

文章编号: 0258-7025(2007)07-1014-05

激光快速成形工艺参数对沉积层的影响

于君, 陈静, 谭华, 黄卫东

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 引入回归正交设计(ORD)方法, 利用逐步回归模型得到了激光快速成形(LRF)工艺参数以及它们之间的交互作用对沉积层尺寸影响显著的因素。其中, 对沉积层高度影响显著的因素是送粉率和扫描速度, 对单道沉积宽度影响显著的因素是光斑直径、扫描速度、激光功率与光斑直径的交互作用。同时也得到了主要影响因素与沉积层尺寸的定量关系, 并验证了其准确性。

关键词 材料; 激光快速成形; 回归正交设计; 工艺参数; 回归分析

中图分类号 TN 249; TG 665 **文献标识码** A

Effect of Process Parameters in the Laser Rapid Forming on Deposition Layer

YU Jun, CHEN Jing, TAN Hua, HUANG Wei-dong

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract The most effective factors to the dimensions of deposit layers in the laser rapid forming (LRF) processing have been achieved through using orthogonal regression design (ORD) and regression analysis method. The most effective factors on the height of deposition layer are powder feeding rate and scanning velocity. And the most effective factors on the width are spot diameter, scanning velocity, and interaction between laser power and spot diameter. The approximate relations between the deposition layer dimensions and their most effective factors are obtained and validated.

Key words materials; laser rapid forming; orthogonal regression design; process parameters; regression analysis

1 引言

激光快速成形(LRF)技术^[1~3]是在快速原型技术的基础上结合同步送粉激光熔覆技术发展起来的一项高新制造技术。在激光快速成形过程中, 为了得到几何性能(几何形状、尺寸精度、表面粗糙度等)和力学性能(强度、塑性等)均达到预期设计要求的三维实体零件, 成形系统需要在加工过程中随工艺条件的改变而作出适当的调整。近年来, 国内外一些研究机构已经开始致力于基于实时监测技术的闭环控制系统的研究^[4~7]。

激光快速成形是受多个参数影响的加工过程。

激光功率、扫描速度、送粉率、光斑直径以及保护气体流量等工艺参数都会对之产生影响。因此, 为了实现对成形过程的控制, 首先必须对影响成形质量的因素进行筛选, 确定显著因素。同时, 要想精确控制沉积层尺寸等成形效果, 需获得显著因素与沉积层几何尺寸等之间的定量关系, 这是实现实时监测闭环反馈控制的基础。

本文引入了回归正交设计(ORD)来研究各种工艺参数对沉积层尺寸影响的显著性, 这一实验方法综合了正交实验设计和回归分析二者的优势, 能够在短时间内用较少的实验建立一个精度较高、统

收稿日期: 2006-11-30; 收到修改稿日期: 2007-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(50331010)资助项目。

作者简介: 于君(1981—), 女, 山东人, 博士研究生, 主要从事激光加工及成形的控制研究。

E-mail: yj8511413@mail.nwpu.edu.cn

导师简介: 黄卫东(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 目前从事激光加工理论与技术方面的研究。

E-mail: huang@nwpu.edu.cn

计性较好的回归模型,并解决实验优化的问题。应用统计产品与服务解决方案软件(SPSS)对实验结果进行了分析,并对建立的模型进行了分析和验证。

2 实 验

实验是在凝固技术国家重点实验室建立的激光快速成形系统上完成的,该系统由功率为5 kW的连续 CO₂ 激光器、四轴联动数控工作台、高精度可调送粉器以及同轴送粉喷嘴组成。

粉末材料采用颗粒度为-100~+325 目的 316L 不锈钢,基材采用 45# 钢。实验前将粉末置于真空容器中,在150 ℃下保温干燥24 h,基材表面用细砂纸打磨并用丙酮清洗干净。实验过程中采用氩气作为熔池保护气氛,实验后用游标卡尺测量沉积层高度和宽度,并记录实验结果。

为了考察工艺参数对沉积层尺寸影响的显著性,设计 15 因素两水平的回归正交实验。所选择的

因素包括激光功率、扫描速度、送粉率、光斑直径、保护气体流量以及它们之间的交互作用。需要注意的是,应根据回归正交实验的特点,保证激光功率密度满足基本要求,以提高沉积效果,降低测量误差。因此,根据以往的实验经验和已知的成形规律,选取实验所采用的工艺参数为:激光功率(P) 1710~2300 W,扫描速度(V) 200~400 mm/min,送粉率(F) 7.5~14.3 g/min,光斑直径(D) 1.5~3 mm,保护气体流量(Q) 5.0~10.0 L/min。表 1 所示为无因次编码转化后的回归正交实验表。激光快速成形过程中,首先在基材上沿工作台 x 方向单道沉积一层,然后沿 y 轴方向移动50 mm,在相同的工艺参数下单道沉积两层,之后再沿 y 轴移动50 mm,单道沉积三层。在前面的研究工作中发现^[8],采用确定的一组工艺参数时,单道沉积五层后熔池温度趋于稳定,因此实验在单道沉积五层后结束。为了确保每一层的沉积条件相同,实验过程中单层行程 Δz 和单层沉积高度保持一致。

表 1 无因次编码转化回归正交实验设计

Table 1 Orthogonal regression design of nondimensional code

Experiment number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	P	V	$P \times V$	D	$P \times D$	$V \times D$	$F \times Q$	F	$P \times F$	$V \times F$	$D \times Q$	$D \times F$	$V \times Q$	$P \times Q$	Q
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
3	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
4	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
6	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
7	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
8	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1
9	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
10	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
11	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
12	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1
13	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
14	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1
15	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
16	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3 结果与讨论

在显著性概率为 95%的前提下,采用统计产品与服务解决方案软件逐步回归模型,分析了工艺参数及其交互作用对一层到五层沉积高度和单道沉积

宽度的影响以及它们之间的函数关系式。分析结果为($[V]$, $[F]$, $[D]$, $[P]$ 代表回归正交实验设计中无因次编码后的工艺参数):

$$Hc_1 = 0.577 - 0.165[V] + 0.0391[F],$$

$$Hc_2 = 1.002 - 0.284[V] + 0.166[F],$$

$$Hc_3 = 1.414 - 0.384[V] + 0.319[F],$$

$$Hc_4 = 1.804 - 0.460[V] + 0.393[F],$$

$$Hc_5 = 2.270 - 0.569[V] + 0.496[F],$$

$$W = 1.890 + 0.215[D] - 0.138[V] - 0.118[P] \times [D],$$

经回代计算后的函数关系为

$$Hc_1 = 0.646 - 0.00165V + 0.0391F,$$

$$Hc_2 = 1.322 - 0.00284V + 0.0488F,$$

$$Hc_3 = 1.543 - 0.00384V + 0.0938F,$$

$$Hc_4 = 1.924 - 0.00460V + 0.1156F,$$

$$Hc_5 = 2.387 - 0.00569V + 0.1459F,$$

$$W = -0.184 + 1.2895D - 0.0013V + 0.0011P - 0.0005P \times D,$$

由此可见,在显著性概率 95%的条件下,对沉积高度影响最显著的工艺参数是 V ,其次是 F ;对沉积宽度影响最显著的是 D ,其次是 V ,最后是 P 和 D 的交互作用。

表 2 为实验结果拟合过程小结。Model 为回归模型编号, R 为回归方程的复相关系数, R square 为判定系数, Adjust R square 为调整的判定系数, Std. error of the estimate 为回归方程的估计标准误差。依据表 2 可以进行拟合优度检验。由判定系数 R^2 和调整 R^2 值可以看出建立的回归方程拟合优度较好。

表 3 为方差分析表。它显示了拟合过程中每一
表 2 单层高度拟合过程小结

Table 2 Height^c model summary of single layer

Model	R	R square	Adjusted R square	Std. error of the estimate
1	0.624 ^a	0.390	0.352	0.20645
2	0.801 ^b	0.641	0.593	0.16352

a. predictors: (constant), V ; b. predictors: (constant), V , F ;
c. dependent variable: Hc_1 .

表 4 单层沉积高度回归系数分析

Table 4 Height regression coefficients^a of single layer

Model	Unstandardized		Standardized	t	Sig.	Collinearity
	B	Std. error	Beta			Tolerance
1 (constant)	0.577	0.049		11.862	0.00	
V	-0.165	0.052	-0.624	-3.197	0.00	1.000
2 (constant)	0.577	0.039		14.977	0.00	
V	-0.165	0.041	-0.624	-4.036	0.00	1.000
F	0.133	0.041	0.501	3.241	0.00	1.000

a. dependent variable: Hc_1 .

图 1 为残差的累计概率图,用来检验残差是否近似服从正态分布。这是对回归分析模型残差是否

表 3 单层沉积高度方差分析

Table 3 Height^c variance analysis of single layer

Model	Sum of squares	df	Mean square	F	Sig.
1 Regression	0.436	1	0.436	10.220	0.006 ^a
Residual	0.682	16	0.043		
Total	1.118	17			
2 Regression	0.717	2	0.358	13.399	0.000 ^b
Residual	0.401	15	0.027		
Total	1.118	17			

a. predictors: (constant), V ; b. predictors: (constant), V , F ;
c. dependent variable: Hc_1 .

步的方差分析结果。Sum of square 为离差平方和, df 为自由度, Mean square 为均方差, F 为回归方程显著性检验 F 检验统计量的观测值, Sig. 为概率 p 值。Regression 为回归被解释变量即沉积层高度, Residual 为残差, Total 为二者之和。在显著性水平 α 为 0.05 时, 由概率 p 值得到, 扫描速度和送粉量与沉积层高度的线性回归模型非常显著。

表 4 为回归系数分析表。Unstandardized coefficients 为非标准化回归系数, Standardized coefficients 为标准化回归系数, t 为回归系数显著性检验 t 检验统计量的观测值, Sig. 为对应的概率 p 值。Collinearity statistics 为共线性诊断。 B 为偏回归系数, Tolerance 为解释变量的容忍度, 考察的是因素之间的共线性关系。表中显示 V 与 Hc 之间是负相关, F 与 Hc 之间是正相关, 且 V 对 Hc 的影响比 F 显著。从共线性诊断结果可以得出回归模型不存在多重共线性问题, 偏回归系数值可靠。同时还得到了最优的回归模型: $Hc_1 = 0.577 - 0.165[V] + 0.133[F]$, 经过回代后结果为: $Hc_1 = 0.646 - 0.00165V + 0.0391F$ 。

满足正态性假设的前提的检验。Cum Prob 为 Cumulation Probability 的缩写, 即累计概率, 结果显

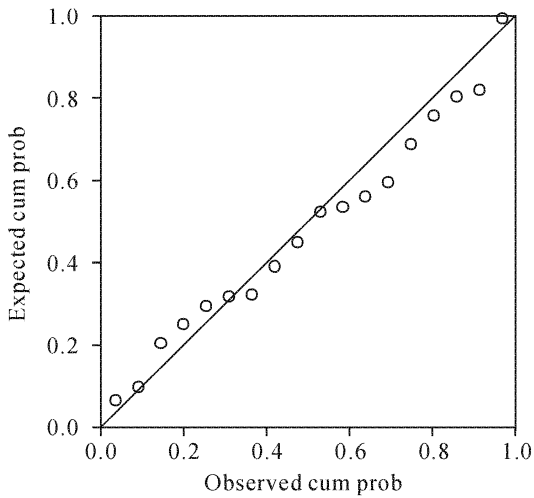


图 1 单层沉积高度标准残差正态概率图 (P-P 图)

Fig. 1 Normal P-P plot of regression standardized residual

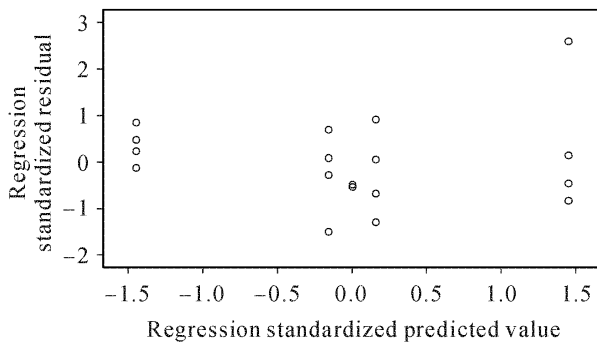


图 2 单层沉积高度预测值与其标准化残差散点图

Fig. 2 Scatter plot of single height and standardized residual

示回归模型符合正态性假设。

图 2 为单层沉积高度与标准化残差之间的散点图。如果散点程随机分布,则认为残差与被解释变量之间相互独立。利用残差图还可以判断模型的拟合效果。从图中可以看出残差的散点随机的分布在 $\pm 2\sigma$ 之间,由此可以说明回归模型拟合效果较好。

4 逐步线性回归模型的验证

在与本文实验相同的硬件条件下,Chen^[9]采用激光功率 (P) 2300~3900 W,扫描速度 (V) 2.5~20 mm/s,送粉率 (F) 7.6~14.3 g/min,光斑直径 (D) 2~4 mm的工艺参数范围下沉积 316L 不锈钢粉末,所得实验结果如图 3 所示。

表 5 是对实验结果的分析,在相同的加工条件下,只改变某一工艺参数的值,分别观察沉积层高度和宽度因加工参数变化引起的变化率的大小,继而考察此工艺参数对沉积层高度和宽度影响的显著性

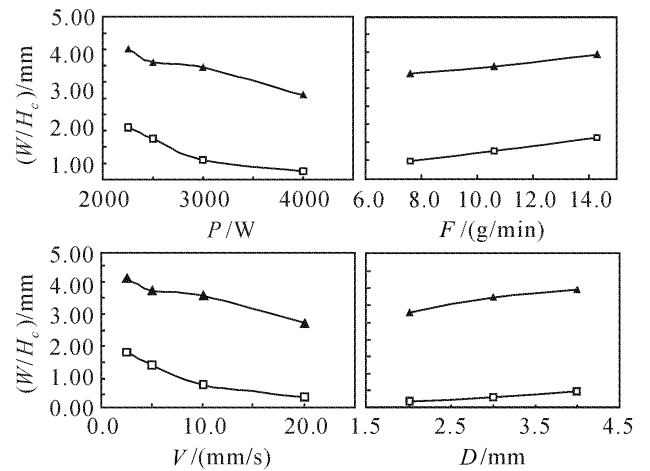


图 3 文献[9]的实验结果

Fig. 3 Experimental results of Ref. [9]

表 5 文献[9]的实验结果分析

Table 5 Analysis of the experimental results of Ref. [9]

	Aim para	Demarcate	Real value	Changing rate	Influence
P	H_c	Maximum	1.3	0.00003	Smaller
		Minimum	1.25		
(2300~3900 W)	W	Maximum	4.05	0.0008	Bigger
		Minimum	2.8		
D	H_c	Maximum	0.47	0.145	Smaller
		Minimum	0.18		
(2~4 mm)	W	Maximum	3.46	0.34	Bigger
		Minimum	2.78		
V	H_c	Maximum	1.6	0.077	Similitude
		Minimum	0.25		
(2.5~20 mm/s)	W	Maximum	4	0.08	
		Minimum	2.6		
F	H_c	Maximum	1.625	0.097	Bigger
		Minimum	0.975		
(7.6~14.3 g/min)	W	Maximum	3.935	0.079	Smaller
		Minimum	3.4		

大小。

从表 5 中得到,激光功率、光斑直径对沉积层宽度的影响显著于沉积层高度;送粉率对沉积层高度的影响显著于沉积层宽度;扫描速度对沉积层高度和宽度的影响显著性相近。而本文的实验结果分析显示,激光功率、光斑直径对沉积层宽度影响显著;送粉率对沉积层高度影响显著;扫描速度对沉积层高度和宽度影响均显著。由此可见,在相同的实验条件下,统计产品与服务解决方案软件分析回归正交实验结果与 Chen^[9]实验结果分析吻合得较好,从而说明逐步线性回归模型中显著性工艺参数结论的可靠性。

同时,以调整激光功率和扫描速度为主,设计了验证沉积层几何尺寸与显著性工艺参数定量关系的实验。实验过程中,利用实时监测系统实时获取沉积层的高度和宽度的几何信息。选取的工艺参数范围为:激光功率为 1710~2425 W,扫描速度为 300~500 mm/min,光斑直径为 2~2.5 mm,送粉率为 7.5~10.8 g/min,保护气体流量为 7.5 L/min。

将实时获取的沉积层几何尺寸的信息与逐步线性回归模型中的定量关系式计算所得的信息进行比较,发现:根据模型计算得到的沉积层高度和单层沉积宽度的结果均落在了实际沉积高度和宽度误差的 $\pm 10\%$ 以内,因此说明模型的准确性较好。图 4 展示了单层沉积高度与显著性工艺参数 V 和 F 函数的验证曲线。图 4 (a) 中 $P = 1540$ W, $F = 7.5$ g/min, 图 4 (b) 中 $P = 2065$ W, $F = 10.8$ g/min, 图中虚线为实际值 $\pm 10\%$ 误差线。

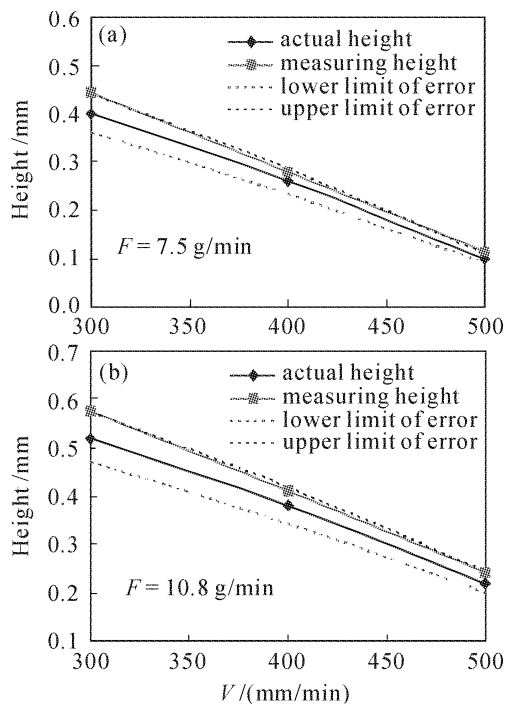


图 4 单层沉积高度逐步线性回归模型定量关系验证

Fig. 4 Validation of height function in single layer

5 结 论

1) 结合正交实验和回归分析的优点,设计了考察工艺参数对沉积层几何尺寸影响显著性大小的回归正交实验。

2) 采用统计产品与服务解决方案软件分析回归正交实验结果,获得了工艺参数中对沉积层高度和宽度影响显著的因素。其中,送粉率和扫描速度

显著影响沉积高度;光斑直径、扫描速度、激光功率以及激光功率与光斑直径的交互作用显著影响沉积宽度,并将分析结果与文献[9]的实验结果进行了对比,证实了显著性工艺参数结论的正确性。

3) 将统计产品与服务解决方案软件分析结果进行回代得到了沉积层几何尺寸与显著性影响工艺参数之间的定量关系式。同时,利用实时监测系统实时获取沉积层几何尺寸信息,并将模型计算的结果与其相比较,以此验证了逐步线性回归模型中上述定量关系式的准确性好,是可信的。

参 考 文 献

- 1 D. M. Keicher, J. E. Smugeresky, J. A. Romero *et al.*. Using the laser engineered net shaping (LENS) process to produce complex components from a CAD solid model [C]. *SPIE*, 1997, **2993**:91~97
- 2 Eric Schlienger, Duane Dimos, Michelle Griffith *et al.*. Near net shape production of metal components using LENS [R]. Honolulu, Hawaii, USA: Proceedings of the Third Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing, 1998, **1**:1581~1586
- 3 Yang Haiou, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Functionally gradient materials prepared with laser rapid forming [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4):567~570
杨海欧,林鑫,陈静等.利用激光快速成形技术制造高温合金-不锈钢梯度材料[J].*中国激光*, 2005, **32**(4):567~570
- 4 Gao Xuesong, Gao Chunqing, Yu Jing *et al.*. Influence of optical interference and system aberration on laser beam parameter measurement precision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6):841~844
高雪松,高春清,于竞等.光学系统像差与光场干涉对激光参量测量精度的影响[J].*光学学报*, 2006, **26**(6):841~844
- 5 Chongguang Li, Junchang Li, Agens Delmas. An optical device to homogenize a laser beam [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(12):698~700
- 6 J. Mazumder, D. Dutta, N. Kikuchi *et al.*. Closed loop direct metal deposition: art to part [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, **34**(4-6):397~414
- 7 Ning Guoqing, Zhong Minlin, Yang Lin *et al.*. Research about closed-loop control system during laser direct manufacturing metallic components [J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(2):172~176
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
- 8 Tan Hua. Temperature measurement and research on microstructure controlling in laser rapid forming process [D]. Master's dissertation, Xi'an; Northwest Polytechnical University, 2005
谭华.激光快速成形过程温度测量及组织控制研究[D].西安:西北工业大学硕士学位论文, 2005
- 9 Chen Jing. Research on powder delivery and molten pool evolution in laser rapid forming process through in situ observation technique [D]. Doctorial dissertation, Xi'an; Northwestern Polytechnical University, 2004
陈静.激光快速成形过程粉末送进及熔池演化的实时观察研究[D].西安:西北工业大学博士学位论文, 2004