

基于光内送粉激光变斑直接成形薄壁叶片的工艺研究

陆 斌 朱刚贤 吴继璋 石世宏 傅戈雁

苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021

摘要 针对薄壁叶片不等宽的结构特征,提出基于光内送粉方式采用变光斑一次扫描而非多道搭接直接成形出不等宽熔覆层的方法,逐层堆积直接制造薄壁叶片。研究了变斑过程中等高度单道及“阶梯型”单道对薄壁件成形质量的影响规律。实验结果表明:在保证送粉量足够的条件下,变光斑过程中通过实时变扫描速度及激光功率,能够直接熔覆出高度相等、宽度逐渐变化的单道熔覆层;基于等高度单道的变斑堆积过程中熔覆层增长高度并不一致,宽高比大的部位生长高度要大于宽高比小的部位的问题,建立了熔覆层提升量、单层生长高度和熔覆层截面曲线阶数的理论模型,提出了“阶梯型”单道变斑直接成形方法,解决了熔覆层高度生长不一致的问题,获得了熔覆层宽度从1 mm到3 mm连续变化的薄壁叶片,为光内送粉激光直接成形薄壁变壁厚类零件提供新方法。

关键词 激光技术;激光直接成形;光内送粉;变光斑;薄壁叶片

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.1203003

Laser Direct Forming Process of Thin-Walled Blade Using Variable Spot by Inside-Beam Powder Feeding

Lu Bin Zhu Gangxian Wu Jizhuo Shi Shihong Fu Geyan

College of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

Abstract With unequal width structure characteristics of thin-walled blades, single track by variable laser spot based on coaxial inside-laser powder feeding rather than multi-track overlapping is adopted, and the thin-walled blade can be fabricated layer by layer directly. The forming quality of thin-walled blades is investigated by variable laser spot based uniform height and stepped single track. The experimental results show that a uniform height cladding layer with different widths can be got by controlling scanning speed and laser power under the condition with sufficient powder mass flow rate. The growth rate of cladding layers isn't consistent based on uniform height single-trace cladding layer, and the large ratio of width to height position increases quickly. The theoretical model among layer thickness of Z axis, height of single-trace cladding layer and the section curve order of cladding layer is established, and the stepped single track method is put forward to solve the problem of inconsistent growing height. The thin-walled blade with good forming quality can be achieved. This new method can be provided for forming unequal width blade by laser direct forming with coaxial inside-laser powder feeding.

Key words laser technique; laser direct forming; inside-beam powder feeding; variable laser spot; thin-walled blade

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

1 引 言

在航空、航天等国防领域中大型变壁厚薄壁零件占据着重要的地位,其中涡轮叶片是最具代表性的零件

收稿日期: 2015-06-01; 收到修改稿日期: 2015-08-17

基金项目: 国家自然科学基金(51405319, 61475107)、江苏省自然科学基金(BK2012183)、中国博士后科学基金(2012M521117, 2013T60556)

作者简介: 陆 斌(1989—),男,硕士研究生,主要从事激光快速成形方面的研究。E-mail: 182806850@qq.com

导师简介: 朱刚贤(1980—),男,博士,副教授,主要从事激光增材制造及数值模拟方面的研究。

E-mail: gxzhu@suda.edu.cn(通信联系人)

之一^[1]。为了更好地解决叶片承温能力,进一步提高叶片的冷却效率,其设计的结构日益复杂,壁厚逐渐变薄,使得其制造技术面临很大的挑战^[2]。激光直接成形技术是一种能直接制造出全致密且力学性能优异的金属零件的先进制造技术,该技术在航空、航天等领域具有广阔的应用前景^[3-5]。目前激光直接成形变壁厚类薄壁零件均是在一定扫描路径下采用多道搭接堆积成形的,搭接率的大小直接影响成形表面宏观平整度。如果搭接率选择不合理,其成形表面的尺寸精度将很难保证,严重时甚至会导致成形无法进行,且多道搭接易造成熔覆层冷却不均匀引起能量累积,从而导致熔覆层开裂等缺陷的产生^[6-8]。而多道搭接时的扫描路径规划问题也是激光直接成形中的关键,这将直接影响零件的成形效率和质量。扫描路径规划不合理不仅会造成效率低下,更会引起内部热应力分布不均,直接影响熔覆层的微观组织及力学性能^[9]。为解决多道搭接产生的缺陷问题,采用在单道工艺中实时变激光光斑方式,一次扫描而非多道搭接直接熔覆出不等宽熔覆层,逐层堆积直接成形出变壁厚薄壁叶片。此外,本课题组开发的“光内送粉”方式相对“光外送粉”能够实现真正意义上的光粉同轴耦合,使粉末束具有良好的粉末聚焦特性,其粉末利用率能达到68%以上^[10-11]。

所以,基于“光内送粉”方式,研究在单道变斑熔覆过程中,在满足熔覆层高度增长一致条件下宽度逐渐变化时熔覆层工艺参数的变化规律;研究基于等高度单道及“阶梯型”单道对变斑直接成形薄壁叶片成形质量的影响规律。为变壁厚类薄壁零件的激光直接成形工艺提供新方法。

2 实验材料与方 法

实验用金属粉末:Fe313,粉末粒度:45~74 μm ,其化学成分(质量分数,%)为:0.1 C,2.5~3.5 Si,13~17 Cr,0.5~1.5 B,余量为Fe;基材为304不锈钢,其化学成分(质量分数,%)为:0.08 C,0.96 Si,1.85 Mn,0.029 P,0.027 S,17.31 Cr,8.01 Ni,余量为Fe,几何尺寸为150 mm×100 mm×10 mm。实验装置由2 kW 光纤激光器、6轴Kuka机器人、可倾式旋转工作台、光内同轴送粉喷嘴、送粉器及辅助装置组成。具体实验装置如图1所示。采用的光内同轴送粉喷嘴将单束圆柱形实心激光束转换成空心环形激光束,单根粉管置于中空激光内部,实现粉管与聚焦光束的光轴真正同轴安装,具体原理如图2(a)所示^[12]。其喷嘴聚焦状态如图2(b)所示。

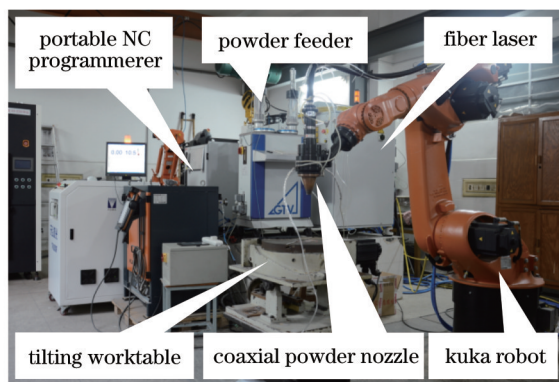


图1 激光加工成形系统

Fig.1 Laser forming system

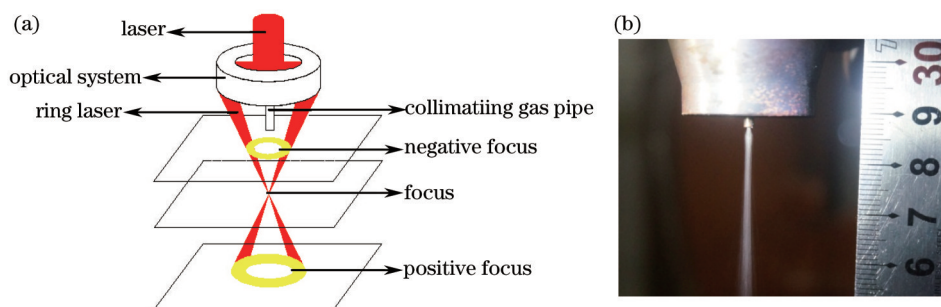


图2 (a) 光内同轴送粉示意图; (b) 喷嘴聚焦状态

Fig.2 (a) Schematic diagram of inside-beam powder feeding; (b) nozzle focused state

依据前期的单道工艺实验,在重力送粉方式下优化的参数为:激光功率 $P=1000\text{ W}$,送粉量 $M_p=8\text{ g/min}$,扫描速度 $V=15\text{ mm/s}$,激光离焦量为 $Z_f=-3\text{ mm}$ 时,获得的单层熔覆层宽度 $w=1.53\text{ mm}$,高度 $h=0.46\text{ mm}$ 。

按照熔覆层高度为 $h=0.46$ mm 变斑过程中熔覆层高度的优化评价指标,在重力送粉方式下保持送粉量 $M_p=8$ g/min 不变的条件下,发现在变化激光离焦量过程中,通过实时调整激光功率及扫描速度能够获得高度增长一致、宽度逐渐变化的熔覆层,所获得具体工艺参数间的对应关系及熔覆层尺寸如表 1 所示。

表 1 不同工艺参数下熔覆层尺寸大小

Table 1 Section sizes of cladding layers with different process parameters

Defocus distance /mm	Power /W	Scanning speed /(mm/s)	Layer width /mm	Layer height /mm
0.5	400	10	1.18	0.47
1	600	14	1.36	0.47
2	800	15	1.46	0.49
2.5	1000	14	1.55	0.49
-3	1000	15	1.53	0.46
-4	900	11	1.90	0.47
-5	1000	10	2.43	0.49

设计的单道叶片尺寸:宽度由 1 mm 先逐渐变化到 3 mm,后逐渐缩小到 2 mm,高度为 0.46 mm 保持不变,将单道熔覆层分为 10 段,具体扫描轨迹如图 3 所示,其各段对应的工艺参数如表 2 所示。如图 4 所示为光斑尺寸变化图,可以看出,每层熔覆层细分 10 小段,每一小段确定一个功率及扫描速度,采用离散阶梯段拼接逼近连续变化。所要指出的是:由于在区域 $E \rightarrow F$ 段激光离焦量是由 +2.5 mm 突变到 -3 mm,离焦量变化较大,采用逐层随机选择不同的点为突变点(图中表现为:逐层虚线的横坐标是随机变化),因此切换点就表现为激光光斑直径的突变。

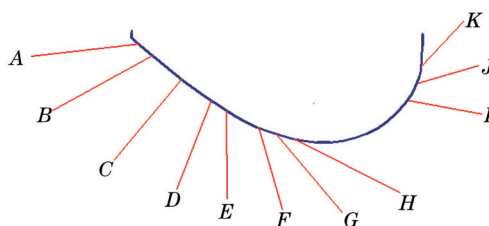


图 3 扫描路径

Fig.3 Scanning path

表 2 不同区域对应工艺参数

Table 2 Process parameters with different regions

Region	Defocus distance /mm	Power /W	Scanning speed /(mm/s)
A→B	0.5	400	10
B→C	0.5→1	400→600	10→14
C→D	1→2	600→800	14→15
D→E	2→2.5	800→1000	15→14
E→F	2.5→-3	1000	14→15
F→G	-3→-4	1000→900	15→11
G→H	-4→-5	900→1000	11→10
H→I	-5→-4	1000→900	10→11
I→J	-4→-3	900→1000	11→15
J→K	-3	1000	15

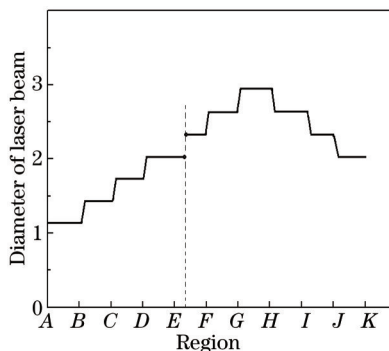


图 4 光斑尺寸变化图

Fig.4 Variation trend of laser beam diameter

3 实验结果及分析

3.1 等高度单道变斑直接成形

依据参考文献[13]提升量模型,计算出不同离焦量下的提升量如表3所示。

表3 不同工艺参数下熔覆层尺寸及提升量大小

Table 3 Section sizes of cladding layers and ΔZ with different process parameters

Defocus distance /mm	Power /W	Scanning speed /(mm/s)	Layer width /mm	Layer height /mm	ΔZ /mm
0.5	400	10	1.18	0.47	0.35
1	600	14	1.36	0.47	0.34
2	800	15	1.46	0.49	0.35
2.5	1000	14	1.55	0.49	0.35
-3	1000	15	1.53	0.46	0.33
-4	900	11	1.90	0.47	0.32
-5	1000	10	2.43	0.49	0.34

由表3可以看出提升量 ΔZ 基本稳定在 0.34 mm,所以 $\Delta Z = 0.34$ mm 设定为单层行程提升量。在表3工艺参数下,进行逐层堆积成形,堆积层数 $n=80$,总高度 $H=25$ mm,成形的叶片样件如图5所示。

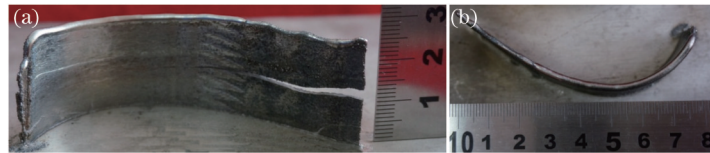


图5 基于等高度、宽度变化熔覆层的薄壁叶片成型件。(a)主视图;(b)俯视图

Fig.5 Formed part of thin-walled blade based on cladding layer with gradually varied widths in same height. (a) Front view; (b) top view

从图5可以看出,壁厚最窄处厚度为1 mm,最宽处厚度为3 mm,满足初步的设计要求。同时,虽然单道熔覆时单层熔覆高度相等,但是在多层堆积时宽高比(宽高比的定义:单层熔覆宽度与高度的比值)不同部位,熔覆层生长高度并不一致,呈现出宽高比大的部位生长高度要大于宽高比小的部位。且随生长高度逐渐增加,此趋势会更加明显。

主要由于在激光变斑离焦过程中其激光光强分布发生了变化,光强分布如图6所示。虽然通过工艺参数实时变化能够达到熔覆层高度一致,宽度逐渐变化的目的(如图7所示),但是由于离焦造成光强分布变化,会造成熔覆层截面曲线的阶数发生了变化,或者说随熔覆层宽高比逐渐变化,熔覆层截面曲线的阶数发生了变化。

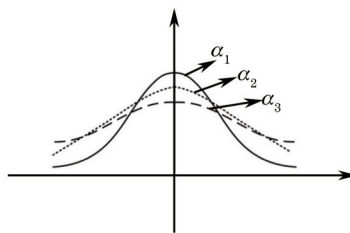


图6 激光离焦光强分布

Fig.6 Laser intensity distribution with different focusing states



图7 变光斑熔覆层截面几何形貌示意图

Fig.7 Section geometry morphology of cladding layers under variable laser spot

将熔覆层截面轮廓曲线方程(如图8所示)简化为

$$f(x) = -ax^\alpha + h, \quad (1)$$

式中 h 为熔覆层高度, a 为待定系数, α 为截面曲线阶数。

通过求(1)式的零点,至少有两个实数根 x_1, x_2 ,如(2)式所示。两零点间的距离为熔覆层宽度 w ,得到系数 a 的值如(3)式所示,回代得到单层熔覆层截面曲线解析式(4)式。

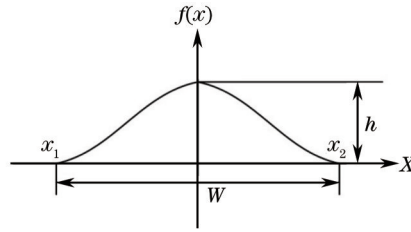


图8 熔覆层截面几何形貌示意图

Fig.8 Section geometry morphology of cladding layer

$$f(x) = 0 \Rightarrow x_{1,2} = \pm \sqrt[\alpha]{\frac{h}{a}}, \quad (2)$$

$$w = 2 \sqrt[\alpha]{\frac{h}{a}} \Rightarrow a = \frac{2^\alpha h}{w^\alpha}, \quad (3)$$

$$f(x) = -\frac{2^\alpha h}{w^\alpha} x^\alpha + h, \quad (4)$$

熔覆层平整必要条件:熔覆层的提升量等于生长量,如图9所示。即需满足条件 $2S_1 = 2S_2$, 因为熔覆层左右对称,即需满足 $S_1 = S_2$ 就可。

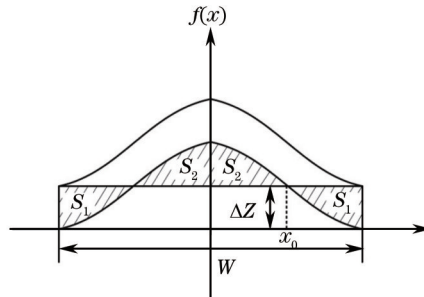


图9 理想熔覆层截面几何形貌堆积示意图

Fig.9 Accumulation section morphology under ideal state

由图9可得

$$S_1 = \left(\frac{w}{2} - x_0\right) \Delta Z - \int_{x_0}^{\frac{w}{2}} f(x) dx, \quad (5)$$

$$S_2 = \int_0^{\frac{w}{2}} f(x) dx - x_0 \Delta Z - \int_0^{x_0} f(x) dx, \quad (6)$$

$$S_1 = S_2 \Rightarrow \int_0^{\frac{w}{2}} f(x) dx = \frac{w}{2} \Delta Z. \quad (7)$$

将(4)式所求得的熔覆层轮廓曲线解析式带入(7)式求解得到提升量表达式如下

$$\Delta Z = \frac{\alpha}{\alpha + 1} h. \quad (8)$$

由(8)式可以看出,当熔覆层高度一定时,单层熔覆提升量只与曲线的阶数 α 有关,阶数越大,熔覆层截面越平整,也说明了 α 表征的是熔覆层轮廓的平整程度。宽高比越大,熔覆层截面也相应越平整,因此, α 与熔覆层的宽高比成正相关。

因此,在激光离焦过程中,熔覆层截面曲线阶数发生变化,熔覆层截面宽高比发生变化。在相同的单道熔覆层高度下,宽高比越大,阶数越大,对应的提升量也应该越大。但是在堆积过程中采用单一提升量时,宽高比越大的位移会距离喷嘴越来越近,而越近粉末末汇聚浓度会增大,进而宽高比大的部位增长速度会明显大于宽高比小的部位,造成熔覆层顶部不平整,严重时会出现宽高比小部位被拉裂的现象,进而导致熔覆层无法成形。

3.2 “阶梯形”单道变斑直接成形

为了解决宽高比不同、熔覆层增长不一致的问题,设计了“阶梯形”变斑单道。在同一提升量下,熔覆层宽高比大的部位生长速度快,宽高比小的部位生长慢,实际成形横截面如图10(a)所示 ($w_2 > w_1; h_2 > h_1$)。通过工艺

参数调整使熔覆层宽高比大的部位生长速度慢,宽高比小的部位生长速度快,设计的熔覆层横截面如图 10(b)所示,即所谓的“阶梯形”变斑单道,进而获得高度生长一致的熔覆层横截面,如图 10(c)所示 ($w_2 > w_1, h_2 = h_1$)。

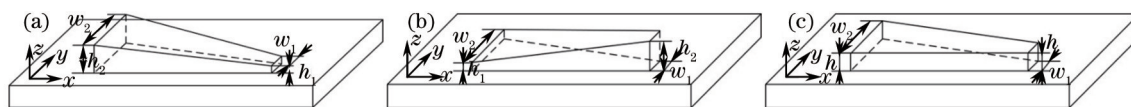


图 10 熔覆层横截面形貌示意图。(a) 实际成形横截面; (b) 设计横截面; (c) 理想横截面

Fig.10 Transverse section geometry morphology of cladding layer. (a) Actual forming transverse section; (b) designed transverse section; (c) ideal transverse section

基于“阶梯形”变斑单道思想,首先找出不同离焦量下的熔覆层横截面曲线函数,对其进行指数函数拟合,找出其阶数。在同一提升量 $\Delta Z = 0.34 \text{ mm}$ 下,依据(8)式找出“阶梯形”单道熔覆层高度,如表 4 所示。

表 4 不同工艺参数下熔覆层尺寸大小

Table 4 Section sizes of cladding layers with different process parameters

Defocus distance /mm	Power /W	Scanning speed /(mm/s)	Layer width /mm	Order	Layer height /mm
0.5	300	10	1.176	2.5	0.474
1	600	15	1.356	2.5	0.470
2	1000	15	1.708	2.5	0.460
2.5	800	15	2.252	5.5	0.400
-3	1000	15	1.532	2.5	0.464
-4	600	10	1.78	3.5	0.436
-5	600	5	2.58	7	0.388

采用表 4 工艺参数,以此变斑“阶梯型”单道进行不等宽薄壁叶片熔覆成形,共堆积层数 $n=150$,总高度 $H=49 \text{ mm}$,成形的薄壁叶片样件如图 11 所示。可看出该成形件顶部表面平整,无开裂,达到了变斑成形薄壁零件预期的效果。根据参考文献[14]可知,在激光变斑过程中,熔覆层显微组织树枝晶大小逐渐变细。主要原因是在熔覆层宽度逐渐变宽的过程中,基体是个无限大的散热面,熔覆层宽度越宽,组织的冷却速度越大,凝固速度就越快,熔池的温度梯度增大,形核率增大,所以晶粒相对变细。

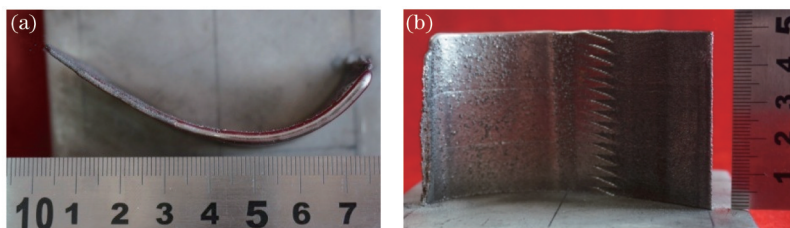


图 11 基于阶梯型单道的薄壁叶片熔覆成型件。(a) 主视图; (b) 俯视图

Fig.11 Formed part of thin-walled blade based on step single layer. (a) Front view; (b) top view

4 结 论

基于“光内送粉”方式,研究了变光斑一次扫描而非多道搭接直接成形出不等宽熔覆层的方法,逐层堆积直接制造薄壁叶片,获得如下结论:

1) 在保证送粉量足够条件下,变光斑过程中通过实时变扫描速度及激光功率,能够直接熔覆出高度相等、宽度逐渐变化的单道熔覆层;

2) 基于高度一致,宽度逐渐变化的熔覆层堆积的变斑薄壁叶片会因为宽高比不同的部位高度增长不一致而导致成形件开裂,具体表现为宽高越大的部位高度生长越快,最终在宽高比小的部位成形件被拉裂的现象;

3) 建立了熔覆层提升量、单层生长高度和熔覆层截面曲线阶数的理论模型,采用一组宽高比越大的部位熔覆层高度越小的熔覆参数,以“阶梯型”单道变斑直接成形的方法,解决了熔覆层高度生长不一致的问题,获得了熔覆层宽度从 1 mm 到 3 mm 连续变化的薄壁叶片。

- 1 Cai Zhiqiang, Song Guofeng, Lin Lifang, *et al.*. Foundation of thickness model of large and gradual-change thin-wall part[J]. Machinery Design & Manufacture, 2008, (5): 49-50.
蔡志刚, 宋国峰, 林立芳, 等. 大型薄壁变壁厚零件模型的建立[J]. 机械设计与制造, 2008, (5): 49-50.
- 2 Li Dichen, Wu Haihua, Lu Bingheng. Shaping method of hollow turbine blades with intergral shell and core ceramic mold[J]. Aircraft technology, 2009, (3): 38-42.
李涤尘, 吴海华, 卢秉恒. 型芯型壳一体化空心涡轮叶片制造方法[J]. 航空制造技术, 2009, (3): 38-42.
- 3 Wang Huaming. Open defense manufacturing high performance metal components to add material manufacturing technology a new chapter [J]. Defense Manufacturing Technology, 2013, 6(3): 5-7.
王华明. 高性能金属构件增材制造技术开启国防制造新篇章[J]. 国防制造技术, 2013, 6(3): 5-7.
- 4 Gu D D, Meiners W, Wissenbach K, *et al.*. Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms [J]. International Materials Reviews, 2012, 57(3): 133-164.
- 5 Dutta B, Singh V, Natu H, *et al.*. Direct metal deposition[J]. Advanced Materials & Processes, 2009, 167(3): 29-31.
- 6 Pi G, Zhang A F, Zhu G X, *et al.*. Research on the forming process of three-dimensional metal parts fabricated by laser direct metal forming [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 57(9): 841-847.
- 7 Huang Weidong, Lin Xin, Chen Jing, *et al.*. Laser Additive Manufacturing[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007: 1-12.
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: 1-12.
- 8 Cao J, Liu F C, Lin X, *et al.*. Effect of overlap rate on recrystallization behaviors of laser solid formed Inconel 718 superalloy[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45(2): 228-235.
- 9 He B, Li D C, Zhang A F, *et al.*. Influence of scanning pattern on the edge collapse of solid parts in laser metal direct forming[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 48(6): 171-177.
- 10 Wang Lifang, Zhu Gangxian, Shi Shihong, *et al.*. Protect the feeding nozzle air pressure inside the light powder flow field impact study [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(s1): s103007.
王丽芳, 朱刚贤, 石世宏, 等. 保护气压力对光内送粉喷嘴粉末流场的影响研究[J]. 中国激光, 2013, 40(s1): s103007.
- 11 Shi Gaolian, Shi Shihong, Wu Shaohua, *et al.*. Research on effective utilization rate of power in inside. laser coaxial powder feeding laser cladding and rapid prototyping process[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(7): 152-161.
石皋莲, 石世宏, 吴少华, 等. 光内送粉激光熔覆快速成形粉末利用率实验研究[J]. 热加工工艺, 2010, 39(7): 152-161.
- 12 Shi Shihong, Fu Geyan, Wang Anjun, *et al.*. Laser Processing Forming Manufacturing Light in Powder Feeding Nozzle Technology and Light Inside: China, CN200610116413.1 [P]. 2006-10-11.
石世宏, 傅戈雁, 王安军, 等. 激光加工成形制造光内送粉工艺与光内送粉喷头: 中国, CN200610116413.1 [P]. 2006-10-11.
- 13 Zhu Gangxian, Zhang Anfeng, Li Dichen, *et al.*. Model of layer thickness of thin-walled parts in laser metal direct manufacturing[J]. Journal of Welding, 2010, 31(8): 57-60.
朱刚贤, 张安峰, 李涤尘, 等. 激光金属制造薄壁零件z轴单层行程模型[J]. 焊接学报, 2010, 31(8): 57-60.
- 14 Zhu Gangxian, Shi Shihong, Fu Geyan, *et al.*. Realization and research of unequal-width cladding layers by using variable laser spot with the inside-laser powder feeding[J]. Applied Laser, 2015, 32(1): 25-28.
朱刚贤, 石世宏, 傅戈雁, 等. 激光变斑熔覆不等宽熔道的工艺实现及实验研究[J]. 应用激光, 2015, 32(1): 25-28.

栏目编辑: 张浩佳