激光内送粉变宽扫描成形变壁厚扭曲叶片

石 拓[1],沈 婷[2],李东升[2],傅戈雁[2]

(1. 苏州大学 光电科学与工程学院,江苏 苏州 215021;
2. 苏州大学 机电工程学院,江苏 苏州 215021)

摘 要:传统激光熔覆增材制造方法一般采用等线宽扫描,难以实现单道连续变宽成形。设计了变壁厚扭曲叶片模型,利用光内送粉喷头直接变焦法变化光斑直径,采用层高控制系统测量不同宽度处的实际堆积高度。设计 PI 控制器,通过变化扫描速度,控制不同宽度处的熔道堆积层高一致,保证成形精度。通过连续变焦与闭环控制算法,实现了变壁厚扭曲叶片激光熔覆连续变宽扫描成形。结果表明:扭曲叶片在壁厚 2.52~6.18 mm 范围内均匀变化,最大壁厚误差为-0.58 mm;各段高度大致相同,最大高度误差为-0.22 mm;不同壁厚处的显微组织较为致密均匀。

关键词:变宽扫描; 变壁厚扭曲叶片; PI 控制; 路径规划

中图分类号:TN249 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201948.0805002

Variable width scanning of variable wall thickness twisted blade with laser inside-beam powder feeding

Shi Tuo[1], Shen Ting[2], Li Dongsheng[2], Fu Geyan[2]

(1. School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China;
2. School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China)

Abstract: The conventional laser cladding forming process generally uses equal line-width scanning, which can difficultly realize a continuously variable width deposition. A blade model with variable wall thickness was designed. The inside-beam powder feeding nozzle was applied for the variable laser spot deposition. A deposition height control system was used to measure the actual height of each segment. PI-controllers with scanning speed as the control input were designed to guarantee equal deposition heights in different widths. A segmented deposition height control strategy was developed to realize continuous variable width deposition of the variable wall thickness twisted blade. The structure was formed based on methods of continuously varying focus distance and closed-loop control. The test results indicate that the wall thickness varied uniformly from 2.52 mm to 6.18 mm, and the largest error was -0.58 mm. The heights of the segments were in accordance with the largest error of -0.22 mm. The micro-structure in different wall thickness positions were compact and uniform.

Key words: variable width scanning; variable wall thickness twisted blade; PI control; route planning

收稿日期:2019-03-05; **修订日期**:2019-04-03

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFB1100304);国家自然科学基金(51675359)

作者简介:石拓(1984-),男,副研究员,博士,主要从事激光熔覆增材制造方面的研究。Email:shituo@suda.edu.cn

0 引 言

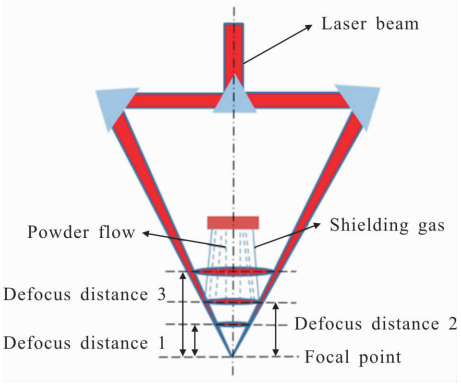
涡轮叶片可使能量在流体动能与机械能之间转换，是航空发动机、燃气轮机、汽车和船舶涡轮增压的主要动力部件[1]。涡轮叶片可分为等壁厚叶片与变壁厚叶片。等壁厚涡轮叶片由于叶片壁面受力情况不同，叶身各处所需壁厚亦不同。若叶片壁厚按强度和刚度的最大值设计，既增加质量，又增加制造成本。同时，等壁厚叶片的设计使尾缘半径较大，气动性能会受到影响[2]。涡轮叶片设计的目标函数应该为质量和效率的综合最优值，且叶型应连续光滑[3]。变壁厚叶片根据叶片壁面受力的实际情况设计以提高性能，减轻质量，节约成本。变壁厚叶片结构设计日益复杂，厚度变化愈发明显，传统工艺加工叶片流程复杂、材料去除量大、工时长。因此，需要探索成形变壁厚叶片的新方法。激光熔覆成形(LCF)增材制造是 20 世纪 80 年代末逐渐发展起来的金属材料自由成形的制造方法，是一种节材、高效的新型制造方式[4-5]。

国内外采用激光增材制造方法成形变壁厚结构有如下报道：陶亚云等人通过激光选区熔化(SLM)成形了某型号涡轮叶片的工作叶片和导向叶片[6]。SLM 激光光斑小，扫描速度快，填充扫描法可成形复杂精密的变壁厚结构，但零件整体尺寸受限，且不能实现破损叶片修复。美国桑地亚国家激光近净成形实验室堆积了变壁厚扭曲叶片，但具体工艺方法未见报道[7]。Qi H.等采用变熔滴宽度的方法成形了变壁厚叶片，该方法适用于成形壁厚变化较小的结构件[8]。库卡工业-徕斯激光与 Fraunhofer 激光技术研究所共同研制了变焦激光熔覆喷头，不改变工具中心点，使用电动镜片在线调整光线直径达到变焦目的，但壁厚变化范围有限[9]。苏州大学陆斌、吴继琸等人采用不搭接直接成形变壁厚薄壁墙与叶片的方法，获得了壁厚从 1 mm 变化到 3 mm 的直壁墙与叶片[10-11]。以上几种方法均为在开环条件下，通过模型或经验值确定不同宽度处的工艺参数实现变宽堆积。成形系统无反馈值，成形过程中受外界影响较大，导致成形的直墙与叶片精度和成功率都较低。

文中采用笔者所在实验室自主研发的中空激光内送粉喷头和层高控制系统，利用中空光束可通过变离焦量改变光斑直径的特性，研究变壁厚扭曲叶片的直接成形。

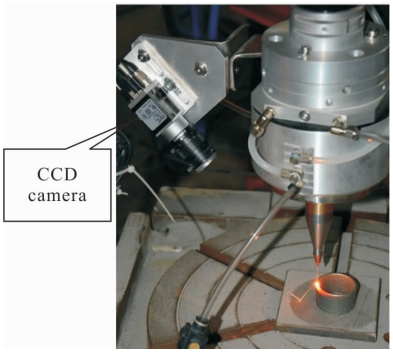
1 实验方案

实验采用中空激光内送粉喷头(图 1)[12]，光纤激光经准直镜准直后变为平行激光束，再通过中空光内送粉喷头反射镜组将实心光束转变成空心环形光束，为内置粉管创造空间，而光斑变为中空环形光斑，可沿中轴线上下离焦改变离焦量，获得不同尺寸的光斑[13]。除光斑尺寸外，激光功率、扫描速度等工艺参数对熔道均有影响[11]，单因素变量的实验方法无法直接实现变壁厚叶片的成形。为了保证熔道壁厚逐渐变化且熔道各处高度一致，采用逐段控制工艺参数的方法。根据壁厚将叶片沿扫描方向分为多段，假设每段段内壁厚相等，逼近拟合变宽成形变壁厚扭曲叶片。由于离焦量主要影响宽度，扫描速度主要影响高度，所以文中利用喷头可变离焦的特性控制叶片壁厚变化，且通过控制各段扫描速度来控制熔道高度，并为各段匹配合适的激光功率以确保粉末有足够能量熔化。



(a) 原理图

(a) Schematic diagram



(b) 实物图

(b) Real product

图 1 光内送粉喷头

Fig.1 Inside-beam powder feeding nozzle

设计变壁厚扭曲叶片零件模型如图 2 所示，壁厚在 2.5~6 mm 范围内变化，对应圆弧半径为 145 mm，角度为 40°，叶片弧长约 110 mm，高约 80.3 mm，以圆弧中点为定点，扭曲 11°。实验采用苏州大学激光制造技术研究所研发的 CH-R40 型光内送粉喷头，其离焦量与光斑直径的对应关系见图 2(及表 1)。

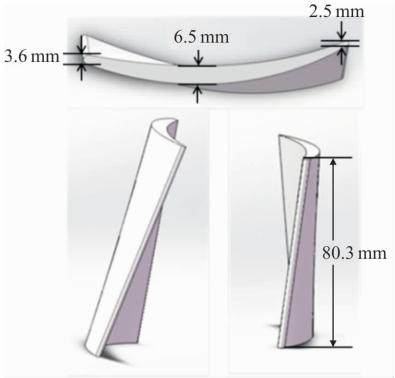


图 2 变壁厚扭曲叶片设计模型

Fig.2 Design model of the variable wall thickness twisted blade

表 1 不同离焦量对应的光斑直径

Tab.1 Laser spot diameter in different defocus distances

Defocus distance/mm	Measured laser spot diameter/mm
-8	5.50
-7	4.80
-6	4.10
-5	3.40
-4	2.80
-3	2.20
-2	1.80
-1	1.30
0	1.00

2 实验设计

实验中基体材料为 304 不锈钢，粉末材料为 Fe313 铁基合金，保护气和载粉气均为氮气。激光熔覆成形闭环控制系统结构如图 3 所示 [14-15]，其中包括 6 轴 KUKA 机械手、GTV 高精度载气送粉器、型号 YLS-2000-TR 的 IPG 光纤激光器、中空光内送粉喷头等。采用高速 CCD 相机获取熔池图像(图 1(b))，在工控机软件中计算出层高值，再通过 ProfiNet 通信将层高数据实时传输给机器人控制器[15]。

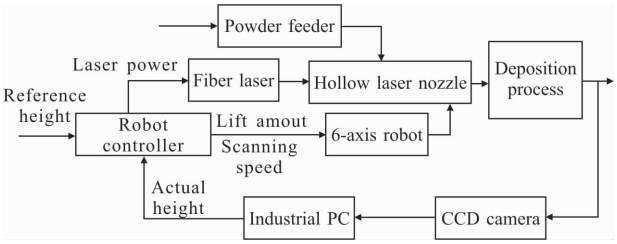


图 3 变宽度扫描成形闭环控制系统

Fig.3 Closed-loop control system for variable width deposition

离焦量是成形变壁厚叶片的重要工艺参数。采用高速 CCD 相机检测的不同离焦量下的光内送粉喷头光斑形貌如图 4 所示。

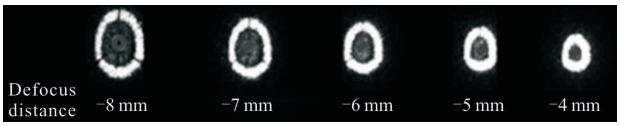


图 4 不同离焦量下的光斑示意图

Fig.4 Laser spots in different defocus distances

2.1 成形路径

激光熔覆成形各工艺参数中，光斑直径对熔道宽度的影响最大，而光斑直径是通过变化离焦量来直接控制的。因此，可通过变离焦量来变化熔道宽度。在变宽成形前，需要进行大量基础实验，获得离焦量与宽度的大致对应关系。文中采用逐段变参数方法成形变壁厚叶片，成形前须根据叶片模型各段宽度计算合适的离焦量，确保能一次扫描直接获得宽度渐变的熔道。激光变宽扫描成形初始 *XOY* 平面径如图 5 所示，图中 *C* 点为圆弧 *AB* 的圆心，弧 *AB* 是图中红色弧线，为激光喷头 *XOY* 平面的运动路

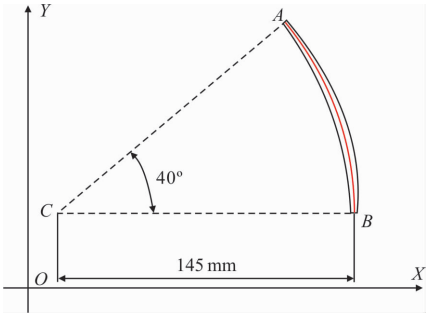


图 5 变壁厚叶片 *XOY* 平面路径

Fig.5 Route in *XOY* plane for the variable wall thickness blade

径。因弧 AB 不同位置对应的离焦量不同，图中将弧 AB 包围的黑色弧线视为不同位置光斑外径示意图，机械手上下移动即可改变光斑尺寸。

由于采用逐段变参数的方法，成形过程中机械手 Z 轴位置根据各段实际熔高实时调整。文中设计的变壁厚叶片为扭曲叶片，每层都需相对于圆弧的中点旋转扭曲一定角度，再逐层堆积成形大扭曲角的变壁厚叶片。成形过程中 XOY 平面路径变化如图6 所示，圆弧 $A0B0$ 为成形扭曲叶片的初始轨迹，设计的扭曲角为 11°，则圆弧 $A1B1$ 为扭曲 11°时的激光喷头运动轨迹。圆弧 $A0B0$ 相对于中点 D 点旋转扭曲 11°得到圆弧 $A1B1$，圆弧的旋转实际是圆心围绕圆弧中心旋转，即 $C0$ 围绕 D 旋转得到点 $C1$，点 $C1$ 为圆弧 $A1B1$ 的圆心。

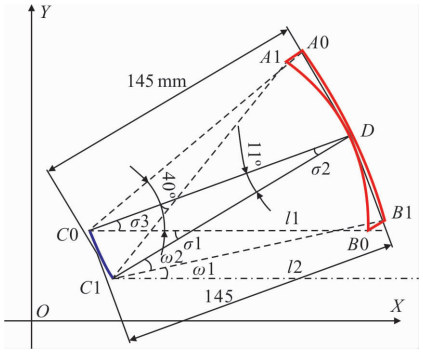


图 6 叶片 XOY 平面路径变化示意图

Fig.6 Route variation in XOY plane for the blade

为了便于计算且使公式更为直观，文中将每层每段圆弧位置都设定为二维空间数组。i 为堆积层号，j 为当前层段号，如 $P0(i,j)$ 为第 i 层第 j 段的圆心位置，由于 KUKA 机械手运动是在三维空间下运动，式中 $P0(i,j).x$ 为表示第 i 层第 j 段圆心在 X 轴方向的位置，$P0(i,j).y$ 和 $P0(i,j).z$ 分别为 Y 和 Z 轴方向的位置。

$$P0(i,j).x=P(i,j).x+R\cos(200+\gamma(i-1)) \tag{1}$$

$$P0(i,j).y=P(i,j).y+R\sin(200+\gamma(i-1)) \tag{2}$$

式中：$P(i,j)$ 为图 6 中 D 点坐标；R 为半径；γ 为分层扭曲角。

由于 $l1$ 与 $l2$ 平行，所以 $\omega1+\omega2=\sigma1=\sigma2+\sigma3$，又因为 $\omega2=\sigma3$，所以 $\omega1=\sigma2$。在成形过程中，$\omega1=(i-1)\gamma$，所以起点坐标变化如公式(3)、(4)：

$$P1(i,1).x=P0(i,j).x+R\cos(\gamma(i-1)) \tag{3}$$

$$P1(i,1).y=P0(i,j).y+R\sin(\gamma(i-1)) \tag{4}$$

式中：$P1(i,1)$ 为各层圆弧起点。

$$P2(i,1).x=P0(i,j).x+R\cos(\gamma(i-1)+\theta) \tag{5}$$

$$P2(i,1).y=P0(i,j).y+R\sin(\gamma(i-1)+\theta) \tag{6}$$

式中：$P2(i,1)$ 为圆弧任意一点；θ 为对应圆弧角。

2.2 成形速度闭环控制

通过大量单道实验发现，离焦量、激光功率、送粉量等工艺参数对熔道宽度和高度均有影响。其中，扫描速度的变化同时影响熔池的激光能量输入和粉末质量输入，是影响熔道高度的主要因素。文中通过控制扫描速度来控制熔道高度，使不同宽度处的熔道高度一致。由于采用逐段变参数成形的方式，需要预先设定每层每段的期望高度。控制器根据期望高度与测得的实际高度计算单层堆高偏差及总堆高偏差，通过 PI 控制算法不断修正扫描速度，使每层每段实际高度逼近于期望高度。文中设定各段期望高度相同，熔覆成形时的堆高偏差如公式(7)：

$$e(i,j)=h_r(i)-h(i,j) \tag{7}$$

式中：$h_r(i)$ 为第 i 层各段的期望高度，mm；$h(i,j)$ 为层高传感器测得的第 i 层第 j 段的实际高度，mm；$e(i,j)$ 为第 i 层第 j 段的堆高偏差，mm。

速度控制器如公式(8)：

$$v(i+1,j)=v(i,j)+K_Pe(i,j)+K_I\sum e(m,j) \tag{8}$$

式中：K_P 为数字比例系数，s^{-1}；K_I 为数字积分系数，s^{-1}；$v(i+1,j)$ 为第 $i+1$ 层第 j 段的扫描速度，mm/s。

PI 速度控制器可使在各段离焦量、激光功率等工艺参数各不相同的条件下，通过控闭环制扫描速度来使不同宽度处熔道高度相等，而熔道宽度则是通过 Z 方向的离焦变斑以及激光功率变化进行开环控制。

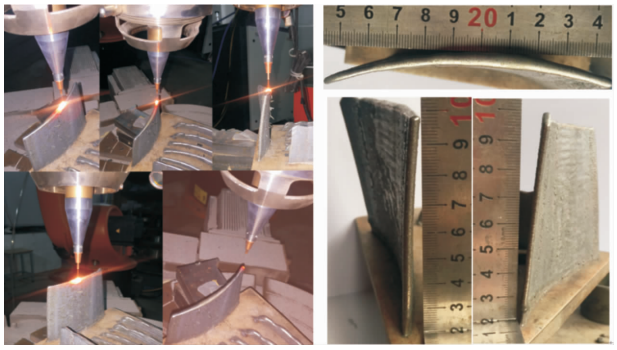
2.3 成形实验

不同宽度处的离焦量均选取在[−8 mm，−2 mm]自愈合区间内，设定各段期望高度 h_r 为 0.22 mm，每层扭曲角度为 0.03°，总堆积层数为 365 层，叶片总扭曲角度约为 11°。成形扭曲叶片模拟件各段初始参数见表 2，其中 $K_P=-0.002\,8\ s^{-1}$，$K_I=-0.000\,4\ s^{-1}$。成形过程如图 7(a)所示，成形件如图 7(b)所示。

表 2 各段初始参数

Tab.2 Initial parameter of each segment

Segment number N	Defocus distance Z/mm	Laser power P/W	Scanning speed v /mm·s^{-1}	Desired wall thickness W_r /mm
1	−5	950	4	3.6
2	−6	1 100	4	4.5
3	−7	1 250	4	5.0
4	−8	1 400	4	6.0
5	−7	1 250	4	5.5
6	−6	1 100	4	4.5
7	−5	1 000	4	4.0
8	−4	900	4	3.5
9	−3	800	4	3.0
10	−2	700	4	2.5



(a) 成形过程 (b) 成形件

(a) Deposition process (b) Formed part

图 7 变壁厚扭曲叶片

Fig.7 Variable thickness twisted blade

图 7 叶片是按照公式(1)~(6)模拟叶片模型成形而得。在工程应用中将叶片真实数学模型切片后，公式(1)~(6)会相应变化，公式(7)~(8)不变，即可成形出真实形状的变宽叶片。

3 实验结果及分析

3.1 壁厚变化

成形的变壁厚扭曲叶片模拟件壁厚在 2.52 mm 和 6.18 mm 间均匀变化，各段实际壁厚与期望壁厚误差较小，整体壁厚接近于设计尺寸，最大误差变为−0.58 mm，如表 3 所示。

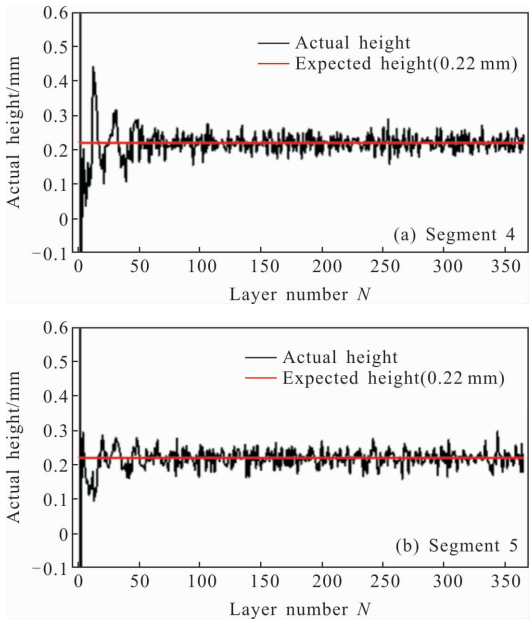
表 3 各段壁厚及误差

Tab.3 Wall thicknesses and errors of each segment

Segment number N	Measured laser spot diameter/mm	Desired wall thickness W_r/mm	Actual wall thickness W_r/mm	Error ΔW /mm
1	3.40	3.6	3.74	−0.14
2	4.10	4.5	4.28	0.22
3	4.80	5.0	4.8	0.20
4	5.50	6.0	6.18	−0.18
5	4.80	5.5	5.68	−0.18
6	4.10	4.5	5.08	−0.58
7	3.40	4.0	4.12	−0.12
8	2.80	3.5	3.6	−0.10
9	2.20	3.0	3.04	−0.04
10	1.80	2.5	2.52	−0.02

3.2 高度变化

变壁厚扭曲叶片模拟件各段总堆高均能通过层高控制软件直接获得，比游标卡尺直接读数更为精确。在成形程序中，将 PI 控制器中的总堆高误差设定为全局变量，即可在 KUKA 机械手操控面板上实时观察各段的累积误差。层高控制软件获得的各段每层高度值使用 origin 软件制出各段高度曲线如图 8 所示。可以看出，各段高度曲线在 60 层之后基本上能稳定地在期望高度 0.22 mm 附近波动，且波动幅度较小，说明速度 PI 控制器具备较好的控制性能。



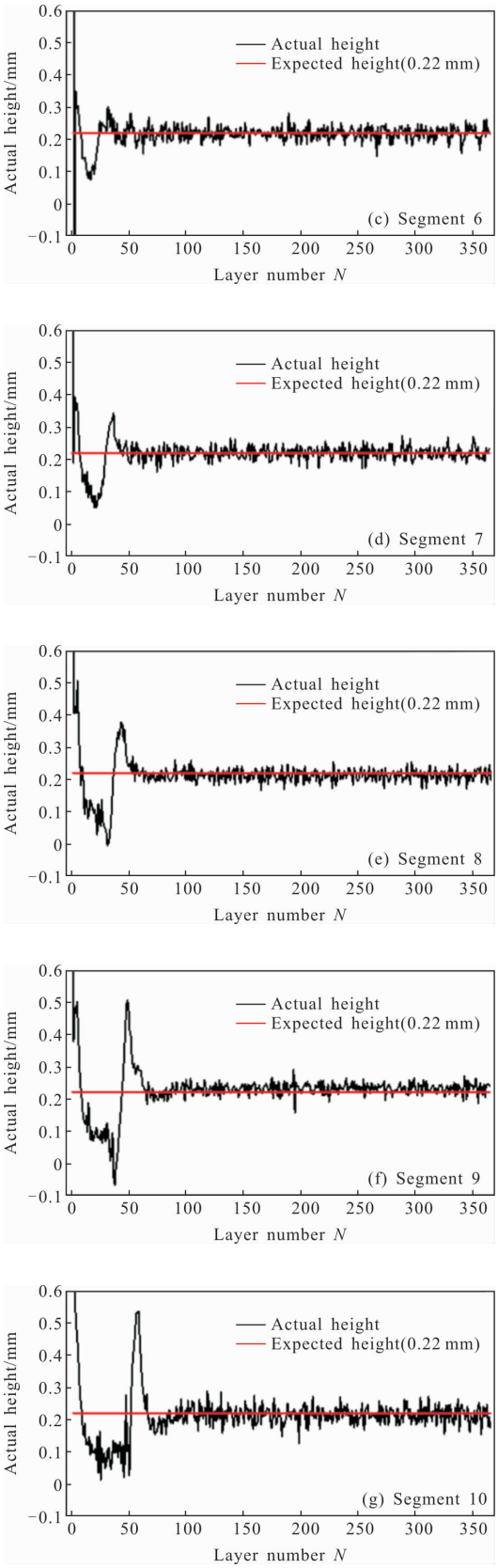


图 8 扭曲叶片各段高度曲线

Fig.8 Deposition height curves of the segments of the twisted blade

在整个成形达到较为稳定后，每间隔一段时间采集一次扫描速度，表 4 是采集的三组扫描速度，再求各段扫描速度的平均值作为稳定时的速度。60 层之后，各段扫描速度变化率较小，能较为稳定地在一定区间内波动。

表 4 各段稳定后的扫描速度计算

Tab.4 Calculation of the scanning speeds after stability of each segment

Segment number N	v_1/mm·s^{-1}	v_2/mm·s^{-1}	v_3/mm·s^{-1}	Stabled speed /mm·s^{-1}
1	6.99	6.53	6.50	6.67
2	5.32	5.30	5.41	5.34
3	4.59	4.55	4.45	4.53
4	3.47	3.44	3.34	3.42
5	2.90	3.33	3.31	3.18
6	3.72	3.61	3.51	3.61
7	4.87	4.89	4.91	4.89
8	6.11	6.07	6.06	6.08
9	7.72	7.79	7.79	7.77
10	5.96	6.07	5.97	6.00

从图 7(b)中可以看出，叶片各宽度处的整体高度大致相同，表 5 为各段的实际高度，其中最大误差为−0.22 mm，各段高度均在期望总堆高(80.3 mm)附近，成形系统具备较高的成形精度。

表 5 各段实际总高度及误差

Tab.5 Actual total heights and errors of each segment

Segment number N	Height h/mm	Height error Δh/mm
1	80.08	−0.22
2	80.28	−0.02
3	80.25	−0.05
4	80.27	−0.03
5	80.32	0.02
6	80.26	−0.04
7	80.30	0.00
8	80.31	0.01
9	80.30	−0.00
10	80.33	0.03

3.3 成形件组织分析

叶片显微组织如图 9 所示，整体较为致密。第 4段由于功率大，扫描速度较慢，热量累积形成尺寸较大的晶粒，在 20 μm 左右；第 10 段功率低，扫描速度较大，保温时间短，晶粒较为细小，均小于 10 μm。硬度值与壁厚呈负相关，壁厚宽处硬度值低，壁厚窄处硬度高，见表 6。结合表 3 与表 5，晶粒大硬度值低，晶粒小硬度高，这是由于硬度仪压头压入金属使金属产生塑性变形，塑性变形实质是位错运动，晶界会阻碍位错运动。晶粒越小，晶界越多，发生位错运动越难，金属形变阻力越大，所以硬度值越高。由表 6 可知显微硬度在 590~740 HV 之间，符合试验材料 Fe313 铁基合金硬度范围。

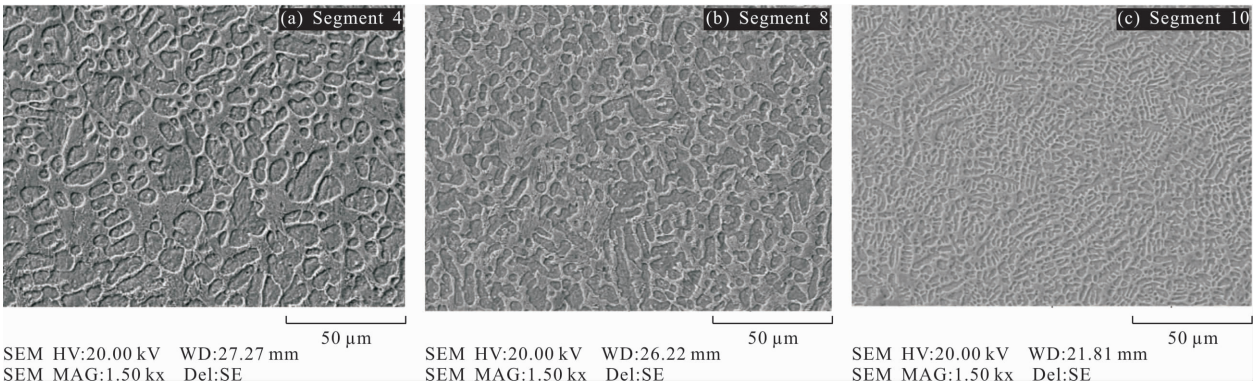


图 9 不同宽度处的显微组织

Fig.9 Microstructures at different width positions

表 6 显微硬度

Tab.6 Microhardness

Segment number *N*	Microhardness/HV
4	591.88
5	623.48
6	652.35
7	677.23
8	689.67
9	701.65
10	734.33

4 结 论

文中结合激光变焦与闭环控制方法实现了变壁厚扭曲叶片的单道变宽直接成形，得到如下结论：

(1) 设计了变壁厚扭曲叶片三维模型，规划了成形路径。采用逐段变化扫描速度的方法，通过变化光内送粉喷头离焦量，改变光斑直径来匹配叶片厚度。使用层高控制系统测量熔层高度，设计速度 PI 控制器在成形过程中不断校正扫描速度，使不同宽度处的堆积高度相等，实现了叶片单层熔高与总堆高的闭环控制。各段高度控制曲线稳定收敛，波动幅度小。

(2) 成形的变壁厚扭曲叶片扭曲角为 11°，壁厚范围为 2.52~6.18 mm，最大壁厚误差为−0.58 mm，期望总高度为 80.3 mm，最大堆高误差为−0.22 mm，具备较高精度。

(3) 晶粒尺寸与壁厚呈正相关，均在 20 μm 以下，具有较好的组织性能；显微硬度与壁厚呈负相关，在 590~740 HV 之间，符合试验材料 Fe313 铁基合金硬度范围。

参考文献：

[1] Santos E C, Shiomi M, Osakada K, et al. Rapid manufacturing of metal components by laser forming [J]. ***International Journal of Machine Tools & Manufacture***, 2006, 46(12−13): 1459−1468.

[2] Yu Kuahai, Yang Xi, Yue Zhufeng. Parameterized molding design for variable thickness cooling turbine blade [J]. ***Journal of Machine Design***, 2012, 29(2): 8−11. (in Chinese)
虞跨海, 杨茜, 岳珠峰. 变壁厚涡轮冷却叶片参数化造型设计[J]. 机械设计, 2012, 29(2): 8−11.

[3] 吴立强, 尹泽勇, 蔡显新. 航空发动机涡轮叶片的多学科

设计优化[J]. 航空动力学报, 2005(5): 795-801.

[4] Xu Bingshi, Dong Shiyun, Men Ping, et al. Quality characteristics and nondestructive test and evaluation technology for laser additive manufacturing alloy steel components [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2018, 47 (4): 0401001. (in Chinese)
徐滨士, 董世运, 门平, 等. 激光增材制造成形合金钢件质量特征及其检测评价技术现状[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(4): 0401001.

[5] Deng Zhiqiang, Shi Shihong, Zhou Bin, et al. Laser cladding forming of arcuate cantilevered entity part [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2017, 46(10): 1006004. (in Chinese)
邓志强, 石世宏, 周斌, 等. 弧形悬垂实体结构激光熔覆成形[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(10): 1006004.

[6] Tao Yunya, Xue Weipeng, Tang Hongfei, et al. Application of laser additive manufacturing technology in turbine blade and vane [J]. ***Gas Turbine Experiment and Research***, 2016, 29(6): 44-50, 55. (in Chinese)
陶云亚, 薛伟鹏, 唐洪飞, 等. 激光增材制造技术在涡轮叶片中的应用[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2016, 29(6): 44-50, 55.

[7] Griffith M. The LENSTM success story [J]. ***Sandia Technologies***, 2001, 3(3): 9-10.

[8] Qi H, Azer M, Singh P. Adaptive toolpath deposition method for laser net shape manufacturing and repair of turbine compressor airfoils [J]. ***International Journal of Advanced Manufacturing Technology***, 2010, 48(1-4): 121-131.

[9] Reis Lasertec GmbH. Zomm laser cladding nozzle [EB/OL]. [2018 -04 -12].http://www.reislasertec.de/cn/produkte/laser -processing-optics/powder-optics/00032.

[10] Lu Bin, Zhu Gangxian, Wu Jizhuo, et al. Laser direct forming process of thin-walled blade using variable spot by inside-beam powder feeding [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2015, 42(12): 1203003. (in Chinese)
陆斌, 朱刚贤, 吴继琸, 等. 基于光内送粉激光变斑直接成形薄壁叶片的工艺研究[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1203003.

[11] Wu Jizhuo, Zhu Gangxian, Lu Bin, et al. Influence of self-regulation-effect on forming quality of thin-walled parts with variable laser spot cladding [J]. ***Journal of Xi' an Jiaotong University***, 2016, 50(1): 145-150. (in Chinese)
吴继琸, 朱刚贤, 陆斌, 等. 自愈合效应对光内送粉激光变斑熔覆成形薄壁件的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(1): 145-150.

[12] Shi T, Lu B, Shi S, et al. Laser metal deposition with spatial variable orientation based on hollow-laser beam with internal powder feeding technology [J]. ***Optics & Laser Technology***, 2017, 88: 234-241.

[13] Zhu G, Li D, Zhang A, et al. The influence of laser and powder defocusing characteristics on the surface quality in laser direct metal deposition[J]. ***Optics & Laser Technology***, 2012, 44(2): 349-356.

[14] Shen Ting, Shi Tuo, Fu Geyan, et al. Laser cladding forming and closed-loop control of thickness-variable eccentric ring structure [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2018, 45 (3): 0302007. (in Chinese)
沈婷, 石拓, 傅戈雁, 等. 变壁厚偏心圆环结构激光熔覆成形及闭环控制[J]. 中国激光, 2018, 45(3): 0302007.

[15] Shi Tuo, Lu Bingheng, Wei Zhengying, et al. Research of closed-loop control for desired layer height in laser metal deposition [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2017, 44 (7): 0702004. (in Chinese)
石拓, 卢秉恒, 魏正英, 等. 激光金属沉积堆高闭环控制研究[J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0702004.