

激光金属直接成形 DZ125L 高温合金零件工艺的研究

葛江波 张安峰 李涤尘 朱刚贤 路桥潘 贺斌 鲁中良

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要 为了获得表面平整的薄壁零件, 针对 DZ125L 高温合金材料, 采用不同工艺参数组合进行了激光金属直接成形(LMDF)单道熔覆实验, 系统研究了不同工艺参数(如激光功率、扫描速度、送粉率、Z 轴提升量等)对单道熔覆层高度、宽度、宽高比和成形质量的影响规律, 并优化了工艺参数。提出了一种三维表征单道熔覆层能量密度的新方法, 推导出了相应的计算公式, 从宽高比、稀释率和能量密度 3 个方面阐述了获得良好熔覆层和其成形工艺参数之间的相互匹配关系, 为进一步根据设计的熔覆层尺寸来确定工艺参数提供了依据。实验结果表明, 采用优化后的工艺参数成形出的薄壁零件质量明显提高, 表面平整, 无宏观缺陷。

关键词 激光技术; 激光金属直接成形; DZ125L 高温合金; 稀释率; 能量密度; 工艺参数

中图分类号 TF124; TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0703004

Process Research on DZ125L Superalloy Parts by Laser Metal Direct Forming

Ge Jiangbo Zhang Anfeng Li Dichen Zhu Gangxian Lu Qiaopan
He Bin Lu Zhongliang

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University,
Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract In order to obtain smooth surface of thin-walled parts, single-trace cladding experiments are carried out for DZ125L superalloy by laser metal direct forming (LMDF) technology using different combinations of process parameters. Influence of the process parameters (such as laser power, scanning velocity, powder mass flow rate and Z-increment) on height, width, aspect ratio and forming quality of single-trace cladding layer is studied systematically, by which the process parameters are optimized. In order to characterize geometrical features of single-trace cladding layer, a new method of three-dimensional (3D) characterization of energy density is proposed and the corresponding formulas are derived. From aspect ratio, dilution rate and energy density, the matching relationship between good cladding layer and its process parameters is clarified, which provides the foundations for further research into determining the process parameters according to design of cladding layer size. Experimental results show that the forming quality of thin-walled parts is obviously improved with smooth surface and no macro-defect by optimizing the process parameters.

Key words laser technique; laser metal direct forming; DZ125L superalloy; dilution rate; energy density; process parameters

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 350.3850

1 引言

激光金属直接成形(LMDF)技术是 20 世纪 90

年代初期发展起来的一种先进制造技术。该技术集成了激光熔覆技术和快速成型技术的优点,可直接

收稿日期:2011-01-19; 收到修改稿日期:2011-02-25

基金项目:国家 973 计划(2007CB707704)、国家自然科学基金(50675171)及长江学者和创新团队发展计划(PCSIRT0646)资助课题。

作者简介:葛江波(1986-),男,硕士研究生,主要从事激光金属直接成形方面的研究。E-mail:gejiangbo987@126.com

导师简介:张安峰(1956-),男,博士,副教授,主要从事控形控性快速成形制造技术及其精密成形工艺和不锈钢抗菌材料抗菌机理与性能方面的研究。E-mail:zhangaf@mail.xjtu.edu.cn

制造出具有复杂外形和良好力学性能的全密度三维实体金属零件,具有制造速度快、柔性好、生产周期短、成本低等优点,在航空航天、汽车船舶、武器装备、生物医学等领域有着广泛的应用前景^[1~4]。LMDF 技术以直接使用可以承载力学载荷的金属零件为目标,不仅关注其快速成形特性(如成形件的形状和尺寸精度等),而且还关注其优良的力学性能^[3]。然而,要想很好地控制 LMDF 过程中的金属沉积,就要研究金属材料沉积过程及其热影响规律。影响成形件质量的工艺参数主要包括成形工艺(激光功率、扫描速度、送粉率和 Z 轴提升量等)及材料参数(基体和粉末材料的热物性等)。而如何综合考虑这些参数,使其达到工艺最优化和制造过程的稳定性是 LMDF 中的关键技术^[5,6]。单道熔覆层的宽度决定了成形零件的最小特征尺寸,而宽度和高度又相互影响,因此研究各工艺参数对单道熔覆层宽度和高度的影响规律具有重要意义。

目前,DZ125L 高温合金已广泛应用于航空发动机及燃气轮机涡轮叶片,是当前性能水平最高的定向凝固高温合金之一,具有良好的中高温综合性能

表 1 DZ125L 高温合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Composition of DZ125L powder (mass fraction, %)

C	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Ta	B	Ni
0.09	9.70	9.64	2.18	7.14	4.90	3.12	3.78	0.015	Balance

表 2 316L 不锈钢钢板的化学成分(质量分数,%)

Table 2 Composition of 316L stainless steel substrate (mass fraction, %)

C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo	P	S	Fe
0.024	16.75	10.17	0.51	1.53	2.05	0.024	0.003	Balance

2.2 实验步骤

实验平台包括:1 kW Nd:YAG 激光器、三轴联动 CNC 数控工作台、同轴送粉喷嘴、高精度可调送

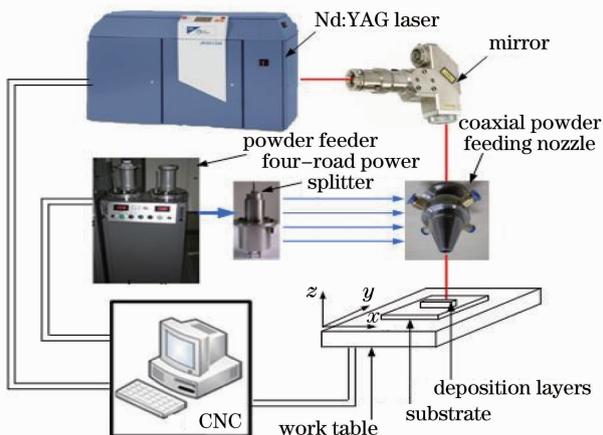


图 1 LMDF 原理示意图

Fig. 1 Schematic of LMDF process

和优异的热疲劳性能^[7~9]。采用 LMDF 技术快速成形叶片已成为研究的热点^[3,10,11]。然而,国内外采用 LMDF 技术所研究的大多是针对不锈钢、常用镍基高温合金、钛合金等材料进行的,采用 LMDF 技术成形 DZ125L 高温合金零件的研究甚少。本文针对 DZ125L 高温合金,研究了 LMDF 过程中激光功率,扫描速度,送粉率、Z 轴提升量等工艺参数对单道熔覆层几何形貌特征尺寸的影响规律。在对单道熔覆层形貌建立数学模型的基础上,提出了一种三维表征单道熔覆层能量密度的新方法,并推导出了相应的计算公式。从宽高比、稀释率和能量密度三个方面并结合实际的熔覆层成形质量,阐述了获得最佳熔覆层和其成形工艺参数之间的相互匹配关系。

2 实 验

2.1 实验材料

实验所用熔覆材料为 DZ125L 高温合金粉末,粉末粒度为-100~+325 目(45~150 μm);基材采用 316L 不锈钢钢板,尺寸为 150 mm×100 mm×8 mm,其化学成分分别如表 1 和表 2 所示。

粉器及其他辅助装置。工作原理如图 1 所示。

实验前将 DZ125L 粉末置于真空干燥箱中,在 150 ℃下保温干燥 24 h,以增强粉末的流动性;基板表面经细砂纸打磨后再用乙醇和丙酮清洗以去除油脂与污渍。实验过程中载气气体和熔池保护气体均采用高纯度氩气。成形过程在自制的简易保护箱中进行(O_2 体积分数小于 2×10^{-4})。

实验所选取的主要工艺参数如表 3 所示。实验后,将单道熔覆层试样沿垂直于扫描方向进行线切割,将横截面清洗打磨抛光后,制成金相样品,用光学显微镜 KEYENCE VH-600 对其高度和宽度进行观察及测量,测量示意图和熔覆层截面形貌分别如图 2 和图 3 所示。每组实验均重复进行 3 次,每一高度值和宽度值取 6 个位置的数据点进行采样,求其平均值,以尽量消除随机因素对实验结果的影响。试样长度 60 mm,每道间距 5 mm。

表 3 激光金属直接成形工艺参数

Table 3 Process parameters of LMDF

Parameter	Value
Laser power P /W	170, 200, 230, 260, 290, 320
Scanning velocity V /(mm/s)	6, 8, 10
Powder mass flow rate M_p /(g/min)	3.6, 4.9, 6.0, 7.3, 8.6
Beam diameter D /mm	0.5
Shielding gas flow rate q /(L/min)	Ar, 3.5
Carrier gas flow rate Q /(L/min)	Ar, 8
Z-increment ΔZ /mm	0.1

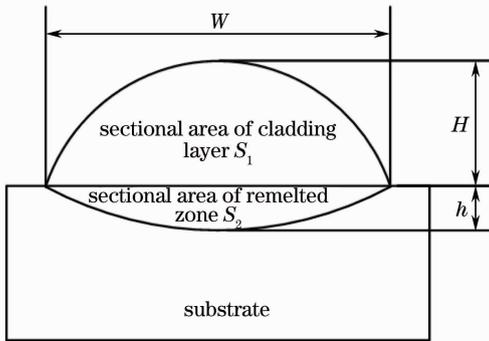


图 2 单道熔覆层测量示意图

Fig. 2 Schematic of cross-sectional single-trace cladding layer

3 实验结果和分析

激光束能量和粉末浓度空间分布均服从高斯分布^[12],从光斑中心到边缘金属粉末的熔化量逐渐减少,典型的单道熔覆层的横截面如图 2 所示。

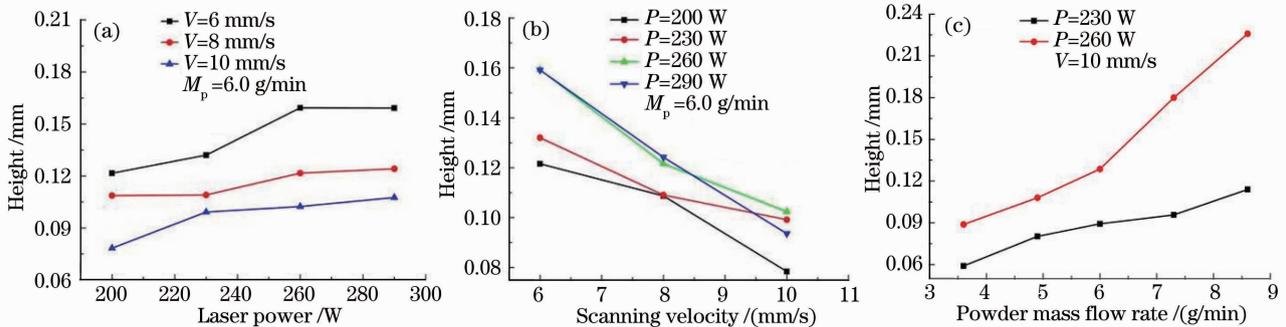


图 4 工艺参数对单道熔覆层高度的影响。(a) 激光功率；(b) 扫描速度；(c) 送粉率

Fig. 4 Influence of the processing parameters on height of single-trace cladding layer. (a) Laser power;

(b) scanning velocity; (c) powder mass flow rate

由图 4(a)可以看出,在一定的激光功率范围内,熔覆层高度随激光功率的增大呈上升趋势。这是因为进入熔池的能量增大,熔池尺寸进而增大,熔池内被熔化的粉末量也增大;但激光功率过大会使

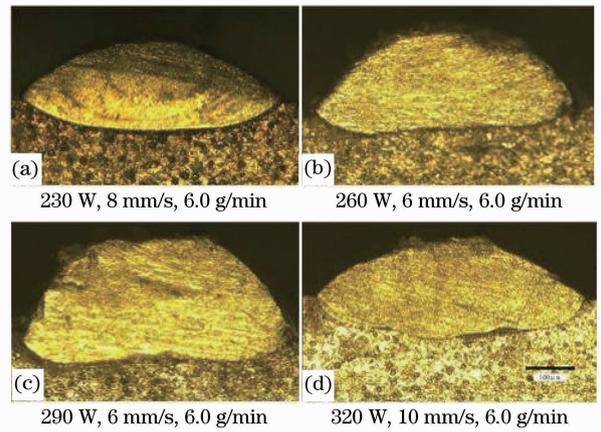


图 3 不同工艺参数下的单道熔覆层截面形貌

Fig. 3 Cross-section morphology of single-trace cladding layer with different process parameters

衡量熔覆层质量的指标很多,如熔覆层高度和宽度、平整度、残余应力、表面是否有裂纹及气孔等。本文以熔覆层高度 H 、宽度 W 、宽高比 $\lambda = W/H$ 、稀释率 η 和能量密度 E 4 个参数为指标来考察单道熔覆层形貌的成形质量。主要研究的工艺参数有:激光功率 P 、扫描速度 V 、送粉率 M_p 、Z 轴提升量 ΔZ 等。选取不同的工艺参数组合进行了 DZ125L 单道熔覆实验。

3.1 工艺参数对单道熔覆层高度的影响

图 4(a)~(c)分别是工艺参数对单道熔覆宽度的影响趋势。图 4(a)为单道熔覆层高度随激光功率的变化趋势;图 4(b)为单道熔覆层高度随扫描速度的变化趋势;图 4(c)为单道熔覆层高度随送粉率的变化趋势。

熔池的深度增大,液态金属表面张力小于其重力,使其向两侧流淌,严重时可能造成过烧或塌陷现象,进而减小熔覆层高度。同时由图 4(b)可以看出,随着扫描速度的增大,单位时间内进入熔池的粉末量减少,

熔覆层高度呈下降趋势。由图 4(c)可以看出熔覆层高度与送粉率近似呈线性关系,熔覆层高度随送粉率的增大而线性增加。

综上所述,激光功率对单道熔覆层高度的影响机理较为复杂,扫描速度和送粉率对单道熔覆层宽度的影响关系相对较为简单,但影响效果比较显著。

3.2 工艺参数对单道熔覆层宽度的影响

单道熔覆层宽度是另一个在 LMDF 技术中较为重要的参数,直接决定了所成形零件的最小壁厚,主要受激光熔池尺寸的制约。工艺参数对单道熔覆层宽度的影响规律如图 5 所示。可以看出,熔覆层宽度随激光功率的增大而增大,随扫描速度的增大

而减小。在激光功率充足的情况下,熔覆层宽度随送粉率的增大而略有增加,最终基本恒定不变。这是因为在激光功率和扫描速度一定的条件下,所能熔化的粉末量是一定的,若再加大送粉率,只会造成进入熔池的粉末量不能完全熔化,造成粘粉,影响熔覆层的成形质量。

相对于单道熔覆层高度来说,单道熔覆层宽度受工艺参数的影响机理相对较为简单,主要受激光功率和扫描速度的影响较大,而送粉率的变化对单道熔覆层宽度的影响不太明显,但总的来说,随着送粉率的增大,熔覆层宽度略有增加。

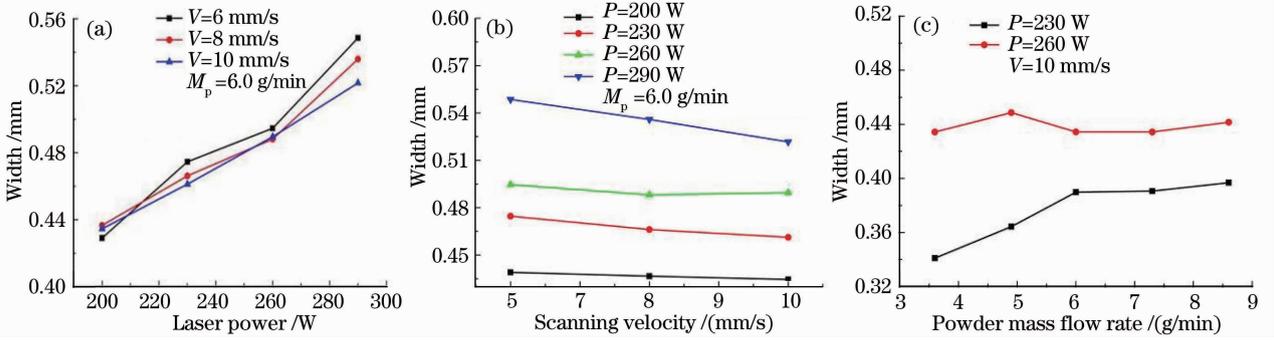


图 5 工艺参数对单道熔覆层宽度的影响规律。(a) 激光功率;(b) 扫描速度;(c) 送粉率

Fig. 5 Influence of the processing parameters on the width of single-trace cladding layer. (a) Laser power; (b) scanning velocity; (c) powder mass flow rate

3.3 Z 轴提升量 ΔZ 对熔覆层形貌的影响

Z 轴提升量 ΔZ 的设定是一个非常重要的工艺参数,影响着成形零件 Z 轴方向的尺寸精度。研究表明 Z 轴的成形精度比 X 轴和 Y 轴要低一个数量级^[13]。文献[14]建立了关于薄壁零件 Z 轴单层行程的计算模型,得到单层行程 ΔZ 是单道熔覆层高度与宽度的函数

$$\Delta Z = \left[\left(\frac{4H^2 + W^2}{8H} \right)^2 \arcsin \frac{4WH}{4H^2 + W^2} - \frac{W(W^2 - 4H^2)}{16H} \right] / W. \quad (1)$$

式中 H 为熔覆层高度, W 为熔覆层宽度。理论上应严格设定 Z 轴提升量 ΔZ(即熔覆一层后 Z 轴提升的距离)与三维零件 CAD 模型分层厚度保持一致,只有这样才能控制沉积方向的误差累积,达到精确控制成形件成形精度的目的。但在实际实验中,由于众多偶然因素的干扰,在开环控制条件下,采用 ΔZ 小于单层熔覆层高度的方式,来保证薄壁零件制造过程的稳定成形,即在粉末负离焦的情况下(即粉末的汇聚点位于工件表面以下),存在所谓的自愈合效应(SRE)^[3,15,16]。(1)式和前期大量实验表明,

当提升量 ΔZ 在 0.08~0.1 mm 时,成形的薄壁零件高度增长均匀,宽度一致。

3.4 激光能量密度对熔覆层形貌的影响

LMDF 过程是一个激光束、金属粉末和基体三者之间相互作用的过程,涉及到粉末场、能量场和保护气流场的耦合。为考虑众多工艺参数对其的影响,引入激光能量密度 E 作为一个综合考察指标来研究工艺参数对熔覆层的影响规律,其表达式为

$$E = \frac{Pt}{DL} = \frac{P}{DV}, \quad (2)$$

然而一般采用(2)式来表征的 E 是指单位面积上熔覆层所受到的激光辐射能量^[17,18]。这种二维表征方法未能准确反映实际熔覆层形貌和其成形工艺参数之间的相互匹配关系。本文在对单道熔覆层形貌建立数学模型的基础上,提出一种三维表征单道熔覆层能量密度的新方法, E 的表达式变为

$$E = \frac{Pt}{AL} = \frac{P}{AV}, \quad (3)$$

式中 V 为扫描速度, D 为光斑直径, P 为激光功率, A 为熔覆层的横截面积, L 为沉积长度, t 为扫描时间。它表征了单位时间内单位体积上的熔覆层所受

到的激光辐射能量。

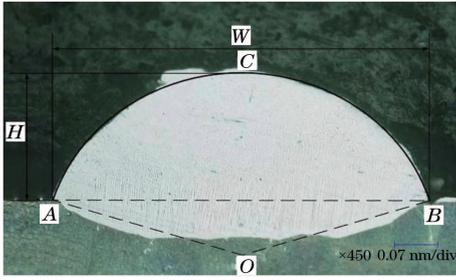


图6 熔覆层形貌数学模型示意图

Fig. 6 Mathematical model of cladding layer profile

首先根据单道熔覆层的实际形貌建立数学模型,并做以下假设:

- 1) 熔覆层横截面形状为理想圆弧;
- 2) 熔覆层起始两端的圆弧部分忽略不计;
- 3) 熔覆层沿扫描方向各横截面形状均相同。

简化的模型如图6所示, O 和 R 分别为熔覆层圆弧所在圆的圆心和半径。则有

$$R = \frac{4H^2 + W^2}{8H}, \quad (4)$$

$$A = S_1 + S_2, \quad (5)$$

$$S_1 = S_{ACB} = S_{fan_AOB} - S_{\Delta AOB} = \left(\frac{4H^2 + W^2}{8H} \right)^2 \arcsin \frac{4WH}{4H^2 + W^2} - \left[\frac{W(W^2 - 4H^2)}{16H} \right]. \quad (6)$$

表4 相关参数的测量结果及计算值

Table 4 Experimental results and calculated values from related parameters

Laser power P/W	Scanning velocity $V/(mm/s)$	Powder feeder rate $M_p/(g/min)$	Width W/mm	Height H/mm	Remelted depth h/mm	Aspect ratio λ	Dilution rate $\eta/\%$	Energy density $E/(J/mm^3)$
200	6	6	0.429	0.122	0.039	3.528	24.2	684.666
200	8	6	0.437	0.109	0.031	4.016	22.4	585.394
200	10	6	0.435	0.078	0.037	5.543	32.3	581.450
230	6	6	0.475	0.132	0.044	3.595	25.0	649.982
230	8	6	0.466	0.109	0.049	4.274	31.1	560.372
230	10	6	0.461	0.099	0.046	4.650	31.6	497.738
260	6	6	0.495	0.159	0.047	3.105	22.7	591.171
260	8	6	0.488	0.122	0.041	4.013	25.4	584.491
260	10	6	0.490	0.102	0.057	4.780	35.6	484.161
290	6	6	0.549	0.159	0.057	3.447	26.5	573.626
290	8	6	0.536	0.124	0.067	4.315	34.9	510.759
290	10	6	0.522	0.094	0.067	5.575	41.7	506.659

由表4和图7可以看出,熔覆层高度、宽度、熔深、宽高比、稀释率及激光能量均随工艺参数的变化而变化。在激光功率和送粉率一定时,能量密度随扫描速度的增大而降低。当激光功率 $P=200\text{ W}$,扫描

根据文献[19]稀释率 η 定义为 $\eta = [S_2/(S_1 + S_2)] \times 100\%$ (其中 S_1 为熔覆层横截面积, S_2 为基体熔化区面积)。此定义式也可以简化为 $\eta = [h/(H+h)] \times 100\%$,其中 h 为基体的熔化深度。则熔覆层的横截面积 A 和能量密度 E 分别为

$$A = S_1/(1 - \eta), \quad (7)$$

$$E = P(1 - \eta)/(S_1V), \quad (8)$$

$$E = P \times (1 - \eta) \left/ \left\{ \left[\left(\frac{4H^2 + W^2}{8H} \right)^2 \arcsin \frac{4WH}{4H^2 + W^2} - \frac{W(W^2 - 4H^2)}{16H} \right] \times V \right\} \right. \quad (9)$$

由(9)式可以看出, E 是关于工艺参数和熔覆层尺寸的函数,与激光功率 P 成正比,与扫描速度 V 和熔覆层横截面积 A 的乘积成反比。而熔覆层的横截面积 A 则是关于熔覆层高度 H 、宽度 W 和熔深 h 的函数。

文献[17]提出在成形镍基高温合金时,获得高质量、高平整度的零件的工艺参数范围比较窄。存在一个合适的激光平均能量密度范围,在此范围内能够以均匀的高度稳定成形。文献[20]研究得出宽高比 λ 必须在一个合理的范围,才能保证成形零件力学性能优良,无气孔、裂纹等宏观缺陷。

依据实验测量值所得到的相应的计算值如表4所示。

速度 $V=8\text{ mm/s}$ 时,稀释率 η 达到最小22.4%。在保证熔覆层与基体形成良好冶金结合的前提下,应尽量降低稀释率来加大熔覆层高度。通过对上述实验结果的系统研究,当宽高比 $\lambda=4\sim 6$ 时,熔覆层表

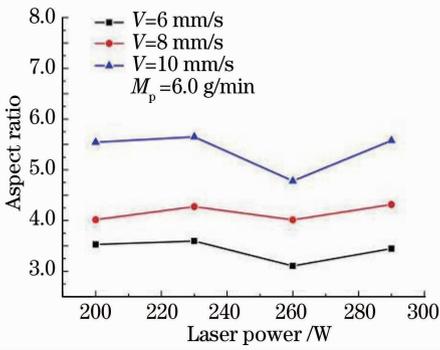


图 7 宽高比与激光功率及扫描速度的相互关系

Fig. 7 Relationship among aspect ratio, laser power and scanning velocity

面比较规整,此时能量密度 $E=480\sim 590\text{ J/mm}^3$ 。这是因为在熔覆宽度 W 一定的条件下,当 $\lambda < 4$ 时,每层截面的台阶效应加剧,使 Z 轴方向的精度降低;当 $\lambda > 6$ 时,重熔深度变大,成形效率低。

经过上述实验确定的最佳工艺参数为:
 激光功率 $P=220\sim 260\text{ W}$;
 扫描速度 $V=8\sim 10\text{ mm/s}$;
 送粉率 $M_p=4.9\sim 7.3\text{ g/min}$;
 Z 轴提升量 $\Delta Z=0.08\sim 0.1\text{ mm}$;
 宽高比 $\lambda=4\sim 6$;
 稀释率 $\eta=22\%\sim 35\%$;
 能量密度 $E=480\sim 590\text{ J/mm}^3$ 。

4 采用优化工艺成形零件

采用优化后的工艺参数制造了薄壁墙和薄壁圆环零件,分别如图 8 和图 9 所示。其中图 8(a)和图 9(a)为优化前的薄壁零件,图 8(b)和图 9(b)为优化后的薄壁零件。成形工艺参数如下:扫描速率 $V=10\text{ mm/s}$,送粉量 $M_p=6.0\text{ g/min}$,激光功率 $P=220\sim 260\text{ W}$,开始阶段激光功率以每 10 层降 10 W 的方式一直降到 220 W,然后保持功率恒定不变。结果表明,成形零件精度较高,表面无肉眼可观察到的宏观缺陷。

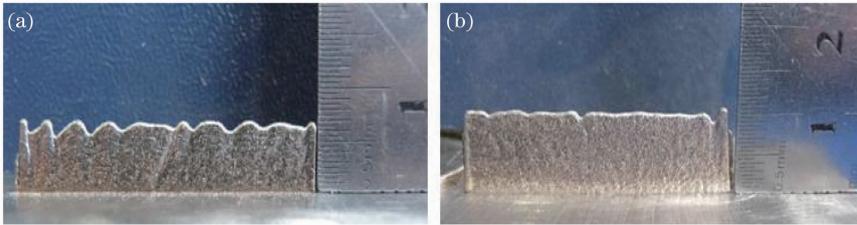


图 8 (a)参数优化前和(b)优化后成形的薄壁墙试样

Fig. 8 Thin wall samples with (a) not-optimized and (b) optimized process parameters

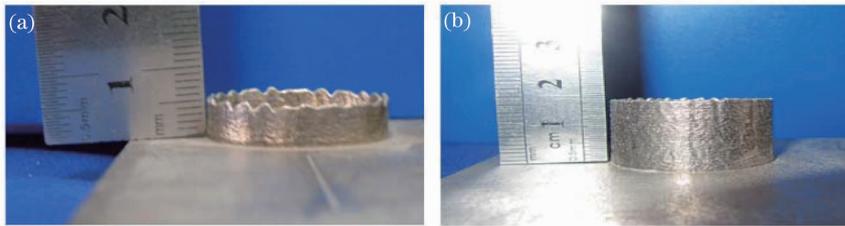


图 9 (a)参数优化前和(b)优化后成形的圆环试样

Fig. 9 Ring samples with (a) not-optimized and (b) optimized process parameters

5 结 论

采用 LMDF 技术对 DZ125L 高温合金材料进行了工艺研究,得到如下结论:

- 1) 扫描速度和送粉率显著影响熔覆层高度;激光功率和扫描速度显著影响熔覆层宽度。
- 2) 为了能准确反映实际熔覆层形貌和其成形工艺参数之间的相互匹配关系,建立了计算激光能量密度的数学模型,得出激光能量密度是关于工艺

参数和熔覆层尺寸的函数。与激光功率 P 成正比,与扫描速度 V 和熔覆层横截面积 A 的乘积成反比。这为后续单道多层成形工艺的选择和深入研究提供了依据。

3) 通过实验得到了优化的工艺参数,实验结果表明,针对 DZ125L 高温合金,根据优化的工艺参数范围成形出的薄壁零件成形质量良好,高度增长均匀,表面无宏观缺陷。验证了确定的工艺参数范围的

正确性及合理性。

参 考 文 献

- 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
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
- Lino Costa, Rui Vilar. Laser powder deposition [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2009, **15**(4): 264~279
- Huang Weidong, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Laser Solid Forming [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007. 1~20
黄卫东,林鑫,陈静等. 激光立体成形[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2007. 1~20
- Zhang Dongyun, Wang Ruize, Zhao Jianzhe *et al.*. Latest advance of laser direct manufacturing of metallic parts[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 18~25
张冬云,王瑞泽,赵建哲等. 激光直接制造金属零件技术的最新进展[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 18~25
- Li Yanmin. Research on Technical Characters and Microstructure of Laser Solid Forming [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2001. 50~58
李延民. 激光立体成形工艺特性与显微组织研究[D]. 西安:西北工业大学, 2001. 50~58
- K. Zhang, W. J. Liu, X. F. Shang. Research on the processing experiments of laser metal deposition shaping[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**: 549~557
- Xu Songhua, Xiao Yang, Li Jian. Organization property researches of the laser repair technology in the helicopter engine turbine oriented implement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2311~2316
徐松华,肖阳,李健. 直升机发动机涡轮导向器激光修复组织性能研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2311~2316
- Zhang Weiguo, Liu Lin, Zhao Xinbao *et al.*. Progress in directionally solidified super alloys[J]. *Foundry*, 2009, **58**(1): 1~6
张卫国,刘林,赵新宝等. 定向凝固高温合金的研究进展[J]. *铸造*, 2009, **58**(1): 1~6
- Tao Chunhu, Zhang Weifang, Shi Huiji *et al.*. Recrystallization of Directionally Solidified Superalloy [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. 1~16
陶春虎,张卫芳,施惠基等. 定向凝固高温合金的再结晶[M]. 北京:国防工业出版社, 2007. 1~16
- L. Xue, M. U. Islam, A. Theriault. Laser consolidation process for the manufacturing of structural components for advanced robotic mechatronic system—a state of art review[C]. Proceeding of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space, Canadian Space Agency, St-Hubert, Quebec, Canada, 2001
- Guijun Bi, Bert Schurmann, Andres Gasser *et al.*. Development and qualification of a novel laser-cladding head with integrated sensors[J]. *International J. Machine Tools & Manufacture*, 2007, **47**(3-4): 555~561
- J. M. Lin. Concentration mode of the powder stream in coaxial laser cladding[J]. *Optics and Laser Technology*, 1999, **31**(3): 251~257
- M. L. Griffith, D. M. Keicher, C. L. Atwood *et al.*. Free form fabrication of metallic components using laser engineered net shaping (LENS™)[C]. Solid Freeform Fabrication Proceedings, 1996, **9**: 125~131
- Zhu Gangxian, Zhang Anfeng, Li Dichen *et al.*. Model of layer thickness of thin-walled parts in laser metal direct manufacturing[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, **31**(8): 57~60
朱刚贤,张安峰,李涤尘等. 激光金属直接制造薄壁零件 Z 轴单层行程模型的研究[J]. *焊接学报*, 2010, **31**(8): 57~60
- G. J. Bi, A. Gasser, K. Wissenbach *et al.*. Investigation on the direct laser metallic powder deposition process via temperature measurement[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2006, **253**(3): 1411~1416
- Pi Gang, Zhang Anfeng, Zhu Gangxian *et al.*. Self-regulation-effect in laser direct metal manufacturing[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, **44**(11): 77~81
皮刚,张安峰,朱刚贤等. 激光金属直接成形中形貌自稳定效应的研究[J]. *西安交通大学学报*, 2010, **44**(11): 77~81
- Li Peng. Direct Laser Fabrication of 3-Dimensional Metal Parts Based on Laser Cladding [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2005. 48~63
李鹏. 基于激光熔覆的三维金属零件激光直接制造技术研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2005. 48~63
- Zhu Gangxian, Zhang Anfeng, Li Dichen. Effect of process parameters on surface smoothness in laser cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 296~302
朱刚贤,张安峰,李涤尘. 激光熔覆工艺参数对熔覆层表面平整度的影响[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 296~302
- Zhang Qingmao, Liu Wenjin, Yang Sen *et al.*. Analysis model of dilution and related factor in process of powder feeding laser cladding [J]. *J. Iron and Steel Research*, 2002, **14**(1): 11~15
张庆茂,刘文今,杨森等. 送粉式激光熔覆稀释率的分析模型及其影响因素[J]. *钢铁研究学报*, 2002, **14**(1): 11~15
- W. Aiyiti, W. H. Zhao, B. H. Lu *et al.*. Investigation of the overlapping parameters of MPAW-based rapid prototyping[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2006, **12**(3): 165~172