

## 选区顺序对激光直接制造 TC4 残余应力及变形的影响

严 惠<sup>1</sup>, 王 霄<sup>1</sup>, 梁绘昕<sup>1</sup>, 田宗军<sup>1</sup>, 谢德巧<sup>1</sup>, 徐国建<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016;  
2. 南京中科煜宸激光技术有限公司, 江苏 南京 210038)

**摘 要:** 为降低激光直接制造大型 TC4 构件的基底变形及残余应力, 研究了不同选区顺序对分区扫描成形时基底变形及残余应力的影响。分别采用新定义的由外而内、由内而外选区顺序及常规的随机选区顺序进行沉积实验, 并运用面结构光及 X 射线衍射检测方法对基底变形及沉积层残余应力进行测量。结果表明: 不同选区顺序对成形件基底变形及残余应力影响显著, 采用由外而内选区顺序可大幅减小基底变形, 与随机选区顺序相比, 基底最大变形量降低 60%, 但是在沉积层引入了较大的残余应力, 最大残余应力达到了 392 MPa; 随机选区顺序下沉积层残余应力量级较小, 最大残余应力仅约 93 MPa, 残余应力分布更为均匀。因此, 分别采用由外而内及随机选区顺序进行前后期成形有利于减小和平衡大尺寸 TC4 成形件基底变形及残余应力。

**关键词:** 激光直接制造; 分区扫描策略; 选区顺序; 变形; 残余应力

**中图分类号:** TG174.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0242002

## Influence of scanning order on residual stress and deformation in laser direct manufacturing of TC4

Yan Hui<sup>1</sup>, Wang Xiao<sup>1</sup>, Liang Huixin<sup>1</sup>, Tian Zongjun<sup>1</sup>, Xie Deqiao<sup>1</sup>, Xu Guojian<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;  
2. Nanjing Zhongke Raycham Laser Technology Co., Ltd, Nanjing 210038, China)

**Abstract:** In order to reduce the substrate deformation and residual stress during laser direct manufacturing of TC4 components, the influence of different scanning orders on the deformation and residual stress of the parts formed by subarea scanning strategy were studied. The newly-defined outside-in and inside-out scanning orders, and a randomized scanning order were applied and compared. The deformation was measured by the surface structure light measurement system and the residual stress was measured by the X-ray diffraction method. The results show that different scanning orders have significant effects on the deformation and residual stress. The maximum substrate deformation is reduced by 60% by the outside-in scanning order compared with that by the randomized scanning order, while larger residual stress is introduced, which is even up to 392 MPa. Oppositely, the randomized scanning

收稿日期: 2018-09-11; 修订日期: 2018-10-13

基金项目: 江苏省科技支撑计划重点项目(BE2014009-1); 江苏省重点研发计划(BE2016010-3); 江苏省重点研发项目(BE2015161); 国家自然科学基金(51475238); 国家重点研发计划(2016YB1100500)

作者简介: 严惠(1993-), 男, 硕士生, 主要从事激光增材制造方面的研究。Email: yanhui\_yyh@163.com

导师简介: 田宗军(1971-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事特种加工技术、增材制造(3D 打印技术)方面的研究。  
Email: Tianzj@nuaa.edu.cn

order makes a more uniform residual stress distribution and the maximum residual stress is only 93 MPa. Therefore, it is beneficial to balance the substrate deformation and residual stress of large TC4 forming parts by applying the outside-in and randomized scanning orders in the front and back forming period respectively.

**Key words:** laser melting deposition; subarea scanning; scanning order; deformation; residual stress

## 0 引言

激光直接制造 (Laser Direct Manufacturing, LDM)作为一种典型的金属增材制造技术,凭借其加工柔性好、成形效率高、制件性能优的优势,成为直接成形钛合金三维复杂零件的重要手段<sup>[1-3]</sup>。然而,未能有效解决沉积过程中热应力控制问题一直阻碍该技术的发展<sup>[4]</sup>。激光直接制造过程中零件经历高能量激光的周期性、非稳态集中循环加热,局部将形成极大的温度梯度,致使成形过程中产生复杂的应力应变演化,成形结束后,在零件内部产生较大的残余应力,并伴随严重翘曲变形,甚至开裂,从而对零件的尺寸精度和力学性能产生较大危害<sup>[5]</sup>。

现有研究表明,激光扫描策略对于成形过程中的温度分布具有重要影响,对其进行合理优化有利于减小基底变形及残余应力<sup>[6-9]</sup>。但不可否认的是,以往研究主要针对小型零件,很难对大型件成形提供指导。分区扫描作为一种大型件成形策略,可在一定程度上改善大型件成形过程中的热应力作用<sup>[10]</sup>。然而,由于相关研究的缺乏以及选区顺序指定的复杂性,分区扫描对基底变形及残余应力的作用规律尚不十分明确,在实际工程应用中研究者们很难确定合适的选区顺序以减轻成形过程中强烈的热作用,从而无法保证大尺寸零件成功成形。因此,文中研究了不同选区顺序对成形件基底变形及残余应力的影响,提出了一种由外而内选区顺序以改善成形过程中的基底变形,并采用组合式分区扫描策略以平衡大尺寸成形件基底变形及残余应力,最终成功成形了尺寸为 500 mm×440 mm×120 mm 的大型 TC4 构件。

## 1 实验

### 1.1 设备及材料

实验使用煜宸 LDM-8060 激光直接制造成形设备,该设备主要配备 4 kW 半导体激光器、四路送粉

头、三轴数控工作台、气载式送粉器和惰性气体密封室。实验在氩气保护下进行,保证密封室内水氧含量低于 50 ppm,以防钛合金打印过程中发生氧化。

实验粉末材料采用旋转电极法制得的 TC4 钛合金球形粉末,粒度为 45~105 μm,化学成分如表 1 所示,试验前将粉末真空干燥 2 h 以去除粉末内水分,基底同样为 TC4 钛合金材料。

表 1 TC4 粉末成分表

Tab.1 Composition of TC4 powders

Element	Wt
Aluminum	5.5%~6.75%
Vanadium	3.5%~4.5%
Iron	<0.25%
Carbon	<0.08%
Oxygen	0.12%~0.16%
Nitrogen	<0.01%
Hydrogen	<0.01%
Titanium	Balance

### 1.2 选区顺序指定及成形实验

文中的研究基于大型件成形所采用的分区扫描策略,该扫描策略如图 1 所示,通过分层切片软件按照一定层厚将零件三维模型分成若干个沉积层,然后将各个沉积层分成若干个区域,并指定其扫描顺序,成形过程中加工头按照该顺序扫描成形各区域,最终各区域连接以完成整个沉积层的成形。文中为

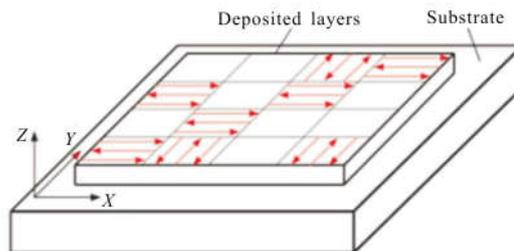


图 1 分区扫描策略示意图

Fig.1 Schematic of subarea scanning strategy

减小分区尺寸的影响和保证区域搭接良好, 沉积层内所有分区尺寸保持一致且单个区域长宽相同, 相邻区域内扫描线相互垂直。

采用随机、由外而内及由内而外三种选区顺序完成成形实验, 该实验所采用的基底尺寸为 205 mm×145 mm×5 mm, 基底不作约束以更好反映变形, 在基底上连续沉积 4 层 (以往的研究证明基底最大变形主要产生于前 2~3 层沉积过程<sup>[11-13]</sup>), 沉积层尺寸为 120 mm×120 mm, 分区尺寸为 20 mm×20 mm, 即单个沉积层被均分为 36 个岛式区域。随机选区顺序由软件定义, 该顺序以避免相邻区域的连续扫描为前提, 可在一定程度上平衡扫描面的整体温度分布。现阶段, 零件成形均采用该随机选区顺序。实验中软件定义的随机选区顺序如图 2(a)所示, 区域内数字即为该区域的扫描次序。

29	17	28	25	20	14
21	1	26	6	16	32
7	13	4	18	2	10
11	31	15	33	5	24
9	22	8	12	35	30
23	3	27	36	19	34

36	32	28	24	20	35
17	14	10	6	13	31
21	7	4	2	9	27
25	11	1	3	5	23
29	15	8	12	16	19
33	18	22	26	30	34

(a) 随机顺序

(b) 由内而外

(a) Randomized order

(b) Inside-outside order

1	5	9	13	17	2
20	23	27	31	24	6
16	30	33	35	28	10
12	26	36	34	32	14
8	22	29	25	21	18
4	19	15	11	7	3

(c) 由外而内

(c) Outside-inside order

图 2 三种选区顺序图

Fig.2 Schematic of subarea scanning orders

由外而内选区顺序由笔者提出, 如图 2(c)所示, 具体指定方式如下:

(1) 首先根据分区尺寸将沉积层均匀划分为  $n^2$  个小区域和若干个方形扫描区, 所有小区域按所处的扫描区位置进行批次扫描, 最外围扫描区内小区域最先扫描;

域最先扫描;

(2) 在每个扫描区内, 小区域按照顺时针跳转顺序被指定, 首先是最外围扫描区四个拐角处的小区域, 其次是与之相邻的顺时针方向四个小区域, 这样循环下去, 直到该扫描区内的所有小区域全部被扫描, 然后延续到下一个扫描区, 值得注意的是, 相邻扫描区的起始区域不在同一角落, 而是切换至对角以避免相邻区域的连续扫描。

由内而外选区顺序与由外而内选区顺序完全相反, 如图 2(b)所示。实验所采用的工艺参数为激光功率 2 500 W, 扫描速度 800 mm/min, 光斑直径 5 mm, 粉盘转速 7 g/min, 熔道搭接率 50%, 区域搭接率 70%。为降低结果偶然性, 采用每种选区顺序成形两组样本用于结果对比。

### 1.3 变形及残余应力检测

沉积完成后基底变形通过面结构光三维测量设备进行测量, 然后通过 Geomagic Studio 软件重建其模型, 从而对基底的变形程度作相应评价。具体考核方法为: 成形前在平整基底底部标注若干个关键点, 沉积完对关键点相对高度进行测算, 从而给出基底最大变形量和变形曲面。因成形后基底在平面方向收缩程度较小, 因此忽略基底变形后关键点在 X 和 Y 方向的位置偏移量。

沉积层残余应力采用 LXRD 大功率残余应力测量系统进行测量, 靶材选用铜靶, 采用  $\sin 2\psi$  测量方法。由于表面平整度及黏附粉末对最终残余应力测量有较大影响, 测试前采用电解腐蚀的方法将沉积层表面腐蚀 0.1 mm 的厚度。沉积层残余应力测量点位置如图 3 所示, 沿成形件表面对角线均匀分布, 为对角线上各区域的中心点。以往的研究证明, 沉积层两个方向的残余应力  $\sigma_{xx}$  和  $\sigma_{yy}$  拥有相似分布规律<sup>[14]</sup>, 因此, 此处只测量沉积层表面沿扫描方向的残余应力  $\sigma_{xx}$ 。

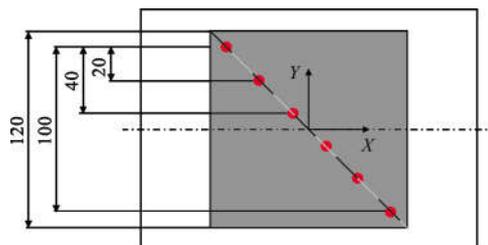


图 3 残余应力测点分布示意图

Fig.3 Schematic of residual stress measuring points distribution

## 2 结果

### 2.1 基底变形

采用不同选区顺序进行分区扫描成形后基底变形程度如图 4 及图 5 所示。可以发现,不同选区顺序对成形件基底变形影响较大,随机选区顺序下基底

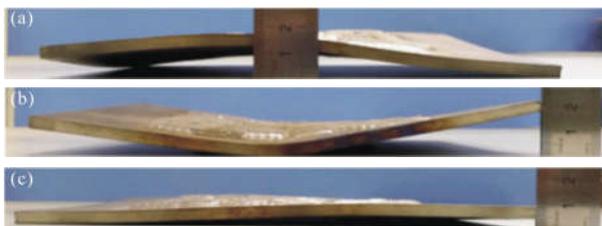


图 4 基底变形实物图

Fig.4 Exhibitions of substrate deformation

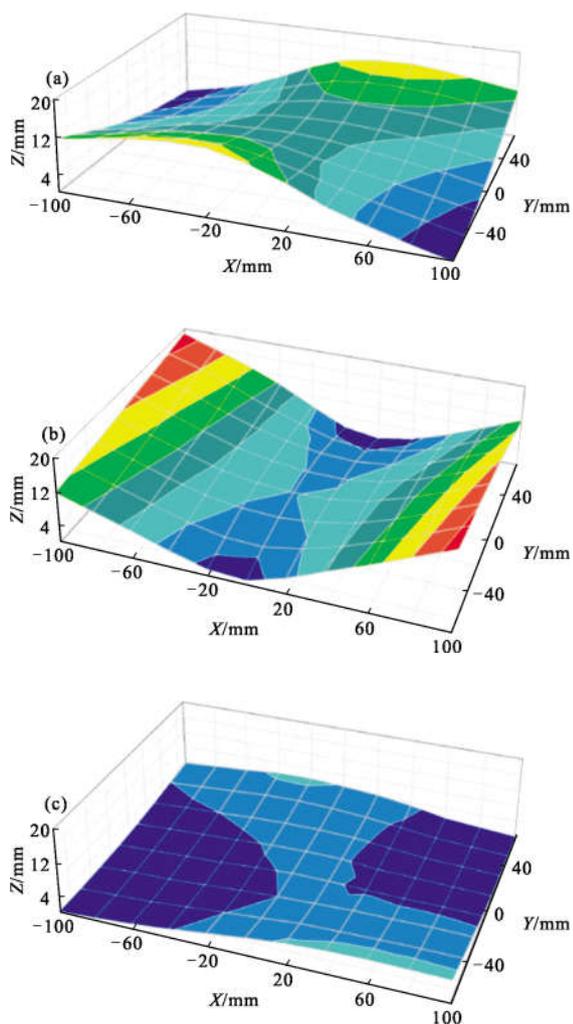


图 5 基底变形模型图

Fig.5 Models of substrate deformation

变形极不规则,呈现扭曲变形状态,由内而外选区顺序下基底呈现翘曲变形状态,这两种选区顺序均产生了较大的基底变形。然而,由外而内选区顺序下基底较为平整,变形量较小。

基底最大变形量对比如图 6 所示,每种选区顺序下的两个样本数据差异较小,结果吻合度较高。三种选区顺序下,由内而外选区顺序产生了最大的基底翘曲变形,Z 方向最大变形量达到了 18.92 mm;随机选区顺序下基底 Z 方向最大变形量也达到了 14.85 mm;而由外而内选区顺序下基底 Z 方向最大变形量仅约 5.8 mm,与常规的随机选区顺序相比,最大变形量减小 60%,说明采用由外而内选区顺序可以明显改善基底变形。

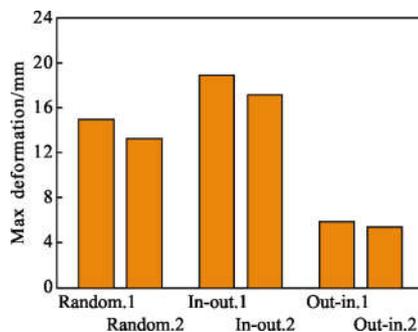


图 6 三种选区顺序下基底最大变形量对比图

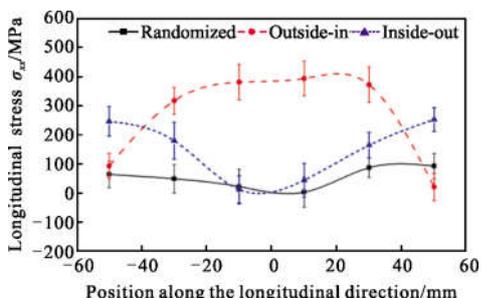
Fig.6 Comparison of maximum substrate deformation by different subarea scanning orders

### 2.2 沉积层残余应力

不同选区顺序下沉积层表面残余应力分布规律及所有样本下沉积层最大残余应力对比如图 7 所示。可以发现,沉积层表面均为拉伸残余应力,且不同选区顺序下沉积层残余应力差异较大。当采用由外而内和由内而外选区顺序时,沉积层表面整体残余应力量级较大,最大残余应力值分别达到了 392 MPa 和 252 MPa,而随机选区顺序下沉积层残余应力量级较小、分布更为均匀,最大残余应力仅约 93 MPa,明显低于另外两种选区顺序。此外,当采用由外而内选区顺序时,沉积层残余应力表现出由边缘往中心逐渐增大的趋势,而采用由内而外选区顺序时,沉积层残余应力则由边缘往中心逐渐减小,这种递增及递减的趋势与随机选区顺序下残余应力分布规律有较大差异。

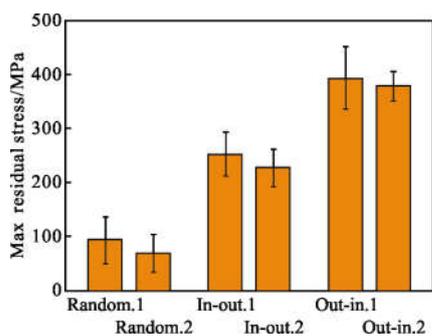
以上结果表明,由外而内选区顺序虽然可以大

幅减小基底变形,但缺点是其在沉积层产生了较大的残余应力,最大残余应力值约为随机选区顺序的 4 倍。因此,若采用该选区顺序完成大型件整体成形,将在成形件内部引入极大的残余应力,从而对成形件性能产生极大影响,甚至有可能导致沉积层开裂。



(a) 残余应力分布

(a) Residual stress distribution



(b) 最大残余应力对比

(b) Comparison of maximum residual stress

图 7 不同选区顺序下沉积层残余应力

Fig.7 Residual stress on the deposited layers by different subarea scanning orders

### 3 分析与讨论

#### 3.1 基底变形及控制机理

现阶段,温度梯度机理被用以解释激光成形过程中基底的翘曲变形现象<sup>[8,14]</sup>。其具体为:激光作用下,基底上表面被辐照区温度瞬间升高,该区域及其附近材料迅速膨胀,屈服极限大大降低,在周围冷态金属的限制下产生压缩塑性变形。在随后的冷却过程中,之前的被辐照区材料开始收缩,同时,基底下表面由于传热效应温度仍继续升高,膨胀量持续增加,屈服应力不断下降,最终使基底产生面向激光源的翘曲变形。

而对于分区扫描成形过程,最终的基底变形量

是所有区域沉积时所产生的变形量的累积。一方面,位于基底不同位置的沉积区域经历着完全不同的热历史,从而在基底及沉积层产生不同的热应力作用;另一方面,位于基底不同位置区域的材料在沉积过程中受到不同程度的周围冷态金属的约束,这都使得在每一个区域沉积过程中基底的变形情况均不一致。随机选区顺序下,在基底不同位置区域沉积过程中,基底的变形不规则程度不断加大,表现为极不规则的扭曲变形状态。区别于随机选区顺序,由外而内及由内而外选区顺序下沉积层及基底整体温度分布因区域扫描的规律性体现出一定的对称性,相同扫描区内的区域沉积过程中经历的热历史几乎相同,同时受到相似的来自周围材料的约束作用,因此,基底最终的变形较为规则。

为进一步理解由外而内选区顺序改善基底变形的原因,采用 ANSYS 有限元仿真的手段模拟了由外而内及由内而外两种相反选区顺序下单层沉积过程温度分布及演化。沉积过程瞬态温度场通过解三维傅里叶导热微分方程建立,控制方程为:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \rho c_p \nabla \cdot (UT) - \nabla \cdot (K \nabla T) = Q \quad (1)$$

式中: $\rho$ 、 $c_p$ 、 $K$  分别为材料密度、比热容和热传导系数; $U$  为热源移动速度; $T$  为瞬态温度; $t$  为时间; $Q$  为热源强度。沉积过程考虑热传导及热辐射作用,作用方程如下:

$$-K \frac{\partial T}{\partial n} = -h(T - T_0) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (2)$$

式中: $h$  为对流换热系数; $T_0$  为环境温度; $\varepsilon$  为辐射率; $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数。

此外,所建模型尺寸及参数设置与实验相一致;采用“生死单元”法以模拟激光直接制造的添加制造过程;运用高斯分布热源以描述激光作用点能量分布规律;TC4 材料的物理特性参数参照参考文献[15];采用映射网格对有限元模型进行网格划分,基底及沉积层均采用 SOLID70 八节点六面体单元;环境温度为 20 ℃。

仿真结果如图 8 所示,由内而外选区顺序下基底中心位置由于激光的快速作用,节点经历骤冷骤热过程,温度突升到最高点后迅速下降,在持续的热传导下最终趋于稳定;而由外而内选区顺序下,中心节点在激光作用前已具有一定的基础温度,骤冷骤

热得到较大改善。

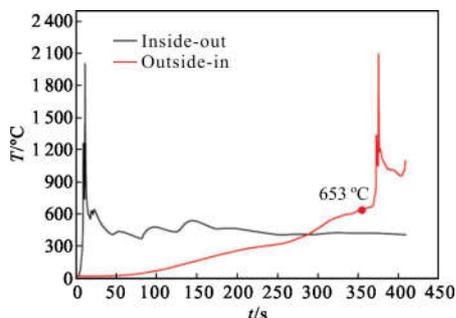


图 8 基底上表面中心节点热历史曲线图

Fig.8 Thermal history curves diagram of the central node on the substrate

图 9 为由外而内选区顺序下基底整体温度分布云图。227.5 s 时,第一扫描区沉积完成,基底中心位置最低温度为 295 °C;364.0 s 时,第二扫描区沉积完成,此时基底中心最低温度高达 653 °C。可见,随着沉积过程的不断继续,扫描区内各区域的基础温度不断升高,基底中心区域的预热作用明显,因此沉积内部区域时,激光作用下温度梯度将大幅降低,从而

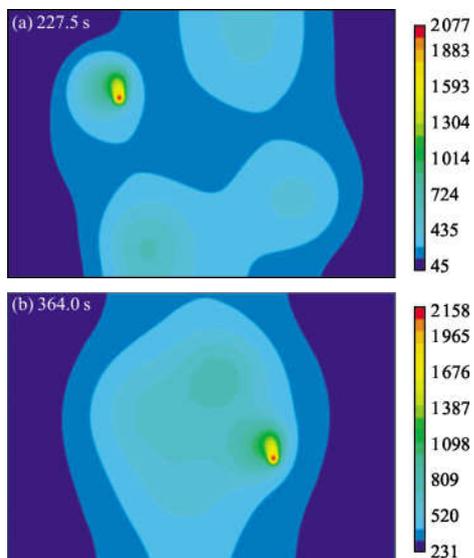


图 9 由外而内选区顺序下基底表面温度分布云图

Fig.9 Temperature distribution of the substrate by the outside-in subarea scanning orders

使得基底翘曲变形得到有效控制。而对于由内而外选区顺序,其过程正好相反,首层沉积时激光首先作用在基底中心区域冷态材料上,瞬时产生极大的温度梯度,而沉积下一层时,沉积层中心区域由于长时间冷却,激光再次作用时也将产生较大的温度梯

度,最终产生较大的基底翘曲变形,这也从侧面反映了合理安排选区顺序以预热基底中心位置对基底变形的重要作用。随着沉积层的不断增加,最终基底温度不断趋于平衡,因温度梯度导致的基底变形将得到很大改善。

### 3.2 分区扫描过程沉积层残余应力分布规律

激光直接制造过程残余应力主要来源于沉积层及热影响区材料在热周期内的不均匀变形。由于激光辐照区材料在加热过程中产生了压缩塑性变形,在随后的冷却过程中,该区域及其热影响区材料收缩幅度增大,在周围材料的限制下,该区域最终产生拉伸残余应力,与之相对应的是,在该区域一定距离处将引入一定的压缩残余应力。

对于分区扫描成形过程,沉积层整体残余应力分布将由单个区域沉积过程及其相互作用所决定。在随机选区顺序下,较先沉积的区域由于缺少周围区域的约束,可以自由膨胀和收缩,导致其残余应力值较小,而后续沉积的区域冷却收缩过程中将在已沉积区域内部叠加一个额外的压应力作用,从而使得原先的拉伸残余应力进一步减小,所以,随机选区顺序下沉积层残余应力量级较低,最大残余应力值仅为 93 MPa。

然而,当采用由外而内选区顺序时,沉积层外围区域优先沉积,由于外围已沉积区域的约束,内部区域沉积时将产生较大的残余应力。同时,内部区域在冷却过程中将对外围已沉积区域施加一个额外压应力作用,从而降低了外围区域的残余拉应力,使得由外而内选区顺序下沉积层表面残余应力呈现出由边缘往中心逐步增大的规律。相反地,采用由内而外区域跳转扫描顺序时,其内部区域属于优先沉积区,所以其内部将产生较小的残余应力,整体残余应力将显现出由边缘往中心逐步减小的规律。但总体来说,两种选区顺序均导致沉积过程中材料膨胀所受约束的增加,从而导致冷却后沉积层应力的局部集中和量级增加,因此不适用于零件的整体成形。

### 3.3 大型件成形应力及变形平衡方法

以上结果证明,采用由外而内选区顺序可大幅减小基底变形,而随机选区顺序下沉积层残余应力量级较小。所以,将这两种选区顺序组合使用可减小成形件残余应力及基底翘曲变形。具体方法为:由于基底的变形主要由前 2~3 层沉积过程产生,所以在

成形前几层时采用由外而内选区顺序以减小基底变形；后续沉积过程采用随机选区顺序以减小沉积层的残余应力。

笔者采用该组合分区策略成功成形了尺寸为 500 mm×440 mm×120 mm 的大型钛合金吊框结构件,如图 10 所示,相比于未优化前的工艺过程具有突破性意义。该结构件底部为全尺寸实体,单层成形面积较大,在未采用该组合分区策略时,成形初期的顺序由软件随机指定,前两层沉积时基底就因强变形作用使得夹具崩坏,导致成形失败。而在采用组合分区扫描策略后,成形过程中的基底翘曲变形现象得到明显改善。

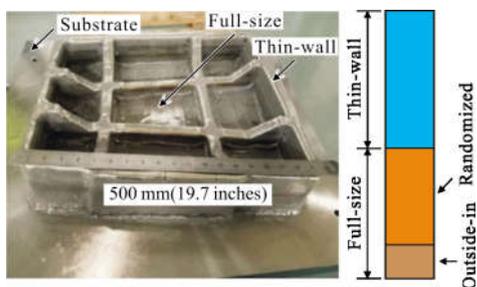


图 10 组合式分区策略成形大型 TC4 结构件实物图

Fig.10 Large TC4 structure by the combined subarea scanning strategy

需要提及的是,该组合分区策略下,虽然在成形前期因使用了由外而内选区顺序将在沉积层引入更大的残余应力,但成形结束后成形件将从基板割离,前几层也将从成形件上去除,并不会对最终的成形件性能产生影响。

## 4 结论

文中通过面结构光及 X 射线衍射检测方法研究了不同选区顺序对激光直接制造分区扫描成形 TC4 基底变形及残余应力的影响,并结合温度场模型对原因进行了分析。主要结论如下:

(1) 不同的选区顺序对成形件基底变形影响显著,通过优化选区顺序以提高基底中心位置预热温度可减小基底变形;

(2) 提出了一种由外而内选区顺序,将常规使用的随机选区顺序所产生的基底最大变形量降低 60%,但缺点是在沉积层引入了较大的残余应力,最大残余应力达到了 392 MPa;

(3) 随机选区顺序下基底变形量较大,但沉积层残余应力量级较小,最大残余应力仅约 93 MPa,残余应力分布更为均匀;

(4) 采用组合式分区策略,分别采用由外而内及随机选区顺序进行前后期成形有利于减小和平衡大尺寸 TC4 成形件基底变形及残余应力。

## 参考文献:

[1] Yang Guang, Wang Xiangming, Wang Wei, et al. Microstructure and property of laser cladding TiC reinforced composition coating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 795-799. (in Chinese)  
杨光, 王向明, 王维, 等. 激光熔覆制备 TiC 颗粒增强涂层的组织和性能[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 795-799.

[2] Zhou Bin, Shi Shihong, Deng Zhiqiang, et al. Laser cladding forming of fan-shaped part based on hollow laser beam inside powder feeding technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0906007. (in Chinese)  
周斌, 石世宏, 邓志强, 等. 基于中空激光光内送粉技术的扇形结构件激光成形研究 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(9): 0906007.

[3] Zhong Chongliang, Fu Jinbao, Ding Yalin, et al. Porosity control of Inconel 718 in high deposition-rate laser metal deposition [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(11): 3005-3011. (in Chinese)  
仲崇亮, 付金宝, 丁亚林, 等. 高沉积率激光金属沉积 Inconel 718 的孔隙率控制 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(11): 3005-3011.

[4] Wang Huaming. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(10): 2690-2698. (in Chinese)  
王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造: 若干材料基础问题[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2690-2698.

[5] Qiu C, Ravi G A, Dance C, et al. Fabrication of large Ti-6Al-4V structures by direct laser deposition [J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2015, 629: 351-361.

[6] Yang Guang, Ding Linlin, Wang Xiangming, et al. Influence of scanning path on residual stress and distortion of laser repairing titanium alloy[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 2926-2932. (in Chinese)  
杨光, 丁林林, 王向明, 等. 扫描路径对激光修复钛合金残余应力与变形的影响 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 2926-2932.

- [7] Long R S, Sun S N, Lian Z S. The influence of scanning methods on the cracking failure of thin-wall metal parts fabricated by laser direct deposition shaping [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2016, 59: 269–278.
- [8] Gao M, Wang Z, Li X, et al. The effect of deposition patterns on the deformation of substrates during direct laser fabrication [J]. *Journal of Engineering Materials & Technology*, 2013, 135(135): 034502.
- [9] Yu J, Lin X, Ma L, et al. Influence of laser deposition patterns on part distortion, interior quality and mechanical properties by laser solid forming(LSF)[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2011, 528(3): 1094–1104.
- [10] Yang Guang, Zhou Jiaping, Qin Lanyun, et al. Influence of separate area scanning on coupled thermo-mechanical field of laser repairing of titanium alloy [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017(5): 63–68. (in Chinese)  
杨光, 周佳平, 钦兰云, 等. 分区扫描对激光沉积修复钛合金热力耦合场的影响[J]. *焊接学报*, 2017(5): 63–68.
- [11] Cao J, Gharghoury M A, Nash P. Finite-element analysis and experimental validation of thermal residual stress and distortion in electron beam additive manufactured Ti–6Al–4V build plates [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 237: 409–419.
- [12] Denlinger E R, Pan M. Effect of stress relaxation on distortion in additive manufacturing process modeling [J]. *Additive Manufacturing*, 2016, 12: 51–59.
- [13] Denlinger E R, Heigel J C, Pan M, et al. Effect of inter-layer dwell time on distortion and residual stress in additive manufacturing of titanium and nickel alloys [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 215: 123–131.
- [14] Kruth J P, Deckers J, Yasa E, et al. Assessing and comparing influencing factors of residual stresses in selective laser melting using a novel analysis method [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, 2012, 226(6): 980–991.
- [15] Vastola G, Zhang G, Pei Q X, et al. Controlling of residual stress in additive manufacturing of Ti6Al4V by finite element modeling[J]. *Additive Manufacturing*, 2016, 12: 231–239.