

文章编号: 1001-3806(2007)04-0403-03

金属件的激光自由成型制造及影响因素研究

胡乾午, 杨泰平, 李 鹏, 曾晓雁

(华中科技大学 光子科学与工程学院 激光加工国家工程研究中心, 武汉 430074)

摘要: 为了了解激光加工各参数对激光自由成型制造实体金属零件成型精度的影响, 采用了正交设计的实验安排。采用速度前瞻型的 CNC 连续插补模式, 解决了薄壁金属样件制造中截面轮廓路径上激光线能量过大的问题, 制造了成型良好的激光自由成型金属样件。结果表明, 扫描速度和激光功率是影响成型精度的两个主要因素, 前者的影响更显著。

关键词: 激光技术; 激光自由成型制造; 正交实验设计; 影响因素; 合金粉末

中图分类号: TG665 **文献标识码:** A

Fabrication and affecting factors of metallic parts by means of laser freeform ing

HU Qianwu, YANG Taiping, LI Peng, ZENG Xiaoyan

(National Engineering Research Center for Laser Processing Institute of Optoelectronics Science & Engineering Huazhong University of Science & Technology Wuhan 430074, China)

Abstract For the sake of evaluating the effect of laser processing parameters on the shaping accuracy of laser freeform fabricating for solid metallic parts, the experiment was arranged by means of orthogonal design. With the aid of CNC continuous interpolation model endowed with velocity prospecting, the problem of too large laser heat input on the sectional contour path during fabricating of thin wall metallic sample was solved. The metallic samples which in good shape were fabricated by means of laser freeform fabrication. The result shows that transverse velocity and laser power were the two major factors affecting the shaping accuracy and the effect of the former was more remarkable.

Key words laser technique; laser freeform fabrication; orthogonal experimental design; affecting factors; alloy powders

引 言

金属件的激光自由成型制造 (laser freeform fabrication, LFF) 是一种快速制造金属零件的新技术, 它集计算机 CAD 设计、数控技术、软件设计及金属激光熔覆技术等多项技术于一体, 采用累积制造的方法直接制造金属工件。该技术在航空航天等领域具有广阔的应用前景。近年来, 国内外研究者对激光自由成型制造金属件的技术进行了比较广泛的研究。LEWIS 等开发“激光工程化净成型”技术 (laser engineered net shaping, LENS) 制造了 316 304 不锈钢样件、625 690 718 镍基高温合金样件、H13 工具钢样件、Ti6Al4V 钛合金样件以及镍铝金属间化合物样件^[1]。SRIVASTAVA 等对 Ti 合金和 SiAl 合金进行了“激光三维直接制造技术”的研究, 并对工艺参数的优化以及显微

组织的特征进行深入分析, 确定了稳定成型的参数范围^[2]。MLEWSKI 和 GARY 开发了“光直接制造”技术 (directed light fabrication, DLF), 并对铝基、铁基、镍基材料, 铌、铪、钽、钨等难熔金属, 不锈钢、工具钢、银-铜合金, 钛合金, NiAlMoSi 等材料的激光自由成型技术进行了研究^[1,3]。KOBRYN 等探讨了激光功率、扫描速度对 Ti6Al4V 的显微组织, 气孔以及成型高度的影响^[4]。JI 等人对激光熔覆直接制造金属零件的组织及力学性能进行了分析^[5]。北京有色金属研究总院 ZHANG^[6]等对激光直接堆积成型铜合金以及 316L 不锈钢的组织及性能进行了研究。清华大学 ZHONG 等利用激光自由成型技术制造 W/Ni 合金太空望远镜准直器^[7]。西北工业大学 TAN 等对激光快速成形过程的实时监测与闭环控制技术进行了研究^[8]。作者通过自主开发的金属件激光自由成型软件, 对影响激光制造金属件精度的因素进行了分析, 并采用高功率激光器熔化同步供给的金属粉末, 按照逐层累积的形式完成金属件的激光实体制造。

1 实验方法

激光自由成型制造金属件的技术是采用高功率激

作者简介: 胡乾午 (1963-), 男, 副教授, 主要从事激光材料加工与激光先进制造技术研究。

E-mail: huqianwu@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2006-05-29; 收到修改稿日期: 2006-07-06

光器熔化同步供给的金属粉末,按照逐层累积的方式完成金属实体的制造,该技术的实质是计算机控制下的激光三维精密熔覆。实验用的激光器为 Rofin TR50 型 5kW 轴快流 CO₂ 激光器。基板材料为 100mm × 100mm × 10mm 的 A3 钢板,基板表面磨光后经乙醇、丙酮清洗后烘干。激光自由成型所用的金属粉末为 N₂ 合金粉,其成分的质量分数为: 0.6C-2.5B-4.0Si-24Cr-3Fe-2.5Mn 余 N; 粉末粒度为 -140 目 ~ +320 目。用华中科技大学激光加工国家工程研究中心研制的 HUST-IV 型激光熔覆自动送粉器和 HUSTER-III 激光自由成型送粉喷嘴,将合金粉末送入熔池,送粉载气为 Ar 气,流量为 8L/min,激光光斑直径 1.0mm。实验中使用的激光功率范围为: 700W ~ 1300W,扫描速度范围为: 4mm/s ~ 12mm/s,送粉量范围为: 3.0mm/s ~ 5.8g/min,搭接率范围为: 33.3% ~ 66.7%。本研究通过三维实体造型软件进行金属零件的造型设计,通过图形显示 OpenGL 技术对 STL 文件格式的零件模型实体进行三维真实感显示,导出实体分层截面二维轮廓信息,利用 DELPHI 语言,开发用于金属实体轮廓激光熔覆区域的扫描填充算法,运用该软件输出的数控代码 (G-Code) 来控制数控机床和同步送粉喷嘴的空间运动形式,从而实现激光对金属件的自由成型制造。软件系统设计的具体方法参见文献 [9] 和文献 [10]。

2 实验结果与分析

2.1 激光自由成型制造实体金属零件的影响因素研究

激光自由成型制造实体金属零件的过程中,激光

加工的工艺参数,如:激光功率,扫描速度,送粉速率,搭接率等对实体金属零件的成型质量都有重要影响。在研究激光加工工艺参数的影响程度时,选用 L₉(3⁴) 正交表^[11],即考察 4 个主要工艺参数:激光功率、扫描速度、送粉量和搭接率;每个参数有 3 个水平变化值。实验方式为制造正六边形样块,样块的制造模式为:单个样块的工艺参数不变,共沉积 9 层,每层之间的扫描方向偏转 120°,根据 L₉(3⁴) 正交表共制造了 9 个不同参数组合的实验样块,如图 1 所示。

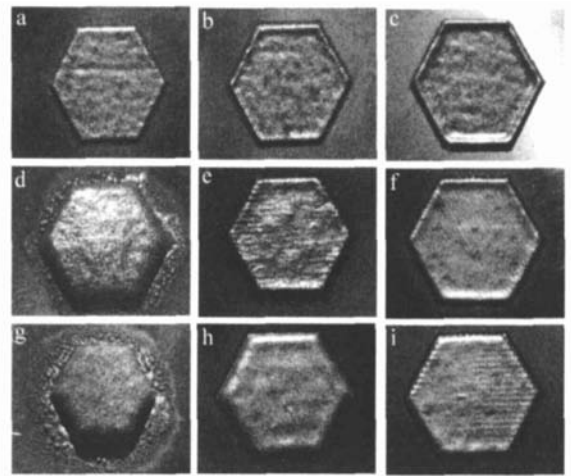


Fig. 1 Samples fabricated according to orthogonal experimental design

按照如表 1 所示的正交实验设计进行实验和分析,其方差分析结果如表 2 所示。由表 2 可以看出,扫描速度这个参数是影响最显著的因子;其次为激光功率因子;送粉量是影响最小的因子。实验考察的 4 个因子的主次关系为:扫描速度 > 激光功率 > 搭接率 >

Table 1 L₉(3⁴) table of orthogonal design and result of experiments

factor	A	B	C	D	z
No	laser power/W	transverse velocity/(mm • s ⁻¹)	powder feed rate/(g • min ⁻¹)	overlap rate/%	height deviation of edge/mm
1	700	4	3.0	33.3	-0.02
2	700	8	4.4	50	+0.11
3	700	12	5.8	66.7	+0.57
4	1000	4	4.4	66.7	-1.74
5	1000	8	5.8	33.3	-0.08
6	1000	12	3.0	50	+0.08
7	1300	4	5.8	50	-3.21
8	1300	8	3.0	66.7	-0.14
9	1300	12	4.4	33.3	-0.01
K ₁	0.66	-4.97	-0.08	0.05	$K_j = \sum z_j$
K ₂	-1.74	-0.11	-1.64	-3.18	
K ₃	-3.36	0.64	-2.72	-1.31	$G = \sum z = -4.44$
R ² /3	4.92	8.37	3.36	3.94	$R^2 = \sum K_j^2$
S	2.80	6.25	1.23	1.82	$S = R^2/3 - G^2/9$

Table 2 Table of variance analysis

source of variance	squares sum of deviation	degree of freedom	average squares sum of deviation	quantification of significance
A	$S_A = 2.80$	2	1.40	2.26
B	$S_B = 6.25$	2	3.13	5.05
C	$S_C = 1.23$	2	0.62	1
D	$S_D = 1.82$	2	0.91	1.47

送粉量。由表 1 可计算出 4 个因子的平均最佳参数为: $\bar{A}_1 = 0.22$, $\bar{B}_2 = -0.04$, $\bar{C}_1 = -0.03$, $\bar{D}_1 = 0.02$ 。故最优工艺参数组合为: $A_1B_2C_1D_1$; 具体的组合参数为: 激光功率 700W, 扫描速度 8mm/s, 送粉率 3.0g/mm, 搭接率 33.3%。由于激光扫描速度和激光功率为最显著的两个影响因子, 为了考察激光功率和扫描速度这两个参数交互作用的影响情况, 特别分析了激光能量这个组合参数对成型实体金属零件边缘精度的影响。激光能量 = 激光功率 / 扫描速度。分析表明, 激光的线能量大于 175J/mm; 或者小于 87.5J/mm, 激光自由成型实体金属零件的边缘相对高度差就会大于 3%。根据正交实验设计的结果, 同时兼顾激光能量对成型件边缘精度的影响, 实际采用的加工参数为: 激光功率为 700W, 扫描速度 6mm/s, 送粉率 3.0g/mm, 光斑直径为 1mm, 搭接率 33.3%, Ar 气流量为 10L/min。表 1 中, j 表示各因子的水平数, 其取值为: $j = 1, 2, 3$ 。

图 2 所示为激光自由成型制造的实体镍基合金端盖件, 采用了分区扫描的方式进行制造, 每成型一层, 栅格扫描方向就旋转 45°。避免了固定扫描方向对成型精度的不良影响。



Fig 2 Metallic part of laser freeform fabrication

2.2 运动插补方式对薄壁零件激光自由成型制造的影响

实际研究表明, 扫描速度是影响激光自由成型制造精度的最主要因子, 适宜的激光扫描速度范围为: 4mm/s~8mm/s。制造图 3 所示的薄壁金属件, 最佳方法是用截面轮廓路径跟踪模式。在精确插补的情况下, CNC 工作台在每个加工线段的起止点处, 运动的起点速度 v_s 和终点速度 v_e 都为 0。根据 CNC 精确插补方式计算图 2 中薄壁零件的截面轮廓线扫描速度分

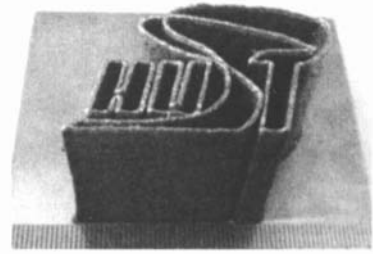


Fig 3 Metallic emblem of laser freeform fabrication

布值, 发现在图形轨迹的转折附近的速度都低于 4mm/s。本实验所用的数控系统为华工数控 HNC-1 型, 其最大加速度 $a = 600\text{mm/s}^2$, 最大进给速度 $v_{\max} = 60\text{mm/s}$ 。解决上述问题的方法是通过近似路径实现路径之间进给速度的高速衔接, 也就是采用连续插补的原理, CNC 系统在一个插补周期 T 内, 将交点 P 点前一线段的终点速度 v_e 光滑过渡到下一线段的起点速度 v_s , 且两者的方向分别与两线段方向相同, 数值相等。连续插补时, 必须满足 $\theta \leq 2\arcsin(Ta/2v_e)$, 其中 θ 为 P 点前后两路径线段的夹角 ($0 < \theta < 180^\circ$)。将 HNC-1 型数控系统的参数代入上述的 θ 公式, 可知, $\theta \leq 2\arcsin(75T)$ 。当取 $T = 5\text{ms}$ 时, $\theta \leq 44^\circ$, 这时, 图 3 的零件除少数转折点外, 其轮廓曲线基本上可以满足 $v_s \geq 4\text{mm/s}$ 的条件。图 3 为激光自由成型制造的薄壁镍基合金样件。

3 结论

(1) 激光自由成型制造实体金属零件过程中, 对于工件边缘精度的影响, 扫描速度这个参数是影响最显著的因子; 其次为激光功率因子; 再次为搭接率因子; 送粉量是影响最小的因子。

(2) 激光能量是影响实体金属零件激光自由成型制造精度的重要组合因子。根据正交实验设计的结果, 同时兼顾激光能量对成型件边缘精度的影响, 最佳的加工参数为: 激光功率为 700W, 扫描速度为 6mm/s, 光斑直径为 1mm, 搭接率 33.3%, Ar 气流量为 10L/min。

(3) 本实验系统在薄壁零件激光自由成型制造中, 采用 CNC 系统连续插补模式的截面轮廓路径跟踪模式, 可以提高薄壁零件的成型质量, 当取插补周期 $T = 5\text{ms}$ 时, 样件除少数转折点外, 其轮廓曲线基本上可以满足 $v_s \geq 4\text{mm/s}$ 的条件。

参考文献

- [1] LEWIS G K, SCHILENGER E. Practical considerations and capabilities for laser assisted direct metal deposition [J]. Material and Design 2000, 21: 417~423.

(下转第 441 页)

做腔体,同时对腔体采取减震、恒温等措施,从腔体结构上减少腔长变化;(2)通过调节入射光频率来保持入射光与无源腔的匹配耦合,让入射光频率随腔长变化而变化,减少两者相对的不稳定性;(3)采用入射光谱线较宽的半导体激光器作为光源,同时提高入射光功率。值得提到的是,也有利用腔长变化来测量的新方法,比如在连续波腔衰荡法基础上产生的腔内增强吸收法,该方法就是刻意打破腔稳定谐振条件,通过一段时间内的出射光功率的积分来测量腔内气体吸收^[12],可以看出,原理类似前面分析中的极限情况中的快速腔长变化情况。

参 考 文 献

- [1] BERDEN G, PEETERS R, MEIJER G. Cavity ring-down spectroscopy: experimental schemes and applications [J]. *International Reviews in Physical Chemistry*, 2000, 19(4): 565~ 607.
- [2] O'KEEFE A, DEACON D A G. Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources [J]. *Review of Science Instrum*, 1988, 59(12): 2544~ 2551.
- [3] SUN F G, DAID X, XIE J Ch *et al* Accurate reflectivity measurement of high reflective mirrors via a cavity ring-down method [J]. *Chinese Journal of Lasers* 1999, A26(1): 35~ 38(in Chinese).
- [4] YIH Y, PENG Y, HU X Y *et al* Influence of length misadjustment of ring-down cavity on its output power [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2003, 31(S1): 486~ 488(in Chinese).
- [5] YIH Y, LÜ B D, HU X Y *et al* Influence of length misadjustment on isometrical precision of ring-down cavity spectroscopy [J]. *High Power Laser and Particle Beams* 2004, 16(8): 993~ 996(in Chinese).
- [6] YIH Y, LÜ B D, PENG Y *et al* Influence of detector's aperture on isometrical precision of ring-down cavity [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(3): 231~ 236(in Chinese).
- [7] YIH Y, PENG Y, TAN X Q *et al* Experimental study of reflectivity measurement of single wavelength by cavity ring down method [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(4): 337~ 339(in Chinese).
- [8] ANDERSON D Z, FRISCH J C, MASSER C S M. Mirror reflectometer based on optical cavity decay time [J]. *Appl Opt* 1984, 23(8): 1238~ 1245.
- [9] ZHOU B K, GAO Y Zh, CHEN Ch R *et al* Theory of laser [M]. Beijing Defence Industry Press 2000. 166~ 167(in Chinese).
- [10] CHEN X Z, YAO J L, LIY M *et al* A narrow linewidth diode laser for high resolution spectroscopy and its properties [J]. *Acta Optica Sinica* 1996, 16(10): 1383~ 1388(in Chinese).
- [11] HE G Y. Usual numerical value arithmetic volume of visual C++ [M]. Beijing Science Press 2002. 466~ 517(in Chinese).
- [12] PEI Sh X, GAO X M, CUI F P *et al* Study of cavity enhanced absorption spectroscopy based on a swept diode laser [J]. *Optics & Optoelectronic Technology* 2004, 2(6): 30~ 33(in Chinese).
- (上接第 405 页)
- [2] SRIVASTAVA D, CHANG ITH, LORETTO M H. The optimization of processing parameters and characterization of microstructure of direct laser fabricated TiAl alloy components [J]. *Materials and Design* 2000, 21: 425~ 433.
- [3] MILEW SKI J Q, DICKERSON P G, NEMEC R B. Application of a manufacturing model for the optimization of additive processing of Inconel alloy 690 [J]. *Journal of Materials Processing Technology* 1999, 91: 18~ 28.
- [4] KOBRYN P A, MOORE E H, SEMIATN S H. The effect of laser power and traverse speed on microstructure, porosity and build height in laser deposited Ti6Al4V [J]. *Scripta Materialia*, 2000, 43: 299~ 305.
- [5] JI S, LI P, ZENG X. Microstructure and mechanical property analyses of the metal parts direct fabricated by laser cladding [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2): 130~ 132(in Chinese).
- [6] ZHANG Y, XIM, SHI L *et al* Microstructure and properties of 316L stainless steel fabricated by laser direct forming [J]. *Rare Metal Materials and Engineering* 2002, 31(2): 103~ 105(in Chinese).
- [7] ZHONG M, YANG L, LIU W *et al* Laser direct manufacturing W/Ni telescope collimation component [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2004, 31(4): 482~ 487(in Chinese).
- [8] TAN H, CHEN J, YANG H *et al* Real-time sensing and closed-loop control of laser rapid forming process [J]. *Applied Laser* 2005, 25(2): 73~ 76(in Chinese).
- [9] LI P. Direct laser fabrication of 3-dimensional metal parts based on laser cladding [D]. Wuhan Huazhong University of Science & Technology, 2005. 33~ 95(in Chinese).
- [10] YANG T, HU Q, ZENG X *et al* Study on the algorithm of sectional contour lines building for laser direct metal forming [J]. *Electron and Information Technology*, 2003(6): 32~ 35(in Chinese).
- [11] The Compiling Group for the Book *Methods of orthogonal experimental design* [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1979. 52(in Chinese).