

影响激光近净成形残余应力的关键参数的多元回归分析

王福雨^{1,2} 赵吉宾¹ 赵宇辉¹ 王志国¹ 来佑彬^{1,2} 龙雨¹ 刘伟军¹

¹中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 激光近净成形的激光功率、扫描速度和分层高度是成形的关键参数。掌握关键参数与影响成形质量和变形的残余应力的关系是降低残余应力与选择合适成形参数的有效途径。利用生死单元技术对钛合金激光近净成形过程进行热力耦合数值求解,得到8组不同关键参数情况下有限元模型的残余应力分布云图,并对顶层三个位置的残余应力进行采样。对不同参数与残余应力做多元回归分析,得到多元回归方程。通过有限元分析和实验验证多元回归方程的正确性,证明多元回归方法是减少不同参数下成形件残余应力的预测与实验时间、对既定参数残余应力评估的有效方法。

关键词 激光光学; 多元回归方程; 有限元分析; 激光近净成形

中图分类号 TG146; TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.011403

Multiple Regression Analysis of the Key Parameters of Laser Engineering Net Shaping on Residual Stress

Wang Fuyu^{1,2} Zhao Jibin¹ Zhao Yuhui¹ Wang Zhiguo¹ Lai Youbin^{1,2}

Long Yu¹ Liu Weijun¹

¹Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Key forming parameters of laser engineering net shaping are laser power, scanning speed and stratification height. The relationship between the key parameters and residual stress must be mastered, because the residual stress influences the forming quality and deformation. Mastering the relationship is an effective way to reduce residual stress and to choose forming parameters. Using the life and death element technology and thermo-mechanical coupled field model, 8 groups of different key parameters of the laser engineering net shaping of titanium alloy are computed. The distribution cloud of the residual stress is obtained and three samples are selected. Through the multivariate regression of different key parameters and the residual stress, the multiple regression equation is obtained. The validity of the multiple regression equation is proved by finite element analysis and experiment. The multiple regression analysis is the effective way to reduce the time of simulation and experience of the different key parameters and to estimate the residual stress of the established parameters.

Key words laser optics; multiple regression equation; finite element analysis; laser engineering net shaping

OCIS codes 140.3390; 220.4610; 350.3390; 160.2120

1 引言

激光近净成形(LENS)是快速原型制造的一种重要方法,具有粉末利用率高、成形速度快、大型零件整体成形等优点,具有广阔的应用前景。激光近净成形过程涉及激光参数、粉末材料参数、送粉参数、环境参数

收稿日期: 2014-07-25; 收到修改稿日期: 2014-08-11; 网络出版日期: 2014-12-18

基金项目: “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2013ZX04001-041)

作者简介: 王福雨(1987—),男,博士研究生,主要从事有限元模拟方面的研究。E-mail: wangfuyu@sia.cn

导师简介: 赵吉宾(1970—),男,博士,研究员,博士生导师,从事数控加工方面的研究。

E-mail: jbzhaos@sia.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

等多因素影响,是一个极其复杂的熔化凝固过程。在成形结束后,又存在变形、开裂、塌边、气孔、表面不平整等加工缺陷,限制了激光近净成形在医疗器械和航空航天上的应用。导致加工缺陷的一个重要原因是加工后产生的残余应力,如何减小残余应力是减少变形、开裂,保持成形件轮廓形状的研究重点。

通过实验和仿真的方法,人们逐步开展了从性能到成形过程应力演变,再到多组参数与成形质量、应力规律的研究。Song等^[1]采用空热处理的方法对选择性激光烧结的铁基零件进行处理,降低了残余应力,同时提高了拉伸性能。但是残余应力在成形结束后处理的前提是残余应力没有造成零件的变形开裂,因此研究者对残余应力产生的因素做了深入研究分析^[2-3]。对温度场的研究是进行应力场研究的前提,刘昊等^[4]对激光熔覆参数中的激光功率、光斑直径、送粉量等对成形温度和表面形貌的影响进行了深入研究。贾文鹏等^[5-6]利用生死单元技术对空心叶片进行了温度场和应力场的动态分析,得到温度和应力的演变规律。基于Logistic回归模型分析钛合金件激光直接成形工艺参数对成形质量的影响^[7],从而找出合适的成形参数。利用神经网络和粒子群算法^[8-9]可以拟合激光单道熔覆实验的工艺参数与熔覆层高度、宽度、熔深等几何形貌之间的函数关系,但表达式中的参数缺乏明确的物理含义,并且在相同条件下的实验,对相同工艺参数通常可以拟合出不同的表达式,影响了这种实验拟合方法对工艺优化的指导意义。多元回归方法可以建立因变量和多个自变量之间的回归方程式,将不确定的关系直观表达出来,并已经在环境、医药、经济等方面得到了广泛的应用^[10-12],但是在激光近净成形领域尚未见到报道。

本文证明了该回归方法能有效减少不同参数所得残余应力的预测与实验时间,所得回归方程式对既定参数残余应力的评估也较精确。首先利用有限元软件MSC.Marc建立体积成形的有限元模型,对8组不同成形参数的模拟结果进行采样;其次利用多元回归方法得到成形参数和残余应力的多元回归方程;最后利用另一组参数进行有限元分析和实验加工,对比有限元分析、实验、回归方程所得残余应力的误差,验证本研究所得回归方程预测激光近净成形残余应力的正确性。

2 多元回归模型

金属激光近净成形的关键参数范围:激光功率0.20~10 kW,扫描速度3~20 mm/s,送粉电机速度10~80 r/min。考虑到成形参数和成形质量的非线性关系,根据分段线性化原理,本文只采用线性关系拟合关键参数范围内的一段参数。此段参数是激光近净加工时最常用的参数范围,对这段参数的研究有重要应用价值。该参数范围是:激光功率1.2~2 kW,扫描速度3~9 mm/s,送粉电机速度10~30 r/min。以关键参数为自变量,成形结束后的残余热应力为因变量,构成多自变量单个因变量的情况,可进行多元线性回归。通常认为关键参数与残余应力的关系为

$$N = CW^\alpha V^\beta G^\varepsilon, \quad (1)$$

式中 N 为残余应力, W 为激光功率, V 为扫描速度, G 为分层高度, α 、 β 、 ε 为对应参数的指数, C 为常数。因为只对参数的部分范围进行分析,本研究采用的因变量与自变量矩阵关系式

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}_{n \times 1} = \begin{bmatrix} 1 & W_1 & V_1 & G_1 \\ 1 & W_2 & V_2 & G_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & W_n & V_n & G_n \end{bmatrix}_{n \times 4} \times \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}_{4 \times 1} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}_{n \times 1}, \quad (2)$$

其对应的线性关系式为

$$Y_i = b_0 + b_1 W_i + b_2 V_i + b_3 G_i + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

式中 W_i 、 V_i 、 G_i 是自变量,分别为激光功率、扫描速度、分层高度, b_0 是常数项, ε_i 为误差项, n 为样本容量。

该段激光近净成形参数进行多元回归满足的条件包括:

1) 有正确的期望函数。即在线性回归模型中激光功率、扫描速度和分层高度是要解释的变量,是影响残余应力的重要变量,不可以减少;

2) 被解释变量等于期望函数与随机干扰项之和。除重要的影响变量外,不确定的环境因素,如温度、震

动、湿度以及成形氛围氧含量的波动都会影响残余应力值；

3) 随机干扰项独立于期望函数。激光功率来自于 CO₂ 激光器, 工作台保证扫描速度, 送粉器保证送粉量以确定分层高度。这些自变量自成系统, 与外界干预项不相关；

4) 解释变量矩阵 \mathbf{X} 是非随机矩阵, 且其秩为列满秩, 即 $\text{rank}(\mathbf{X})=k, k < n$ 。式中 k 是解释变量的个数, $n=8$ 为观测次数。利用 Matlab 对自变量矩阵求秩, $k=3$ 为满秩且小于 8；

5) 随机干扰项服从正态分布。实验和模拟过程中, 对各种因素进行目标控制, 无法对误差的产生进行控制, 则误差一定服从正态分布；

6) 随机干扰项的期望值为零, 即 $E(\varepsilon)=0$ 成立。若 $E(\varepsilon) \neq 0$, 则可把它并入到常数项 b_0 中；

7) 随机干扰项具有方差齐性, $\sigma^2(u)=\sigma^2$ (常数)；

8) 随机干扰项相独立, 即无序列相关, $\sigma(u_i, u_j)=\text{cov}(u_i, u_j)=0$ 。

3 有限元模型

应力来源于凝固收缩、金属晶相转变以及温度不均匀三方面。在 TC4 钛合金激光近净成形过程中, 激光光斑直径范围内的金属被加热到熔化状态, 而其他未在光斑范围内的区域温度较低, 导致整个模型的温度分布十分不均衡。由于高温区的材料受热膨胀和低温区的约束, 造成材料无法向外扩张而产生塑性变形; 当激光向前移动时, 原熔化区域凝固收缩, 在低温区约束的作用下最终形成拉应力。金属晶相转变会导致材料的热物性参数变化, 因此模拟过程中必须考虑材料的物理性能参数随温度的变化。TC4 热物性参数随温度变化值如表 1 所示。

表 1 TC4 热物性参数表

Table 1 Thermal physical property parameter of TC4

Temperature /°C	Thermal conductivity / [W/(K·m)]	Thermal capacity / [J/(kg·K)]	Elastic modulus / GPa	Coefficient of thermal expansion / (10^{-5}K^{-1})	Poinsson's ratio / μ
20	17.0	500	120.0	0.900	0.30
200	15.0	580	110.0	0.965	0.31
400	15.0	595	88.0	1.107	0.33
600	16.0	615	70.0	1.004	0.34
1530	20.0	760	3.5	1.005	0.38
1650	20.5	840	3.0	1.006	0.38
2000	21.0	730	0.1	1.008	0.39

建立有限元模型既要建立起合适的材料参数, 也要建立与激光近净成形相对应的边界条件。本模拟采用热机耦合模拟, 即在每个增量步中求解完温度场后就求解应力场, 当位移满足收敛条件再进行下一个增量步的求解计算。因此施加的边界条件除固定约束外, 还包括

$$q = q_l(r)A_\alpha + q_p - A_h(T - T_0) - \sigma\varepsilon(T^4 - T_0^4), \quad (4)$$

式中 q 为熔池表面的能量密度值, q_l 为热源的高斯分布密度, r 表示激光光斑半径, q_p 为来源于加热后的粉末颗粒的多余能量, A_h 为热强迫对流系数, T_0 为环境温度, T 为表面温度, σ 是 Stefan-Boltzmann 常数, ε 为辐射率, A_α 为吸收系数。在设置高斯热源的移动时, 要设置的激光成形工艺参数如表 2 所示。

表 2 工艺参数表

Table 2 Process parameters table

No.	Laser power /W	Scanning speed / (mm/s)	Layer height /mm	Ambient temperature /°C
1	1.2	7	1.390	20
2	1.5	3	2.768	20
3	1.5	5	1.630	20
4	1.5	7	0.578	20
5	1.5	7	1.870	20
6	1.5	9	0.820	20
7	1.7	7	1.039	20
8	2.0	7	1.325	20

同一增量步中当温度求解结束后,对温度产生的应力进行求解计算。应力产生的机理为

$$\int_V B^T D_T B \Delta u dV = \Delta P + \int_V B^T \underline{h} \Delta T dV. \quad (5)$$

在热应力分析中,温度的影响反映在方程左端项,代表材料在当前温度下切线刚度的影响,以及右端第二项,代表热应变所产生的等效热载荷。式中 B^T 是建立节点位移和单元总应变之间线性关系的转换矩阵, B 是形函数, u 代表节点位移, V 表示体积, D_T 是依赖于温度的弹塑性系数矩阵,包含弹性变形和塑性变形的贡献, P 代表节点的等效外力, \underline{h} 表示热应变对应力贡献大小的张量, T 表示摄氏温度。

通过自底向上建模,得到成形区域有限单元规则、基板过渡区网格稀疏,并满足求解要求的有限元模型。建立边界条件,将上述约束条件施加到模型上。最终得到的有限元模型如图1所示。

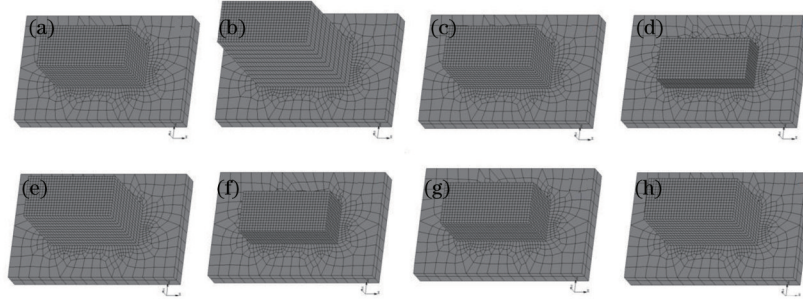


图1 有限元模型。(a) 激光功率1.2-扫描速度7-分层高度1.390; (b) 1.5-3-2.768; (c) 1.5-5-1.630; (d) 1.5-7-0.578; (e) 1.5-7-1.870; (f) 1.5-9-0.820; (g) 1.7-7-1.039; (h) 2.0-7-1.325

Fig.1 Finite element models. (a) Laser power 1.2-scanning speed 7-layer height 1.390; (b) 1.5-3-2.768; (c) 1.5-5-1.630; (d) 1.5-7-0.578; (e) 1.5-7-1.870; (f) 1.5-9-0.820; (g) 1.7-7-1.039; (h) 2.0-7-1.325

4 分析与检验

对上述模型进行数值求解,保存求解结果中的节点等效应力,可以得到单点的应力随时间变化的曲线,最后时刻的各点残余应力值,以及某时刻整体应力场分布云图。成形结束后冷却到室温的残余应力云图列于图2。从云图上可以清晰的看到每层的应力分布以及顶层的扫描路径方式为往复扫描,应力集中在道与道以及层与层之间的结合部位。按照图3所示位置,取图2各个模拟结果顶端3个位置12个点的残余应力值。将所取各应力值列于表3。

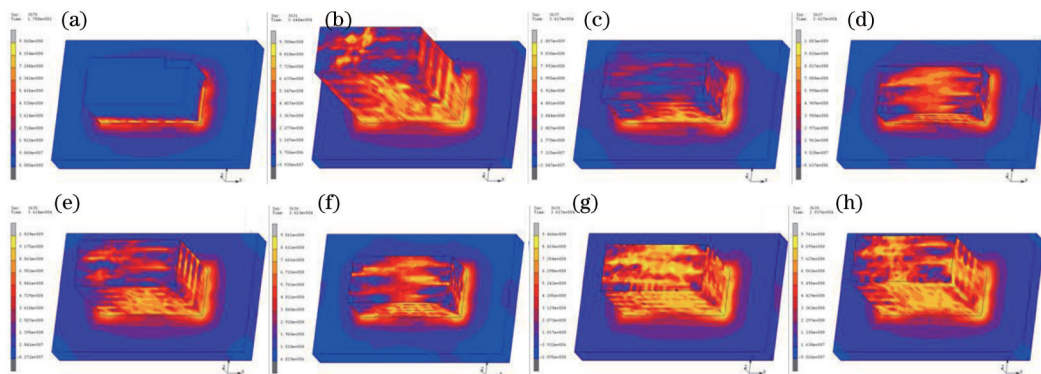


图2 残余应力分布云图。(a) 激光功率1.2-扫描速度7-分层高度1.390; (b) 1.5-3-2.768; (c) 1.5-5-1.630; (d) 1.5-7-0.578; (e) 1.5-7-1.870; (f) 1.5-9-0.820; (g) 1.7-7-1.039; (h) 2.0-7-1.325

Fig.2 Cloud picture of the residual stress. (a) Laser power 1.2-canning speed 7-Layer height 1.390; (b) 1.5-3-2.768; (c) 1.5-5-1.630; (d) 1.5-7-0.578; (e) 1.5-7-1.870; (f) 1.5-9-0.820; (g) 1.7-7-1.039; (h) 2.0-7-1.325

针对表3中数据,应用SPSS统计软件,用多元回归分析的方法进行数据处理,采用Enter方法输入,得到一系列的回归分析结果并根据它得到最后的回归方程以及验证回归模型,表4为模型汇总表。



图3 取样点位置和标号

Fig.3 Sampling point location and label

表3 12点残余应力值表(单位: MPa)

Table 3 Residual stress value of 12 points (unit: MPa)

No.	1			2				3				MAX	
	6143	6144	6157	6158	6297	6298	6311	6312	6451	6452	6465		6466
a	117	191	234	162	719	713	701	711	707	665	725	724	725
b	57.6	561	66	621	647	47.3	594	99.3	161	87.7	183	78.4	647
c	208	434	199	427	35.2	169	46.5	153	363	449	438	599	599
d	84.2	378	36	285	283	156	208	293	560	634	492	292	634
e	275	181	287	190	596	764	618	636	565	486	554	434	764
f	213	421	124	434	575	552	123	188	633	793	555	342	793
g	701	708	146	132	176	116	443	499	512	656	681	829	708
h	178	341	132	302	380	356	396	446	359	800	368	726	800

表4 模型汇总^bTable 4 Model summary^b

Model	R	R ²	Adjust R ²	Std. error of the estimate	Durbin-Watson
1	0.990 ^a	0.980	0.965	14.15490	1.308

Note: ^a predict variable: (constant), laser power, scanning speed, layer height; ^b dependent variable: residual stress

从表4可以得到 R , R^2 , 以及调整 R^2 。在实际应用中, 判别线性关系密切程度用 R^2 检验, 拟合优度指标 $R^2=0.980$ 接近于1表明本模型拟合较好。估计误差为 $14.15490 < 100$, 人为各变量之间共线性不严重, 得到的结论有意义。 $D_w=1.308$ 位于1-3, 说明残差不相关。

表5中 F 的值较大, 代表着该回归模型较显著; Sig.即 P 值一般应在95%的置信水平下, 本模型拟合 P 值为 $0.001 < 0.05$, 表明方程显著。

表5 方差分析表^aTable 5 Analysis of variance^a

Model	Sum of squares	df	Mean square	F	Sig.
Between Groups	39386.056	3	13128.685	65.525	.001 ^b
Within Groups	801.444	4	200.361		
Total	40187.500	7			

Note: ^a predict variable: (constant), laser power, scanning speed, layer height; ^b dependent variable: residual stress

表6所示的 X 是回归方程的系数, 各个变量的Sig.均小于0.05, 说明各变量对应力有显著影响。根据这些系数能够得到完整的并具有统计学意义的多元线性回归方程为

$$Y_i = 48.695 + 68.334W + 60.677V + 111.852G, \quad (6)$$

式中 W 为激光功率, V 代表扫描速度, G 是分层高度。由公式可以看出残余应力随着激光功率、扫描速度以及分层高度的增加而增大。在光斑直径不变, 保证成形无熔合不良、过烧、顶层成形应力相同的情况下, 在调整不同参数时应遵循: 在激光功率一定时, 选分层高度小、扫描速度快的参数; 当扫描速度一定后, 可以通过降低分层高度, 提高激光功率; 确定分层高度后应选择较小的激光功率和较快的扫描速度。当三个参数中两个参数固定的时候, 可以通过降低可变参数来实现降低顶端残余应力的效果。

表6 方差分析表^a
Table 6 Coefficients^a

Model	Unstandardized <i>X</i>	coefficients Std. error	Standardized coefficient	<i>t</i>	Sig.	95.0% C.I. for	
						Floor	Toplimit
Constant	48.695	53.564		0.909	0.415	-100.024	197.413
Laser Power	68.334	23.851	0.205	2.865	0.046	2.114	134.554
Scanning speed	60.677	4.613	1.420	13.155	0.000	47.870	73.483
Stratification height	111.852	11.910	1.011	9.391	0.001	78.784	144.920

Note: ^a predict variable: (constant), laser power, scanning speed, layer height; ^b dependent variable: residual stress

5 实验对比

为验证回归模型的有效性和正确性,进行了一次验证实验,并将模拟结果和实际加工结果与回归模型的计算结果对比。实验参数为: $W=1.5\text{ kW}$, $V=7\text{ mm/s}$, $G=0.839\text{ mm}$ 。首先利用多元回归公式计算得到应力值;之后通过模拟得到数值计算值;最后通过实验验证应力值。将实验参数带入(6)式得到

$$Y = 48.695 + 68.334 \times 1.5 + 60.677 \times 7 + 111.852 \times 0.839 = 669.778\text{ MPa}.$$

对比e组模拟参数,其模拟参数是 $W=1.5\text{ kW}$ 、 $V=7\text{ mm/s}$ 、 $G=1.870\text{ mm}$,所得残余应力 $Y=764\text{ MPa}$ 。可见在分层高度由 1.870 mm 降低到 0.839 mm 时,顶层的最大残余应力减小 12.3% 。与扫描速度相同的a组参数 $W=1.2\text{ kW}$ 、 $V=7\text{ mm/s}$ 、 $G=1.390\text{ mm}$ 对比,在增大激光功率、减小分层高度时,顶层最大残余应力由 $Y=725\text{ MPa}$ 降低了 7.6% 。证明结论正确。

用实验参数进行数值模拟,图4为残余应力云图,表7列出了按照图3所示12个位置处的残余应力值。最大残余应力值为 708 MPa 。与回归公式计算的结果对比,误差为 $(708-669.778)/669.778=5.7\%$,可以利用回归公式进行不同参数成形试件顶层残余应力值的对比与估计。

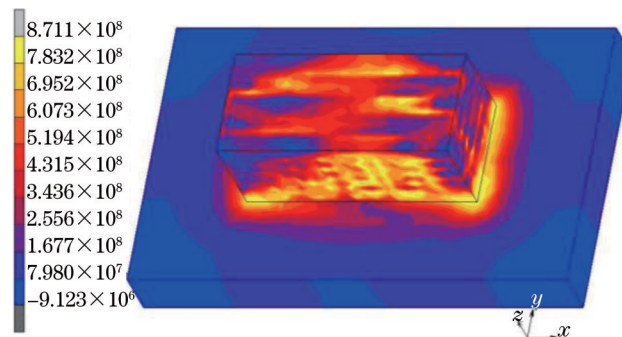


图4 残余应力分布云图

Fig.4 Cloud picture of the residual stress

表7 12点残余应力值(单位:MPa)

Table 7 Residual stress value of 12 point (unit: MPa)

3	6451	6452	6465	6466	MAX
	599	708	456	675	
2	6297	6298	6311	6312	708
	376	347	398	370	
1	6143	6144	6157	6158	
	159	158	171	109	

将所得结论在激光近净成形实际加工中进行验证。实验采用一套 5 kW CO_2 激光器作为光源;利用光路将激光引导进真空箱,经聚焦后激光光斑直径为 2 mm ;真空系统对真空室抽真空后充氩气至微正压;采用同轴送粉器输送 $74\sim 149\ \mu\text{m}$ 的标准TC4球形粉末;利用数控三维工作台承载基板;采用氧分析仪和红外测温仪对成形氛围和温度进行监控。设备组合配置如图5所示。

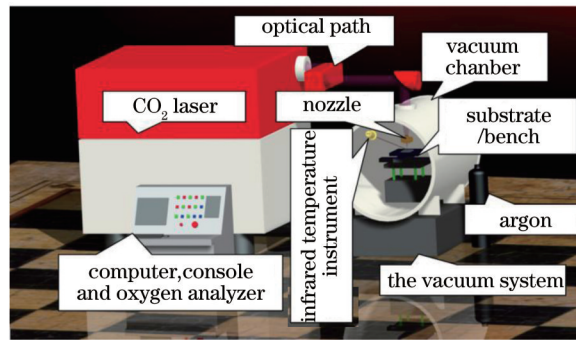


图5 设备配备示意图

Fig.5 Schematic diagram of equipped device

对成形参数按(6)式及其成形参数与残余应力的结论进行选择 and 实验,最终获得的成形样件如图6所示。从图中可以发现样件成形规整、表面平整,将表面加工去除后,内部金属致密,无可见气孔和夹杂。达到了进行力学实验的要求,为推动激光近净成形的应用提供了有力支持。

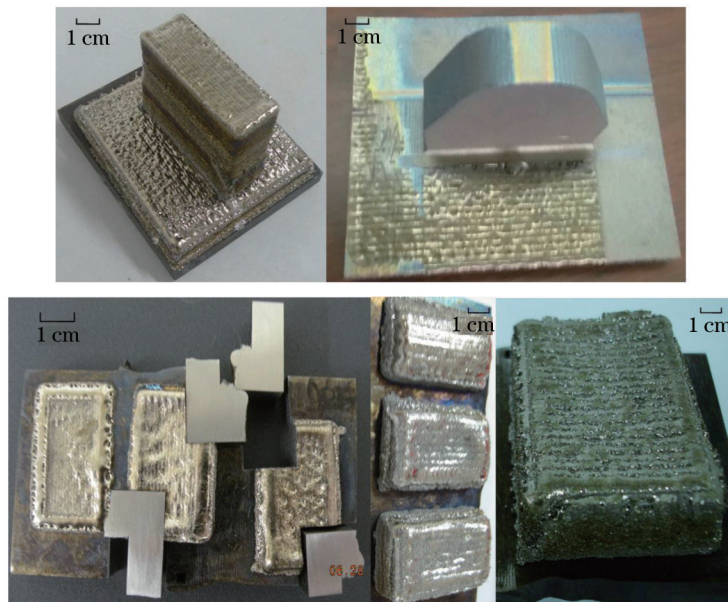


图6 成形样件

Fig.6 Sample of the laser engineering net shaping

6 结 论

1) 利用本研究建立的回归方程可以减少不同参数下成形件残余应力的预测与实验时间,是对既定参数残余应力评估的有效方法,对钛合金激光近净成形工艺参数的选择具有指导意义。

2) 从关键参数与残余应力之间关系的回归方程可以得出分层高度对成形应力的影响最大,成形高度的合理划分,直接影响成形残余应力的大小。

3) 利用多元回归模型建立的多元回归方程对本段激光近净成形关键参数与残余应力关系描述准确,并通过模拟验证,其误差约为5.7%。

4) 该方法在实验中效果明显,成形样件规整、内部致密,可进行力学实验。

参 考 文 献

- 1 B Song, S J Dong, Q Liu, *et al.*. Vacuum heat treatment of iron parts produced by selective laser melting: Microstructure, residual stress and tensile behavior[J]. *Materials & Design*, 2014, 54: 727-733.
- 2 Wang Guilian, Sun Yifeng, Bai Xingwang, *et al.*. Influence of electromagnetic field on temperature field and residual stress in arc deposition rapid prototyping[J]. *Welding Technology*, 2013, 42(3): 6-9.

- 王桂兰, 孙怡峰, 柏兴旺, 等. 电磁场对电弧熔积快速成形温度场及残余应力的影响[J]. 焊接技术, 2013, 42(3): 6-9.
- 3 Lai Youbin, Liu Weijun, Kong Yuan, *et al.*. Influencing factors of residual stress of Ti-6.5Al-1Mo-1V-2Zr alloy by laser rapid forming process[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(7): 1526-1530.
- 来佑彬, 刘伟军, 孔源, 等. 激光快速成形TA15残余应力影响因素的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(7): 1526-1530.
- 4 Liu Hao, Yu Gang, He Xiuli, *et al.*. Three-dimensional numerical simulation of transient temperature field and coating geometry in powder feeding laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1203007.
- 刘昊, 虞钢, 何秀丽, 等. 送粉式激光熔覆中瞬态温度场与几何形貌的三维数值模拟[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1203007.
- 5 Jia Wenpeng, Lin Xin, Chen Jing, *et al.*. Temperature/stress field numerical simulation of hollow blade produced by laser rapid forming[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(9): 1308-1312.
- 贾文鹏, 林鑫, 陈静, 等. 空心叶片激光快速成形过程的温度/应力场数值模拟[J]. 中国激光, 2007, 34(9): 1308-1312.
- 6 Jia Wenpeng, Chen Jing, Lin Xin, *et al.*. Numerical simulation of interaction between metal powder and melting pool during laser rapid forming[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007, 43(5): 546-552.
- 贾文鹏, 陈静, 林鑫, 等. 激光快速成形过程中粉末与熔池交互作用的数值模拟[J]. 金属学报, 2007, 43(5): 546-552.
- 7 Kong Yuan, Liu Weijun, Wang Yuechao, *et al.*. Analysis of process parameters about direct laser metal deposition shaping process of titanium alloys based on Logistic regression model[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1103005.
- 孔源, 刘伟军, 王越超, 等. 基于Logistic回归模型的钛合金件激光直接成形工艺参数分析[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1103005.
- 8 Ni Libin, Liu Jichang, Wu Yaoting, *et al.*. Optimization of laser cladding process variable based on neural network and particle swarm optimization algorithms[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0203003.
- 倪立斌, 刘继常, 伍耀庭, 等. 基于神经网络和粒子群算法的激光熔覆工艺优化[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0203003.
- 9 H E Cheikh, B Courant, S Branchu, *et al.*. Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(3): 413-422.
- 10 Mao Haiying, Feng Zhongke, Gong Yinxi, *et al.*. Researches of soil normalized difference water index (NDWI) of yongding river based on multispectral remote sensing technology combined with genetic algorithm[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(6): 1649-1655.
- 毛海颖, 冯仲科, 巩垠熙, 等. 多光谱遥感技术结合遗传算法对永定河土壤归一化水体指数的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(6): 1649-1655.
- 11 G Ferraioli, C Tinelli, R Lissandrin, *et al.*. Point shear wave elastography method for assessing liver stiffness[J]. World J Gastroenterol, 2014, 20(16): 4787-4796.
- 12 Wang Peng, Feng Xinli. The reasons of resident' high saving rate in our nation: Empirical analysis on the basis of multiple regression methods[J]. Finance & Economics, 2012, (12): 24-31.
- 王鹏, 冯新力. 我国居民高储蓄率的原因是什么——基于多元回归方法的实证分析[J]. 财经科学, 2012, (12): 24-31.

栏目编辑: 张浩佳