

# 激光金属直接成形工艺参数对形貌自愈合能力的影响

杨小虎 张安峰 李涤尘 鲁中良 朱刚贤 贺斌

(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 710049)

**摘要** “形貌自愈合效应”是激光金属直接成形(LMDF)过程中的一个重要现象,在开环控制条件下对提高零件成形精度具有重要作用。为了分析不同材料的形貌自愈合能力,探寻主要影响因素,以指导制定合理成形工艺、提高成形精度,通过正交实验方法,在具有“凸起”特征的基板上,采用激光金属直接成形技术获得了多组单道薄壁试样,分析工艺参数对试样尺寸的影响规律。对 316 L 不锈钢的实验结果表明,激光金属直接成形中不同工艺参数对其形貌自愈合能力的影响有显著差别,其中扫描速度是主要影响因素,其次为激光功率,最后为送粉量。当优化的激光功率、扫描速度、送粉量分别为 240 W、6.0 mm/s、7.3 g/min 时,可以显著提高 316 L 不锈钢形貌自愈合能力,其最大愈合高度超过 1.54 mm、愈合速率为每层 0.038 mm。

**关键词** 激光技术;激光金属直接成形;自愈合效应;正交实验;表面平整度

**中图分类号** TG249;TG39 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0603023

## Influence of Process Parameters on Self-Healing Ability in Laser Metal Direct Forming

Yang Xiaohu Zhang Anfeng Li Dichen Lu Zhongliang Zhu Gangxian He Bin

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

**Abstract** "Self-healing effect" is one of the important phenomena in laser metal direct forming (LMDF) process, and plays an important role in improving the forming quality of parts under open-loop control. In order to study the self-healing ability of different materials, reveal main influencing factors, and provide guidance for formulating correct forming process to improve the forming precision, orthogonal experiment is designed to fabricate several thin-walled parts on substrate with "convex" characteristics in LMDF, and the influence of process parameters on sample dimension is analyzed. The experimental results on 316 L stainless steel show that the influence of different process parameters on the self-healing ability varies significantly; the traverse speed is the most important factor, the laser power next, and then the powder mass flow rate. The 316 L stainless steel self-healing ability can be improved remarkably when using optimized laser power, traverse velocity, and powder mass flow rate as 240 W, 6.0 mm/s, and 7.3 g/min, respectively. The maximum self-healing height exceeds 1.54 mm and the self-healing rate is 0.038 mm per layer.

**Key words** laser technique; laser metal direct forming; self-healing effect; orthogonal experiment; surface smoothness

**OCIS codes** 350.3390; 160.3900; 350.3850

**收稿日期**: 2011-03-24; **收到修改稿日期**: 2011-04-24

**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**: 杨小虎(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: yangxiaohu.agency@163.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等方面的研究。E-mail: zhangaf@mail.xjtu.edu.cn

# 1 引 言

激光金属直接成形(LMDF)技术基于快速成形与激光熔覆技术,是一种无需模具和刀具,可直接把CAD模型转化为复杂金属零件的先进制造技术。由于它具有热影响区小、致密度高、力学性能好、显微组织细小等优点,尤其适用于复杂结构零件的近净成形,因而是目前国内外材料成形领域的研究热点之一<sup>[1~7]</sup>。

LMDF 过程中的“形貌自愈合效应”是指在成形过程中由于基体表面凹凸不平,使得喷嘴与基体相对距离发生动态变化,直接影响了粉末流场在熔池区域的汇聚性,进而影响进入熔池的粉末质量,但是在足够大激光能量以及粉末负离焦条件下,试样表面凹陷位置的熔覆层堆积速率大于凸起位置,促使基体成形表面趋于平整。黄卫东等<sup>[8]</sup>首先提出形貌自愈合概念并从抬升量与堆积厚度方面解释了形貌自愈合,皮刚等<sup>[9]</sup>通过理论分析和实验研究得出产生形貌自愈合的条件,即在粉末负离焦条件下成形且激光输入能量充足,Li 等<sup>[10]</sup>利用形貌自愈合制造出成形精度很高的复杂薄壁镍基合金零件。但是,他们没有深入开展自愈合效应的定量分析,尚不清楚主要影响因素。

为了定量分析不同工艺参数对 316 L 不锈钢形貌自愈合能力的影响并确定其中的显著影响因素,在前人研究的基础上<sup>[11~16]</sup>,选取与 LMDF 成形质量密切相关的 3 个主要工艺参数,即激光功率、扫描速度和送粉量,通过正交实验分析它们对 316 L 不锈钢形貌自愈合能力的影响规律,以期指导和优化工艺参数。本文设计的实验可以用来分析不同材料的形貌自愈合能力大小和指导制定优化工艺参数组合。

# 2 实 验

## 2.1 实验设备与材料

实验在西安交通大学激光金属直接成形系统(LMDF-1000A 型)上进行,实验设备包括 Nd:YAG 激光器、三轴联动工作台、送粉器、同轴送粉喷嘴及辅助装置等。利用美国 Faro P12-7 关节激光扫描测量仪测量试件尺寸。

实验中使用的金属粉末与基板材料均为 316 L 不锈钢,粉末粒度 30~45 μm,基板几何尺寸 140 mm×70 mm×10 mm。实验前,将粉末在 130 ℃进行 6 h 真空烘干以去除水分,基板经过打磨后,先用丙酮去油污再用乙醇清洗。

## 2.2 实验步骤

首先沿基板  $x$  方向采用 LMDF 技术成形 10 组不同熔覆层数的凸起熔覆道,熔覆层数由 1 层开始依次递增 1 层,长度为 90 mm,熔覆道间距 6 mm,如图 1(a)所示。为了分析 316 L 不锈钢形貌自愈合能力及影响因素,选用  $L_9(4^3)$  正交实验表进行 9 组优化实验。每组实验沿基板  $y$  方向(与凸起垂直方向)成形 10 组不同熔覆层数熔覆道,熔覆层数由 5 层开始依次递增 5 层,长度为 70 mm 熔覆道间距 3 mm,如图 1(b)所示。在每个基板上完成 3 组实验。

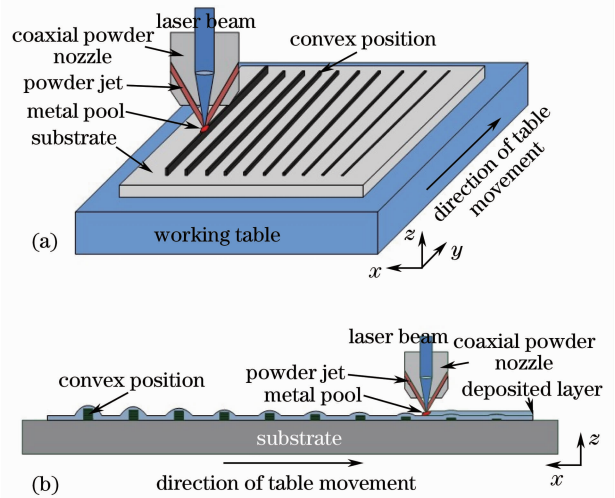


图 1 实验方法示意图。(a) 立体图,(b) 截面图  
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental method  
(a) stereogram, (b) cross section graph

表 1 正交实验顺序及工艺参数范围

Table 1 Orthogonal test order and process parameters

| Test number | Laser power $P$ /W | Traverse speed $V$ /(mm/s) | Powder mass flow rate $Q_p$ /(g/min) |
|-------------|--------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| 1           | 260                | 10                         | 7.3                                  |
| 2           | 260                | 8                          | 6.0                                  |
| 3           | 260                | 6                          | 4.9                                  |
| 4           | 240                | 10                         | 6.0                                  |
| 5           | 240                | 8                          | 4.9                                  |
| 6           | 240                | 6                          | 7.3                                  |
| 7           | 220                | 10                         | 4.9                                  |
| 8           | 220                | 8                          | 7.3                                  |
| 9           | 220                | 6                          | 6.0                                  |

采用美国 Faro P12-7 关节激光扫描测量系统测量不同工艺条件下成形的薄壁试件尺寸,并计算在凸起处顶端表面波峰与两侧波谷之间的最大差值(即表面平整度  $S$ ,定义如图 2 所示)。因为薄壁试件的熔覆高度差已经超出粗糙度测量范围,所以用表面平整度变化来衡量形貌自愈合能力的大小<sup>[12]</sup>。



图 2 表面平整度  
Fig.2 Surface smoothness

### 3 结果与讨论

根据上述正交实验方案进行 9 组实验,由于熔覆层数都是按一定的差值递增的,所以可以定量分

析 316 L 不锈钢形貌自愈合能力。对照实物图 3 与轮廓信息图 4 均可直观地看出,开始熔覆时在基板上人为制造的 10 组凸起处熔覆高度大于其两侧(左右各 2 mm 范围内),但随着熔覆层数的不断增加,相应的高度差不断减小,直至最终消除。

图 4 为用三维测量仪测得的 9 组薄壁试件上表面轮廓尺寸,更直观地体现出 LMDF 形貌自愈合的发展过程。

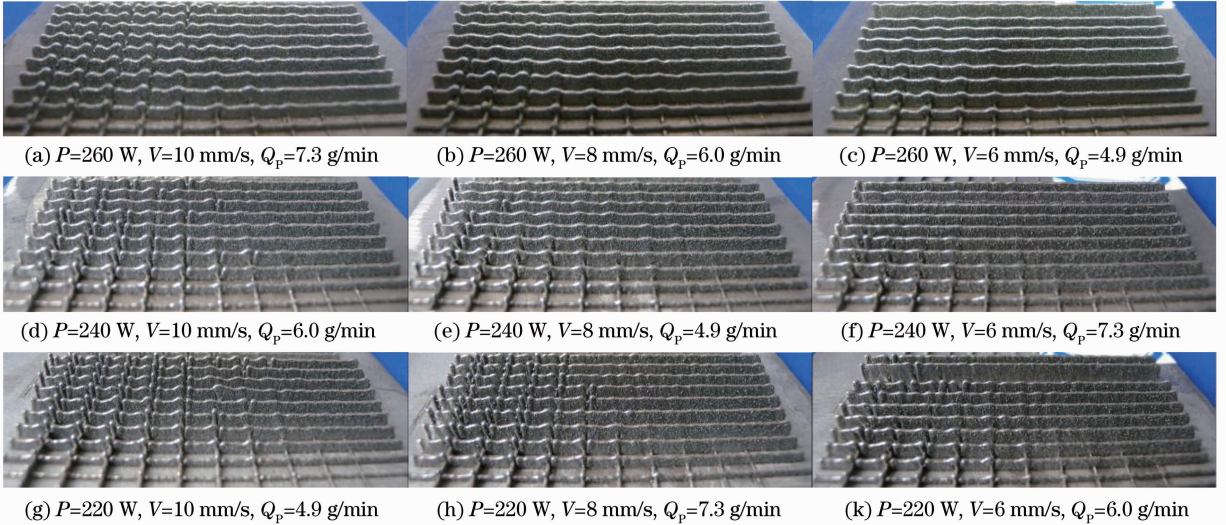


图 3 不同工艺参数下 LMDF 工艺成形试样

Fig.3 Samples formed in LMDF with different process parameters

#### 3.1 影响因素与试样轮廓曲线直观分析

定义当表面平整度  $S < 0.2$  mm 时实现愈合。用最大愈合高度  $H$  和自愈合速率  $\eta$  来表征自愈合能力大小。最大愈合高度是指在不同工艺条件下所能消除的最大凹凸不平高度差。自愈合速率是指每一熔覆层数内消除的凹凸不平高度差,可表示为

$$\eta = \frac{S_1 - S_n}{n}, \quad (1)$$

式中  $S_1$  为初始位置表面平整度(计算方法在图 2 中定义) $S_n$  为熔覆  $n$  层后的表面平整度,其中  $n$  为熔覆层数,取正整数。

不同工艺参数组合下,最大愈合高度  $H$  和愈合速率  $\eta$  显著不同,如图 5 所示,从图中可以看出第 6 组试样  $H$  和  $\eta$  值均为最大,表明其自愈合能力最强。当凹凸不平差值超过这组工艺参数组合下的愈合能力时,高度差不但不能消除,反而会在薄壁试件交叉处出现“开裂”缺陷,如图 6 所示,对比分析图 3~5 发现,相同高度差条件下激光功率和送粉量不变时,扫描速度越高,“开裂”缺陷越容易出现。

对图 5 中正交实验结果进行极差直观分析,亦

可以准确得出不同工艺参数对形貌自愈合能力的影响规律,如图 7 所示。从图 7(a),(b)中得出 3 个工艺参数与形貌自愈合能力之间的关系:对于最大愈合高度,激光功率极差为 0.28,扫描速度极差为 0.93,送粉量极差为 0.16;对于实现愈合时的愈合速率,激光功率极差为 0.0023,扫描速度极差为 0.0167,送粉量极差为 0.0019。无论是最大愈合高度还是实现愈合时的愈合速率,扫描速度的极差最大,是影响最大的因素,激光功率极差次之,送粉量极差最小。因此,不同因素对形貌自愈合能力的影响由大到小依次为扫描速度、激光功率和送粉量。综合考虑最大愈合高度与愈合速率影响因素,得出优化工艺参数组合为激光功率 240 W、扫描速度 6 mm/s 和送粉量 7.3 g/min,也就是第 6 组试样工艺参数组合。从第 6 组试样的实物图和轮廓信息图可以直观地看出其成形质量较好。

#### 3.2 分析与讨论

如图 8 所示,以粉末汇聚中心为原点建立  $xOz$  坐标系,以激光熔池所在位置纵向为  $z$  轴。由参考文献[9]可知,LMDF 单层熔覆层厚度  $h$  的理论模

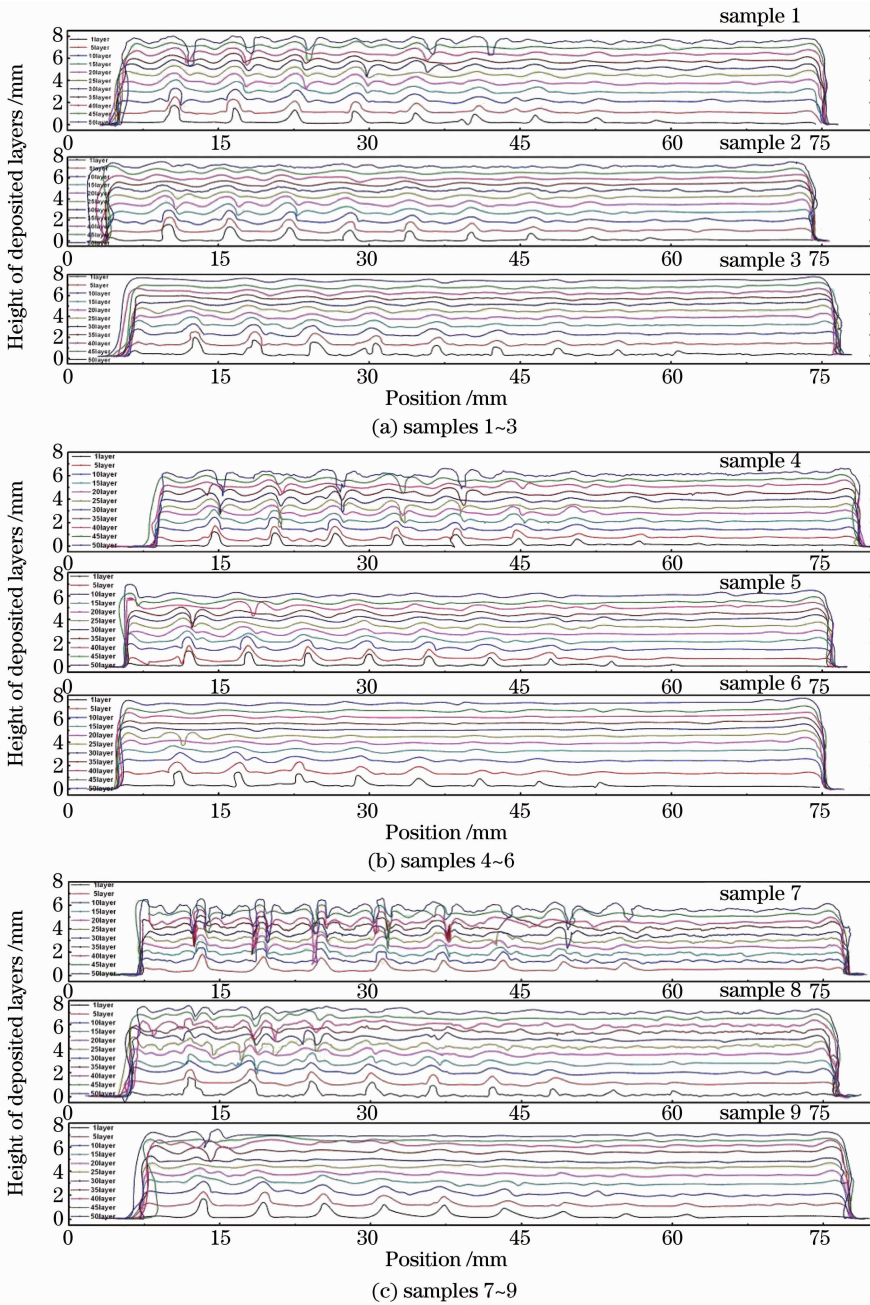


图 4 试样轮廓曲线扫描结果

Fig. 4 Scanning results of sample outlines

型为

$$h = \frac{3Q_p \{1 - \exp\{-\omega^2/[2R(z)]\}\}}{2\omega\rho V}, \quad (2)$$

式中  $Q_p$  为送粉量,  $V$  为扫描速度,  $\rho$  为材料密度,  $\omega$  为熔覆层宽度,  $R(z)$  为任意离焦位置粉末流外边缘到粉末流中心的距离, 可表示为

$$R(z) = \begin{cases} R_p - z \tan \theta, & (z < 0) \\ R_p + z \tan \alpha, & (z > 0) \end{cases} \quad (3)$$

式中  $R_p$ ,  $\alpha$  和  $\theta$  的定义如图 8 所示。

由于成形件上表面轮廓存在凹凸不平, 使得

$R(z)$  值发生改变, 因此单层堆积速率在凹凸不平处会出现差异。用参数  $\Delta h$  表示同层不同位置  $a, b$  处熔覆层厚度差值, 同层内工艺参数相同, 熔覆宽度  $\omega$  变化很小可以忽略, 由(2)式可得

$$\Delta h = h_a - h_b = \frac{3Q_p}{2\omega\rho V} \{ \exp\{-\omega^2/[2R(z_a)]^2\} - \exp\{-\omega^2/[2R(z_b)]^2\} \}. \quad (4)$$

$\Delta h$  的绝对值越大, 说明  $a, b$  两点的单层熔覆层厚度差值越大, 相应的不平整度越容易消除, 形貌自愈能力也越强。从图 4 轮廓信息中提取每组试件在最

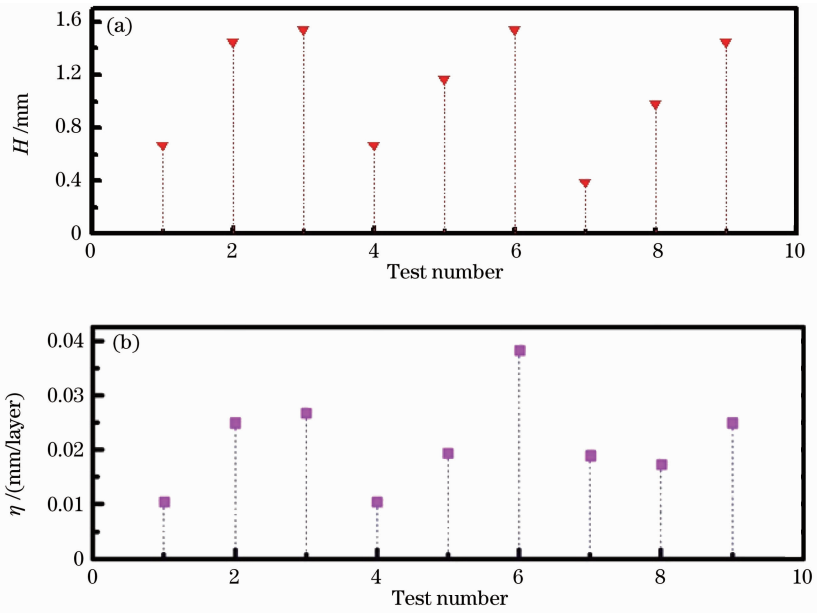


图 5 各组试样最大愈合高度(a)与实现愈合时愈合速率(b)

Fig. 5 Maximum self-healing height (a) and self-healing rate (b) for samples 1~9

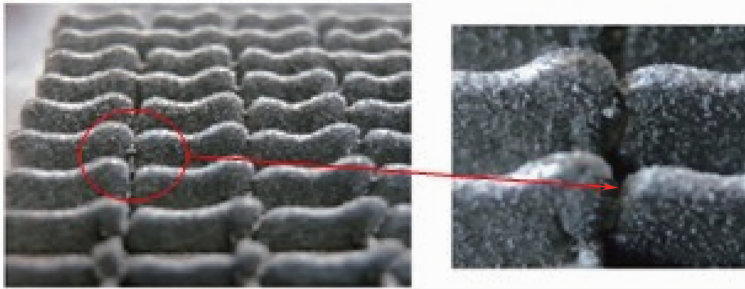


图 6 开裂缺陷

Fig. 6 Crack defects

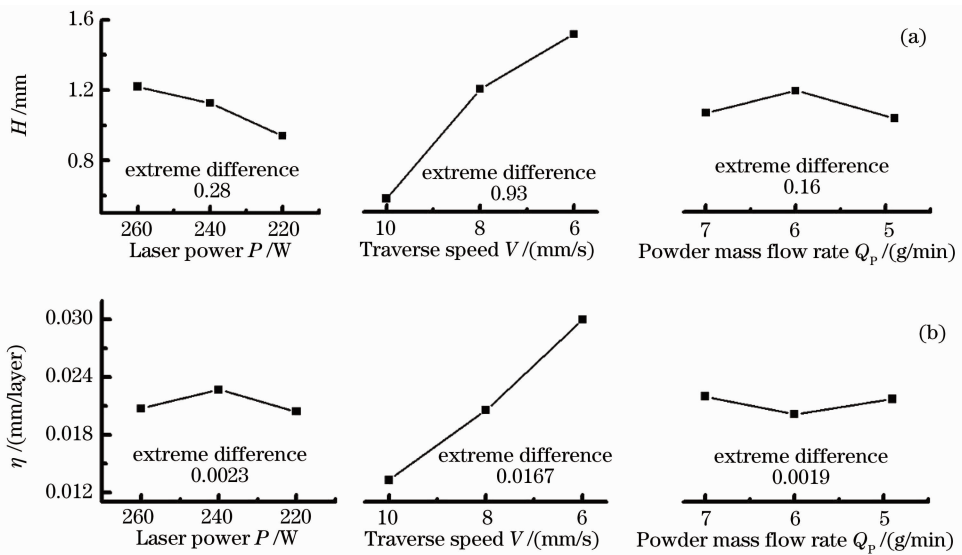


图 7 工艺参数水平与最大愈合高度(a)及实现愈合时愈合速率(b)的关系

Fig. 7 Maximum self-healing height (a) and self-healing rate (b) versus process parameters

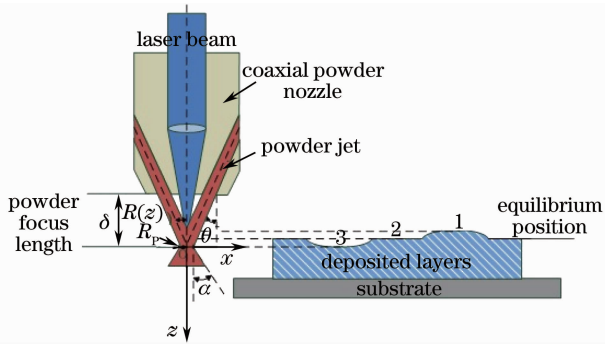


图 8 形貌自愈合效应原理

Fig. 8 Principle of self-healing effect

大凸起处的平整度,并计算在不同工艺参数下表面平整度与愈合速率的变化规律,结果如图 9 所示。由(4)式可知,在其他条件不变的情况下,Δh与扫描

速度成反比关系,扫描速度越低,不同位置处熔覆层之间的差值就越大,不平整度减小得也越快,如图 9(a)所示。激光功率主要影响熔覆层宽度 w,二者成正比关系。在其他条件不变的情况下,Δh与激光功率成反比关系,随激光功率的减小而增大,相应的不平整度也减小得更快。但实际实验结果是随着激光功率的减小,不平整度先减小,随后又有增大的趋势。原因是当激光输入能量过小时不足以熔化进入熔池的全部金属粉末,多余的粉末没有融化,反而在交叉处容易出现裂纹,进入熔池的粉末进一步减少,使得不平整度在交叉处有增大的趋势,如图 9(b)所示。在其他条件不变的情况下,Δh与送粉量成正比关系,随送粉量的增加而增大,相应的不平整度也减小得更快,如图 9(c)所示。

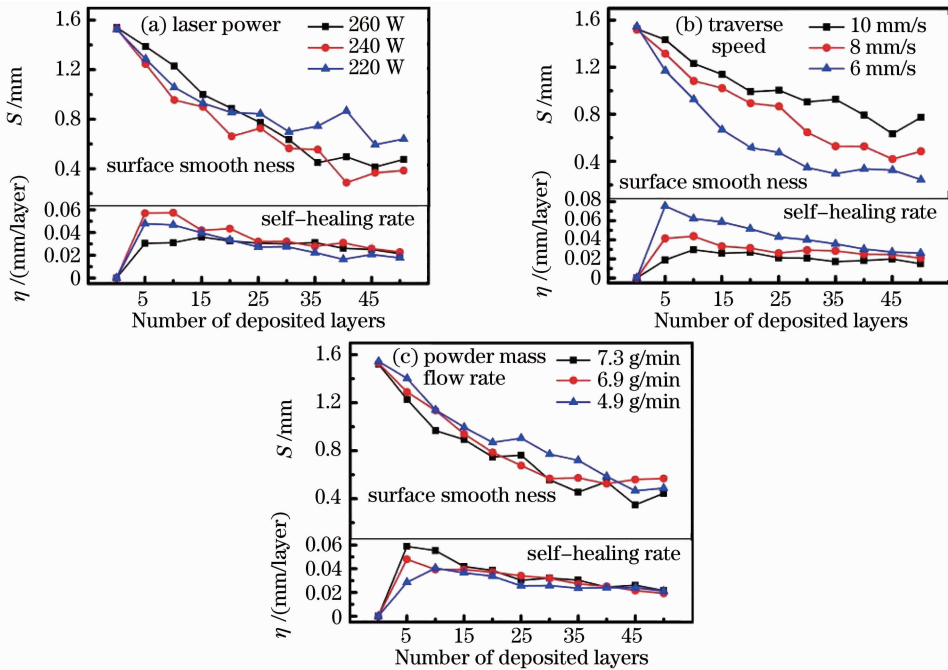


图 9 工艺参数与表面平整度及愈合速率变化规律关系

Fig. 9 Variation of surface smoothness and self-healing rate with the change of process parameters

## 4 结 论

1) 通过实验方法研究了不同工艺参数对自愈合能力的影响规律,可以用来分析不同材料在 LMDF 中形貌自愈合能力大小,并且能够指导制定优化工艺参数,有效提高成形零件的表面平整度。

2) 在 316 L 不锈钢 LMDF 过程中,不同工艺参数对其形貌自愈合能力影响明显不同,其中影响最大的工艺参数是扫描速度,其次为激光功率,最后为送粉量。当优化后工艺参数激光功率、扫描速度和

送粉量组合为 240 W、6.0 mm/s 和 7.3 g/min 时,可以显著提高 316 L 不锈钢 LMDF 的形貌自愈合能力,最大愈合高度超过 1.54 mm、愈合速率为每层 0.038 mm。

## 参 考 文 献

1 Zhang Anfeng, Li Dichen, Lu Bingheng. Research process in laser direct metal rapid prototyping technology[J]. *Ordinance 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

- 2 Zhong Minlin, Ning Guoqing, Liu Wenjin. Research and development on laser direct manufacturing metallic component [J]. *Laser Technology*, 2002, **26**(5): 388~391  
钟敏霖, 宁国庆, 刘文今. 激光熔覆快速制造金属零件研究与发展[J]. *激光技术*, 2002, **26**(5): 388~391
- 3 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
- 4 Edson Costa Santos, Masanari Shiomu, Kozo Osakada *et al.*. Rapid manufacturing of metal components by laser forming [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, **46**(12-13): 1459~1468
- 5 X. Wu, J. Mei. Near net shape manufacturing of components using direct laser fabrication technology [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2003, **135**(2-3): 266~270
- 6 Zhong Minlin, Yang Lin, Liu Wenjin *et al.*. Laser direct manufacturing W/Ni telescope collimation component [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4): 482~486  
钟敏霖, 杨林, 刘文今等. 激光快速直接制造 W/Ni 合金太空望远镜准直器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4): 482~486
- 7 Vamsi Krishna Balla, Partha P. Bandyopadhyay, Susmita Bose *et al.*. Compositionally graded yttria-stabilized zirconia coating on stainless steel using laser engineered net shaping (LENSTM) [J]. *Scripta Materialia*, 2007, **57**(9): 861~864
- 8 Huang Weidong, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Laser Solid Forming [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007. 10~20  
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. 10~20
- 9 Pi Gang, Zhang Anfeng, Zhu Gangxian *et al.*. Self-healing-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愈合效应研究[J]. *西安交通大学学报*, 2010, **44**(11): 77~81
- 10 Li Peng, Ji Shengqin, Zeng Xiaoyan *et al.*. Direct laser fabrication of thin-walled metal parts under open-loop control [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, **47**(6): 996~1002
- 11 Hua Tan, Jing Chen, Fengying Zhang *et al.*. Process analysis for laser solid forming of thin-wall structure [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2010, **50**(1): 1~8
- 12 Zhu Gangxian, Zhang Anfeng, Li Dichen. Optimization of process parameters for laser cladding based on Nd:YAG [J]. *Applied Laser*, 2009, **29**(5): 388~392  
朱刚贤, 张安峰, 李涤尘. 基于 Nd:YAG 的激光熔覆工艺参数的优化[J]. *应用激光*, 2009, **29**(5): 388~392
- 13 Yu Jun, Chen Jing, Tan Hua *et al.*. Effect of process parameters in the laser rapid forming on deposition layer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 1014~1018  
于君, 陈静, 谭华等. 激光快速成形工艺参数对沉积层的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 1014~1018
- 14 Yang Xichen, Lei Jianbo, Liu Yunwu *et al.*. Experimental measurement of metal powder stream concentration field in laser manufacturing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7): 993~997  
杨洗陈, 雷剑波, 刘运武等. 激光制造中金属粉末流浓度场的检测[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7): 993~997
- 15 Lu Qiaopan, Zhang Anfeng, Li Dichen *et al.*. Numerical simulation and experimental research on gas-carrier coaxial powder nozzle [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3162~3167  
路桥潘, 张安峰, 李涤尘等. 载气式同轴送粉喷嘴的数值模拟及实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 3162~3167
- 16 Pi Gang. Research on the Forming Process of 316L Stainless Steel Parts Fabricated by Laser Direct Metal Forming [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2010  
皮刚. 激光金属直接成形 316L 不锈钢零件的工艺研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2010