄壁零件成形的扫描方式采用往复式,成形轨迹长度为 60 mm,堆积层数为 100 层. 复杂薄壁零件成形时采用轮廓扫描的方式,同时采用逐层起始点随机错开机制,以消除起始点处缺陷积累的问题. 多层堆积时,取 z 轴单层行程等于单层熔覆层厚度.

表 2 LDMM 的工艺参数	
工艺参数	数值
激光功率/W	250
扫描速度/ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	6
送粉量/ $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$	8.8
载粉气流量/ $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	8

2 分析与讨论

2.1 激光离焦特性

根据激光束相关参数,由几何关系可以计算出

任意离焦处激光光斑的直径为

$$d(z)=d_0+\frac{D-d_0}{f_1}|z|=0.48+0.166|z| \tag{1}$$

当激光离焦 3 mm 时,光斑直径增大了一倍,在激光离焦 $\pm 3\text{ mm}$ 的范围内,进行单道熔覆成形实验,实验过程中始终保持粉末处于汇聚位置. 由图 1a 可以看出,在 $\pm 3\text{ mm}$ 的范围内,激光离焦对单道熔覆层厚度 h 的影响较小,且未呈现明显规律. 这是因为激光离焦虽然光斑直径增大,使熔池具有增大趋势,但同时激光功率密度却迅速降低,使得熔池尺寸具有减小趋势. 由图 1b 可以看出,在激光离焦 $\pm 3\text{ mm}$ 的范围内,光斑直径为 $0.48\sim0.98\text{ mm}$,而实际熔池宽度 w 的范围为 $0.52\sim0.7\text{ mm}$.

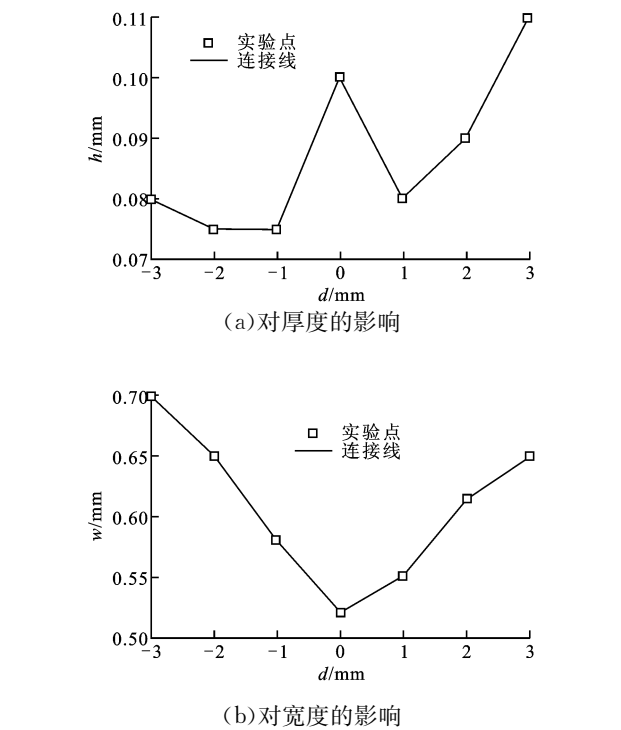
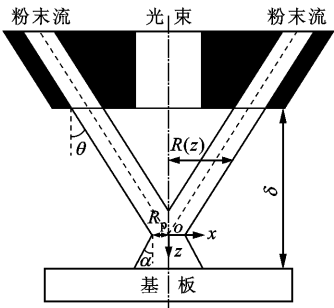


图 1 激光离焦对单道熔覆层形貌的影响

2.2 粉末离焦特性

如图 2 所示,以粉末汇聚中心为原点建立 xoz 坐标系,基板形成熔池处的纵坐标为 z . 当粉末离焦 $z_1=0\text{ mm}$ 时,粉末汇聚于基板,为粉末汇聚. 当 $z_1<0\text{ mm}$ 时,粉末到达基板时尚未汇聚,为粉末负离焦. 当 $z_1>0\text{ mm}$ 时,粉末尚未到达基板已经汇聚,为粉末正离焦.

为避免粉末反弹进入喷嘴造成堵粉,喷嘴距离基板应大于 2 mm,实验过程中还应始终保持激光处于聚焦位置. 如图 3a 所示,在粉末汇聚时的 h 最大, h 随负离焦量和正离焦量的增大而减小,这是因



θ :粉末汇聚前的发散角; α :粉末汇聚后的发散角;
 $R(z)$:离焦 z 时的粉末汇聚半径; R_p :粉末汇聚半径

图 2 粉末射流汇聚示意图

为粉末汇聚在空间中呈高斯分布^[7],粉末汇聚处浓度最高,随着粉末的离焦(无论正离焦还是负离焦),形成熔池处的粉末浓度降低,激光一直处于汇聚状态,所以熔覆层高度降低。从图 3b 中可以看出,粉末离焦在一定范围内对单道熔覆层宽度影响不大,若粉末离焦过大则会使沉积点处的粉末浓度降低,熔池宽度减小。

2.3 粉末离焦时的形貌自稳定效应

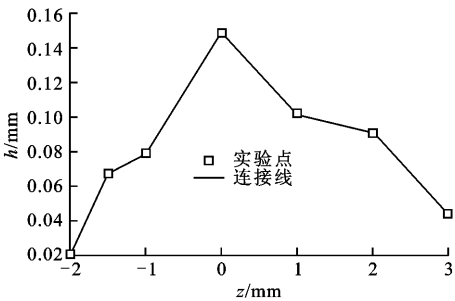
分析粉末离焦量对单层熔覆层厚度的影响规律发现,在粉末负离焦条件下进行熔覆成形时具有形貌自稳定效应。如图 4 所示,当熔覆层在成形过程中出现凹凸后,在下一层成形时,凹陷处(z_2)的粉末负离焦减小,单道熔覆层厚度随之增大,凹陷处被填起。熔覆层在凸起处(z_1)的粉末负离焦增大,使单层熔覆层厚度减小,因此凸起得到消除。由于熔覆层在整个成形过程中存在着消除凹凸的自稳定效应,因此能够保证成形平整、稳定地进行(见图 5a)。若成形过程是在粉末汇聚的情况下进行,当熔覆层在成形过程中出现凹凸后,下一层成形时,凸起处的熔覆层厚度减小,使凸起得到控制,但凹陷处的熔覆层厚度也减小,且多层堆积,使得凹陷越来越严重(见图 5b)。若熔覆层的成形过程是在粉末正离焦情况下进行的,则当熔覆层出现凹凸后,在下一层成形时,凹陷处的粉末正离焦增大,单层熔覆层厚度随之减

小,使凹陷加深。由于熔覆层在凸起处的粉末正离焦减小,单层熔覆层厚度增大,使得凸起加重,多层堆积凹凸累积,成形表面严重不平,因此成形无法继续进行(见图 5c)。

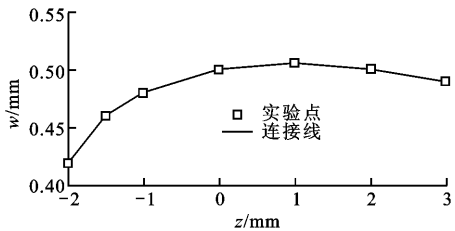
2.4 单层熔覆层厚度的理论模型

为了进一步揭示粉末离焦量对单层熔覆层厚度的影响规律,针对同轴送粉喷嘴的几何结构,建立了激光金属直接制造过程的物理模型。为便于分析,对激光金属直接成形过程做了如下假设:①激光能量要足够大,以保证进入熔池的粉末能够全部被熔化,且粉末进入熔池中不考虑反弹、生成等离子体等因素;②在同轴送粉条件下,粉末场沿喷嘴中心轴线对称,粉末空间浓度以粉末汇聚中心呈高斯分布^[7];③单道熔覆层截面曲线为抛物线^[8],若以熔池中心为坐标原点,则有

$$z = -\frac{4h}{w^2}x^2 + h \tag{2}$$



(a)对厚度的影响



(b)对宽度的影响

图 3 粉末离焦对单道熔覆层形貌的影响

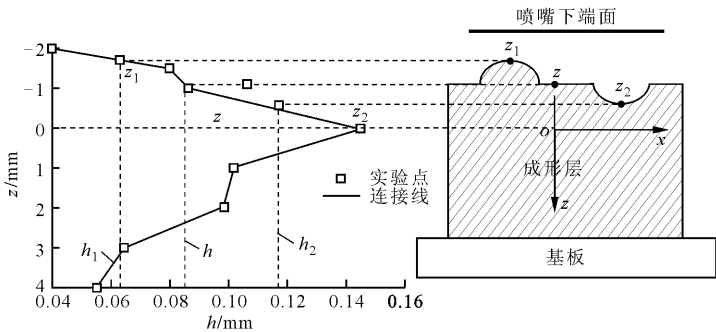
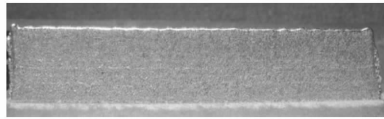
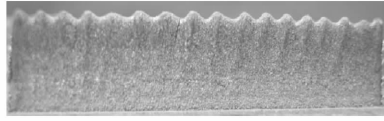


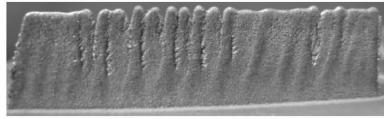
图 4 熔覆成形时的形貌自稳定效应原理图



(a) 负离焦 1.5 mm



(b) 汇聚



(c) 正离焦 1.5 mm

图5 不同粉末离焦下实验成形的单道薄壁墙

根据质量守恒,单位时间内落入熔池的粉末量等于凝固成形的粉末量,即

$$m_1 = m_2 \quad (3)$$

式中: m_1 为单位时间内落入熔池的粉末量; m_2 为单位时间内熔化凝固的粉末量.粉末空间浓度分布函数^[9]为

$$M(x, y, z) = M_0 e^{[-2(x^2 + y^2)/R(z)^2]} \quad (4)$$

$$M_0 = Q_p/V_p S(z), S(z) = \pi R(z)^2 \quad (5)$$

$$R(z) = \begin{cases} R_p - z \tan \theta, & z < 0 \\ R_p + z \tan \alpha, & z > 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: M_0 为比例系数; Q_p 为送粉量; V_p 表示粉末流速.

单位时间内落入熔池粉末的质量可表示为 M 在熔池面域的积分与 V_p 的乘积,即

$$m_1 = V_p \iint_{S_D} M(x, y, z) dx dy = Q_p (1 - e^{-w^2/2R(z)^2}) \quad (7)$$

其熔池面域方程可表示为

$$S_D: x^2 + y^2 = (w/2)^2 \quad (8)$$

由单道熔覆层空间形貌计算

$$m_2 = \rho V = \rho V_s \int_{-w/2}^{w/2} \left(-\frac{4h}{w^2} x^2 + h \right) dx \quad (9)$$

联立式(1)、式(5)和式(6),得出

$$h = \frac{3Q_p(1 - e^{-w^2/2R(z)^2})}{2w\rho V_s} \quad (10)$$

式中: ρ 为材料密度; V_s 为扫描速度; V 为单位时间内单道熔覆层的体积.

由式(9)可以看出,单道熔覆层厚度是关于扫描

速度、送粉量、材料密度、粉末离焦量和熔池宽度的函数.在落入熔池的粉末能全部熔化的条件下, Q_p 与 h 成正比, ρ, V_s 与 h 成反比,但粉末无论是正离焦还是负离焦,都会使 h 减小. w 对 h 的影响比较复杂,一方面熔池宽度增大即落入熔池的粉末增多,使 h 有增大趋势;另一方面,在落入粉末一定的情况下,熔池宽度又与 h 成反比.此外,熔池宽度本身又是关于激光利用率、激光功率、扫描速度、基板初始温度以及材料热物性参数的函数^[10].

2.5 模型验证及应用

为验证模型的合理性,采用实验所用的工艺参数,按式(9)计算得到粉末离焦对单层熔覆层厚度的影响规律曲线.如图6所示,其中单道熔覆层宽度采用实验值.比较图6与图4a可以发现,计算值与实验值存在一定的误差,但两者的总体趋势则保持一致.误差产生的主要原因是:①粉末空间浓度分布函数为近似值,而实际情况较为复杂;②粉末反弹等因素被忽略,而实际中则存在着反弹.

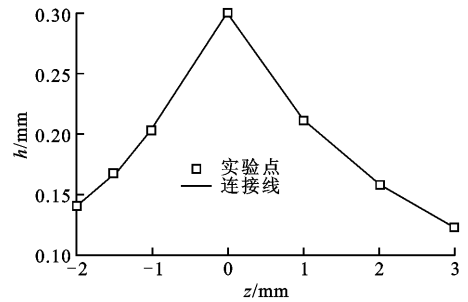
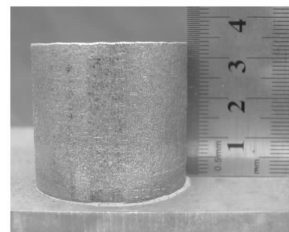


图6 粉末离焦对单层熔覆层厚度的影响

在实际运用中,要选择合适的粉末负离焦量,粉末负离焦量越大,成形过程中的形貌自稳定效应越强,因此可以填平较大的凹陷.当粉末负离焦量过大时,粉末的利用率越低,每一层的熔覆层厚度也会越小,因此牺牲了成形效率.此外,粉末负离焦过大,喷嘴底端距离熔池越近,热辐射现象越严重,易造成堵粉问题.图7是在粉末负离焦 1.5 mm 的条件下成形的薄壁零件,其中薄壁叶片轮廓堆积 520 层, z 轴



(a) 薄壁圆桶



(b) 薄壁叶片轮廓

图7 激光金属直接成形的薄壁零件

增量为 0.08 mm,成形零件高度为 42.6 mm.可以看出,成形零件侧壁表面比较光滑,成形表面平整,测量得不平度约为 0.036 mm.

3 结 论

本文通过对开环控制下激光金属直接成形过程中由工艺参数波动引起的凹凸现象进行深入研究,得到以下结论.

(1)激光离焦主要对单道熔覆层宽度产生影响,熔覆层宽度随着激光离焦量的增大而增大.粉末离焦主要对单道熔覆层厚度产生影响,在粉末汇聚时熔覆层厚度存在一个极大值,熔覆层厚度随负离焦量和正离焦量的增大而减小.

(2)在粉末负离焦条件下,激光金属直接成形过程中存在形貌自稳定效应,即凹陷处粉末负离焦减小,下一层熔覆层厚度相对增加;凸起处粉末负离焦增大,下一层熔覆层厚度相对减小,实现了成形过程的动态自稳定.

(3)建立并实验验证了粉末离焦量与单道熔覆层厚度关系的理论模型,计算结果与实验结果趋势保持一致.运用粉末负离焦时的形貌自稳定效应,在开环系统下制造出了成形表面平整的薄壁零件.

参考文献:

- [1] GARY K L, ERIC S. Practical considerations and capabilities for laser assisted direct metal deposition [J]. Materials and Design, 2000,21(4):417-423.
- [2] 张安峰,李涤尘,卢秉恒. 激光直接金属快速成形技术的研究进展 [J]. 兵器材料科学与工程, 2007,30(5):68-72.
ZHANG Anfeng, LI Dichen, LU Bingheng. Development of research on laser direct metal rapid prototyping technology [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2007,30(5):68-72.
- [3] MAZUMDER J, DUTTA D, KIKUCHN I, et al. Closed loop direct metal deposition: art to part [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2000,34(4/6):397-414.
- [4] 宁国庆,钟敏霖,杨林,等. 激光直接制造金属零件过

程的闭环控制研究 [J]. 应用激光, 2002,22(2):172-176.

NING Guoqing, ZHONG Minlin, YANG Lin, et al. Research about close-loop control system during laser direct manufacturing metallic components [J]. Applied Laser, 2002,22(2):172-176.

- [5] BI G J, GASSER A, WISSENBAACH K, et al. Characterization of the process control for the direct laser metallic powder deposition [J]. Surface and Coatings Technology, 2006,201(6):2676-2683.
- [6] LIU Jichang, LI Lijun. In-time motion adjustment in laser cladding manufacturing process for improving dimensional accuracy and surface finish of the formed part [J]. Optics and Laser Technology, 2004,36(6):477-483.
- [7] LIN J. Concentration mode of the powder stream in coaxial laser cladding [J]. Optics and Laser Technology, 1999,31(3):251-257.
- [8] LIU Jichang. Formation of cross-sectional profile of a clad bead in coaxial laser cladding [J]. Optics and Laser Technology, 2007,39(8):1532-1536.
- [9] ANDREW J P, LI Lin. Modelling powder concentration distribution from a coaxial deposition nozzle for Laser-based rapid tooling [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004,126(2):33-41.
- [10] LIU Jichang. Effects of powder concentration distribution on fabrication of thin-wall parts in coaxial laser cladding [J]. Optics and Laser Technology, 2005,37(4):287-292.

[本刊相关文献链接]

激光偏振特性在微尺度工件激光弯曲成形中的作用. 西安交通大学学报, 2009,43(7):96-100.

光固化快速成型高分辨激光液位检测系统的开发. 西安交通大学学报, 2008,42(11):1394-1397.

同轴送粉喷嘴气固两相流场的数值模拟. 西安交通大学学报, 2008,42(9):1169-1173.

激光照射金纳米微粒靶向细胞对细胞膜通透性的影响. 西安交通大学学报, 2008,42(12):1569-1564.

(编辑 管咏梅)