

基于特征区域的激光增材分区扫描热力耦合研究

杨光¹, 李雨航¹, 周思雨¹, 王霞¹, 钦兰云^{1*}, 王向明²

¹沈阳航空航天大学机电工程学院, 辽宁 沈阳 110136;

²沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035

摘要 为解决激光增材制造中由于温度分布不均匀而导致的成形件的变形、开裂等问题, 本文提出了一种基于特征区域的分区扫描策略。利用 ANSYS 模拟了 L 型与 T 字型这两种特征区域的沉积制造过程, 分析了不同扫描起点位置对特征区域温度场分布和基材节点热循环的影响, 得到了这两种特征区域的最佳扫描起点位置。在此基础上, 模拟了三种基于特征区域的跳转扫描顺序沉积成形件的过程, 得到了不同跳转扫描顺序下成形件的温度与应力分布, 并通过热电偶测温与基材翘曲变形实验对模拟结果进行验证, 实验结果与模拟结果相吻合。研究结果表明, 基于特征区域的最大跨距跳转扫描策略可使沉积制造过程中基材的温度分布更均匀, 成形件应力与变形量更小, 有利于提高成形件的尺寸精度。

关键词 激光技术; 激光增材制造; 特征区域; 分区扫描; 数值模拟

中图分类号 TH142.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1002115

1 引言

大型整体钛合金结构件的用量已经成为衡量飞机等国防装备技术先进性的标志之一^[1]。激光增材制造技术以其独特的优势, 逐渐成为大型整体钛合金构件加工的主要技术之一, 但该技术在加工过程中存在严重的热累积现象, 易导致成形件的尺寸精度较低。除此以外, 热量分布不均匀会使成形件中存在较大的热应力, 易导致成形件变形开裂, 这也是制约该技术发展的因素之一^[2-3]。

在激光增材制造过程剧烈的循环加热、冷却条件下, 零件内会产生分布及演化极其复杂的应力, 甚至会在局部产生应力集中, 当局部应力超过材料的允许应力时, 成形件就会发生开裂。为了改善这一现象, 国内外均进行了大量的研究, 如: Colegrove 等^[4]在激光增材制造工艺中引入了表面硬化工艺, 如滚压工艺, 以压应力替代拉应力, 重新平衡构件的受力状态, 达到了减小变形的目的; 北京航空航天大学的刘勇等^[5]提出了“热应力离散控制”方法, 制造出了单件质量为 50~200 kg 的多种大型整体钛合

金飞机关键结构件(试验件)。但这些研究都未能解决大型结构件的开裂问题。

在激光增材制造过程中, 成形件要经历高能激光束的周期性循环加热, 局部会形成很大的温度梯度^[6-7], 从而使得工件内部在成形过程中产生复杂的应力应变变化, 进而使得成形结束后工件内部存在较大的残余应力, 而且基底会发生严重的翘曲变形^[8-9]。扫描方式对成形过程中的温度分布有较大影响, 因此选择合适的扫描方式有助于减小成形件的变形及开裂。Paydas 等^[10]的研究表明, 不同的扫描方式通过影响熔池材料的冷却速率, 对最终成形件的微观组织和性能产生显著影响。Liu 等^[11]发现, 与常规单方向扫描方式相比, 正交往复扫描方式可以细化成形件内部晶粒, 提高成形件的拉伸性能。龙日升等^[12]利用有限元分析软件模拟了在 45 钢上激光成形 Ni60A 样块的过程, 并分别对长边往复扫描、短边往复扫描以及层间正交变向平行往复扫描这三种扫描方式进行了研究。闫五柱等^[13]对钛合金块沉积制造过程中沉积路径的影响进行了热-力解耦分析, 研究了由内向外旋转扫描、由外向内旋转

收稿日期: 2020-10-18; 修回日期: 2020-11-11; 录用日期: 2020-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(51975387)、国家重点研发计划(2017YFB1104002)

*E-mail: qinly@sau.edu.cn

扫描、“之”字形扫描、逐行扫描、隔行扫描、希尔伯特扫描等扫描方式下的温度场和应力场。杨光等^[14-15]发现,分区扫描不仅可以有效降低基材的温度,使温度梯度的分布更均匀,还可以在一定程度上降低残余应力。卞宏友等^[16]提出了一种分区环形扫描路径生成算法,利用该算法可以避免扫描线过长引起的翘曲变形。周显新等^[17]发现,变扫描方向沉积变厚度斜坡薄壁件的微观组织、硬度和拉伸性能与等厚度斜坡薄壁件的明显不同。裴明源等^[18]发现:扭转角的大小与熔覆扫描路径有关;螺旋式扫描方式下的最大弯曲变形最大,然后依次为螺旋式扫描、往复式扫描、单向式扫描;单向式扫描可以将最大变形程度减小 56%,且熔覆层的质量较好。以上研究表明,分区扫描是实现激光增材制造大型构件应力离散以及减小应力峰值、工件变形的有效手段,但这些扫描方式未考虑成形件的构型特征,且不规则的分区搭接易引入气孔和熔合不良等缺陷。

综上所述,采用分区扫描的方式可以有效控制增材制造大型构件中的内应力,但大型框类结构件的层面构型相对比较复杂,且目前层内的区域轨迹规划、跳转顺序策略还缺少相关规范。因此,本文根据大型框类结构件的层面结构特征将其分为 T 型与 L 型两种特征区域,在理论分析、数值模拟和实验的基础上,研究了特征区域的扫描起点位置和跳转顺序对扫描过程中热行为和应力演化的影响,并实现了热应力离散控制,达到了减小构件宏观变形、开裂的目的,为提高大型成形件的质量提供了理论依据和方法指导。

2 特征区域的温度场模拟

2.1 特征区域有限元模型的建立

进行温度场模拟时,基材与沉积粉末均采用 TA15 钛合金,该合金的部分热物性参数如表 1 所示。

表 1 TA15 钛合金的部分热物性参数

Table 1 Partial thermophysical parameters of TA15 titanium alloy

Temperature $T / ^\circ\text{C}$	Density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Thermal conductivity $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	Specific heat capacity $C / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	Coefficient of thermal expansion $\alpha / (10^{-5} ^\circ\text{C}^{-1})$
20	4450	8	520	0.9
200	4450	10.2	587	0.9
400	4450	12.2	670	0.9
600	4450	15.1	755	0.94
1540	4450	25	1162	0.97
1650	4450	22	1200	0.97
2000	4450	20.5	1200	0.97

利用 ANSYS 有限元分析软件对特征区域的激光沉积过程进行模拟分析,在保证模拟结果精度的前提下,为了节约计算时间,作出如下假设:

- 1) 基材与沉积所用金属粉末均为各向同性材料;
- 2) 沉积环境以及工件初始温度均为 $20\text{ }^\circ\text{C}$;
- 3) 忽略熔池的流动及熔池内部发生的化学反应;

4) 搭接率为 50% 。

利用 APDL 语言建立 L 型与 T 型特征区域的有限元模型,选用的单元类型为具有 8 个顶点的六面体 SOLID70 单元。在不影响温度场计算精度的前提下,为了节约计算时间,模型的网格尺寸均相同。图 1 为所建特征区域模型的尺寸示意图,基材

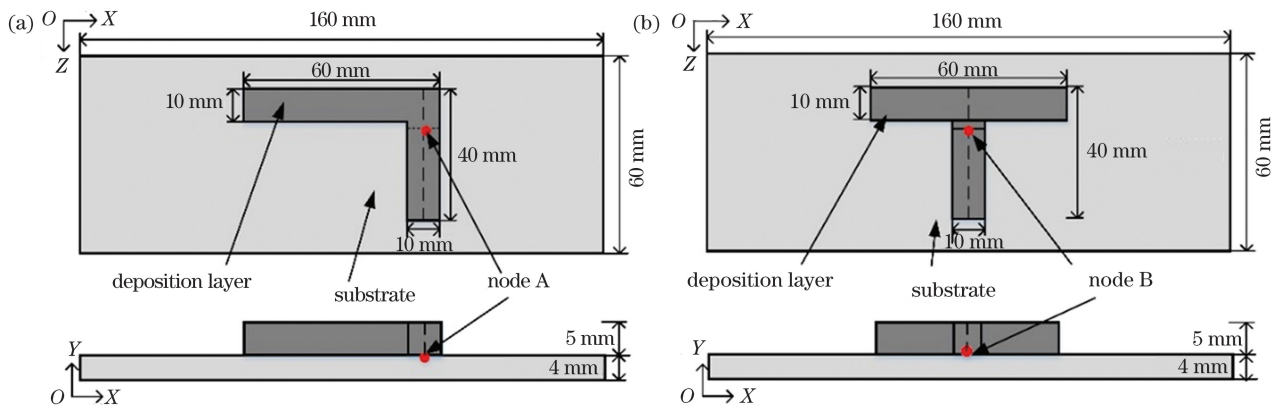


图 1 特征区域模型。(a)L 型特征区域;(b)T 型特征区域

Fig. 1 Characteristic region model. (a)L-shaped characteristic region;(b)T-shaped characteristic region

尺寸均为 160 mm×60 mm×4 mm, 沉积层高度为 5 mm(5 层), 在 L 型特征区域中选取节点 A, 在 T 型特征区域选取节点 B。工艺参数设定为激光功率

1500 W, 扫描速度 5 mm/s, 光斑直径 4 mm。两种特征区域的横梁为区域 A, 纵梁为区域 B, 扫描起点位置如图 2 所示。

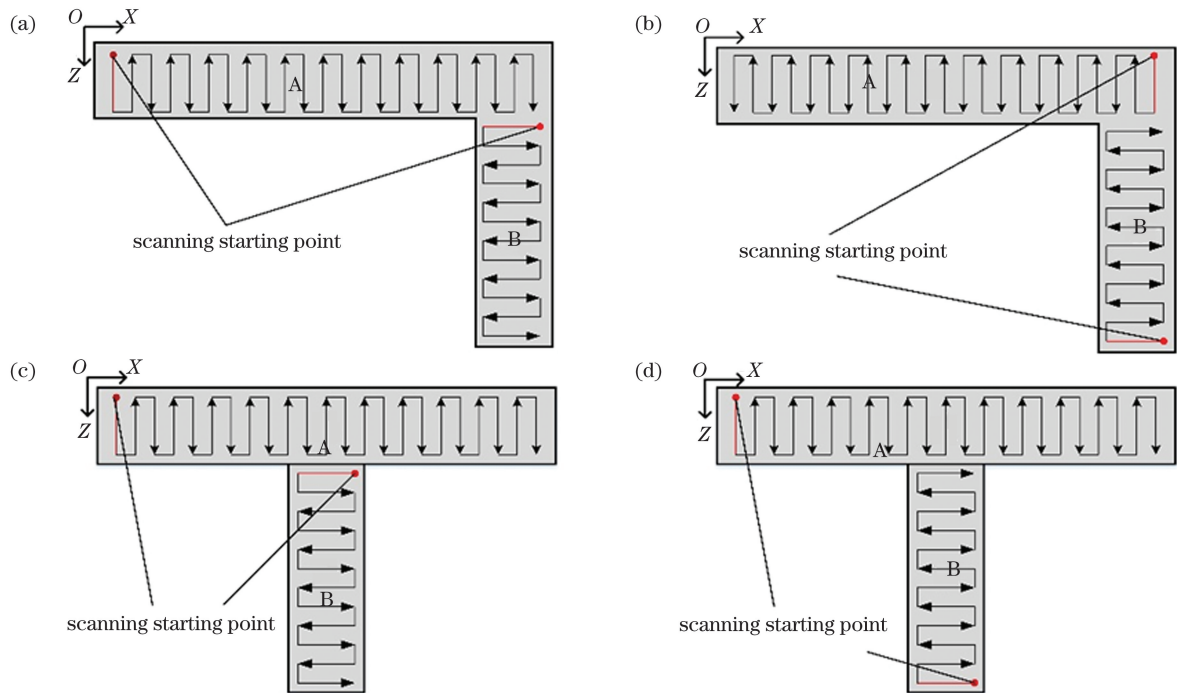


图 2 特征区域扫描起点位置。(a) L 型特征区域, 同侧起点扫描; (b) L 型特征区域, 异侧起点扫描; (c) T 型特征区域, 同侧起点扫描; (d) T 型特征区域, 异侧起点扫描

Fig. 2 Scanning starting point of characteristic region. (a) L-shaped characteristic region, ipsilateral side starting point scanning; (b) L-shaped characteristic region, opposite side starting point scanning; (c) T-shaped characteristic region, ipsilateral side starting point scanning; (d) T-shaped characteristic region, opposite side starting point scanning

2.2 扫描起点位置对特征区域温度场的影响

图 3 为不同扫描起点位置的特征区域温度场分布云图, 此时激光扫描结束, 温度分布呈椭圆形, 光斑中心呈近似圆形, 中心区域的温度最高, 可达到 1900 °C 左右。由图 3(a)、(b) 可以发现, 在扫描 L 型特征区域时, 异侧起点扫描时的温度影响范围更小, 熔池温度也更低。这是因为采用同侧起点扫描时, 区域 B 的扫描起点位置与区域 A 相邻, 基材温度始终呈现沿 Z 轴正方向逐渐降低的趋势; 而采用异侧起点扫描时, 区域 A 沉积结束后, 激光扫描区域 B 时的起点位置与区域 A 有一定间距, 基材的不同位置均得到了热量传导, 使基材温度分布得更均匀, 减弱了热累积效应。所以异侧起点扫描时熔池温度较低, 基材的整体温度也更低。这表明异侧起点扫描沉积制造 L 型特征区域可以在一定程度上减小温度的影响范围, 减小热累积效应。对比图 3(c)、(d) 可知, 异侧起点扫描时, 基材的整体温度与熔池温度更低。这表明沉积制造 T 型特征区域时采用该方式同样可以起到同样的

效果, 从而减小了沉积过程热行为对基材力学性能的影响。

2.3 扫描起点位置对节点温度的影响

图 4 为基材节点的热循环对比, 节点位置如图 1 所示。由图 4 可知, 在扫描过程中, 节点的温度随时间延长呈周期性变化。沉积第一层时, 激光束的热量迅速传入基材, 基材温度迅速上升, 在激光束到达节点正上方时, 对应该点温度曲线的第一个峰值; 之后随着激光束的远离, 该节点迅速冷却, 温度下降。沉积第二层时, 节点温度再次上升。共沉积了 5 层, 故出现了 5 个温度峰值。随着沉积过程的进行, 基板节点 A、B 的温度先升高, 之后呈下降趋势。这是因为在沉积初始时, 热量向基材传递的速度大于基材向周围传热的速度, 随着沉积高度的增加, 激光束在 Y 方向上不断远离节点, 传入基材的热量减少, 同时基材向周围环境不断散热, 故而基材温度呈现下降趋势。

由 4(a) 可知, 沉积 L 型特征区域时, 采用异侧起点扫描的节点的热循环曲线上升得更为缓慢, 节

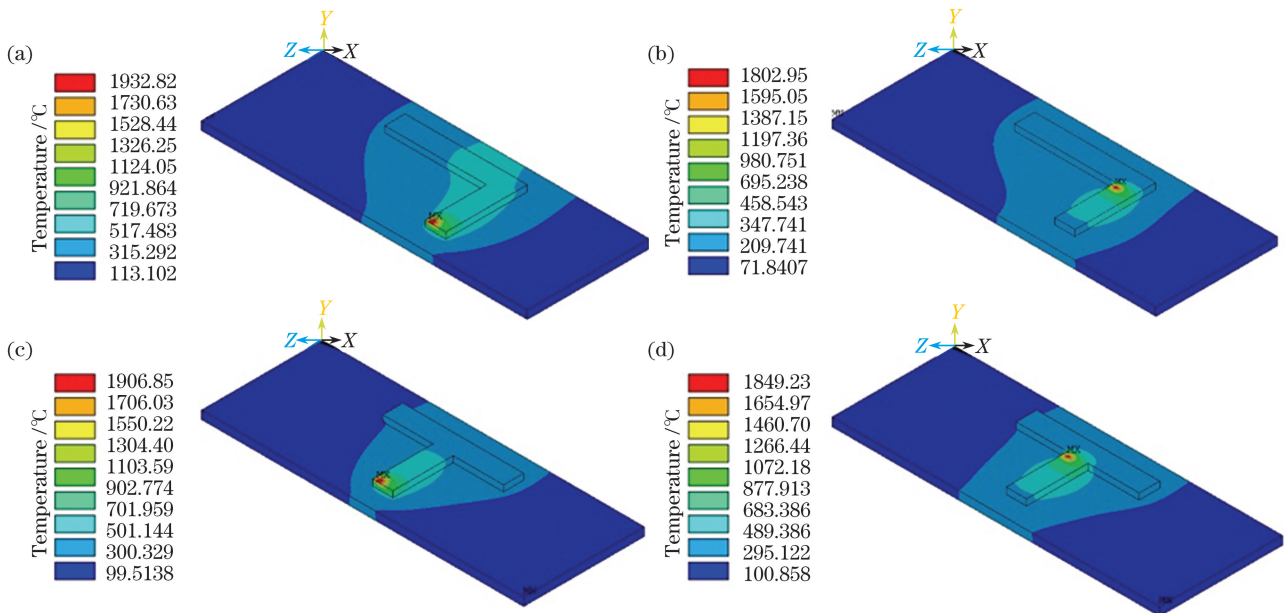


图 3 特征区域的温度场分布云图。(a) L 型特征区域, 同侧起点扫描; (b) L 型特征区域, 异侧起点扫描; (c) T 型特征区域, 同侧起点扫描; (d) T 型特征区域, 异侧起点扫描

Fig. 3 Temperature distribution nephograms of characteristic region. (a) L-shaped characteristic region, ipsilateral side starting point scanning; (b) L-shaped characteristic region, opposite side starting point scanning; (c) T-shaped characteristic region, ipsilateral side starting point scanning; (d) T-shaped characteristic region, opposite side starting point scanning

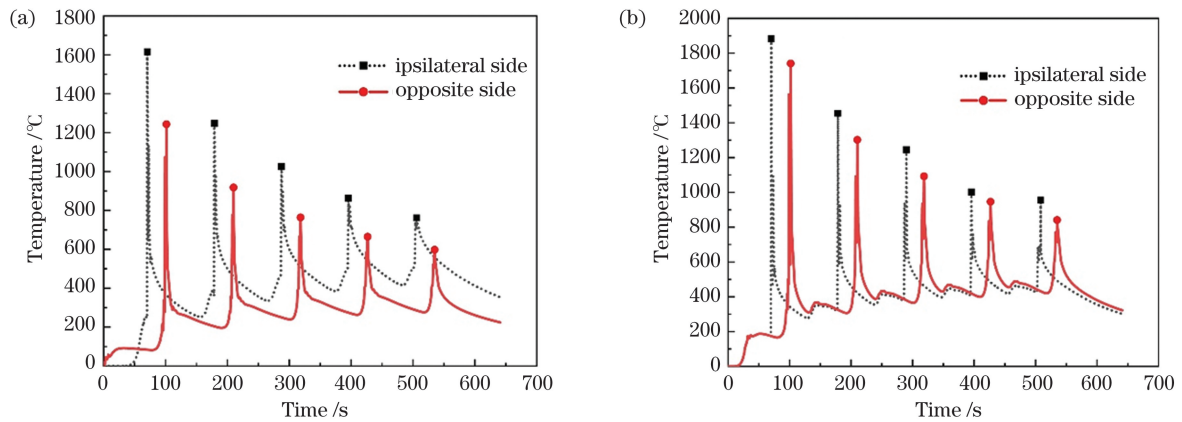


图 4 特征区域节点的热循环对比。(a) L 型特征区域节点 A; (b) T 型特征区域节点 B

Fig. 4 Thermal cycle of nodes in characteristic region. (a) Node A in L-shaped characteristic region; (a) node B in T-shaped characteristic region

点的峰值温度也更低。这表明异侧起点扫描沉积制造 L 型特征区域可以在一定程度上降低基材的温度, 基材温度更加均匀。由 4(b) 可知, 相较于同侧起点扫描, 采用异侧起点扫描沉积制造 T 型特征区域可以达到使基材温度分布更加均匀的效果。

3 框类结构件的温度分布与应力演化

3.1 框类结构件的建模

本文建立了框类结构件的有限元模型, 如图 5 所示, 基材尺寸为 118 mm × 60 mm × 6 mm, 沉积

层高度为 6 mm (6 层), 基材及沉积粉末仍均为 TA15 钛合金。在基材上选取节点 C, 其位置如图 5 所示。

将所建立的框类结构进行 L 型与 T 型特征区域的拆分, 共拆分成 6 个区域, 分区方式如图 6 所示, 其中 1、3、4、6 区域为 L 型区域, 2、5 区域为 T 型区域。沉积 L 型特征区域时, 采用图 2(b) 所示的异侧起点扫描; 沉积 T 型区域时, 采用图 2(d) 所示的异侧起点扫描。对 6 个特征区域的跳转扫描顺序进行规划, 得到特征区域间连续跳转、间隔跳转和最大

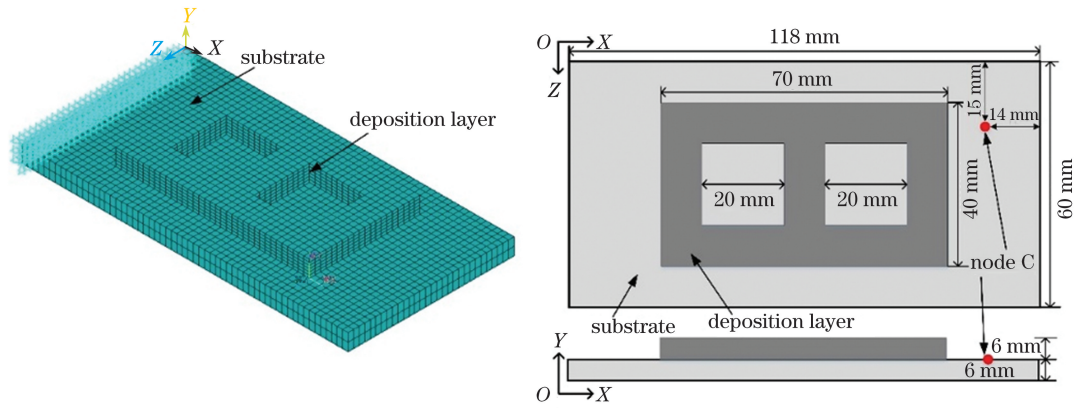


图 5 框类结构件的有限元模型

Fig. 5 Finite element model of frame structure

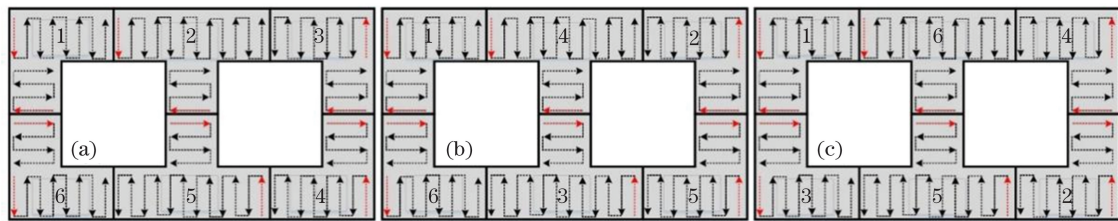


图 6 框类结构件的分区跳转扫描顺序。(a)连续跳转扫描;(b)间隔跳转扫描;(c)最大跨距跳转扫描

Fig. 6 Partition jump scanning sequence of frame structure. (a) Continuous jump; (b) interval jump scanning; (c) maximum span jump scanning

跨距跳转三种跳转扫描顺序,如图 6 所示。先模拟三种跳转扫描方式沉积制造框类结构件的温度场,激光功率为 1500 W,扫描速度为 5 mm/s。为了便于观察基材的变形,将所建模型基材 $X=0$ 端面的节点施加全部方向的约束,再将温度场的模拟结果加载到应力分析模型上,完成三种跳转扫描方式沉积制造框类结构件的应力场数值模拟。

3.2 跳转顺序对框类结构件温度场的影响

图 7 为三种跳转扫描方式下沉积结束时刻的温度场分布。对比三种跳转扫描方式下框类结构件的温度分布云图可知,在连续跳转扫描方式下,沉积结束时刻的熔池温度最高。这是因为采用另两种扫描方式时,激光在第一个特征区域扫描完成后即刻跳转,失去了能量输入的作用,传入该区域的热量剧烈

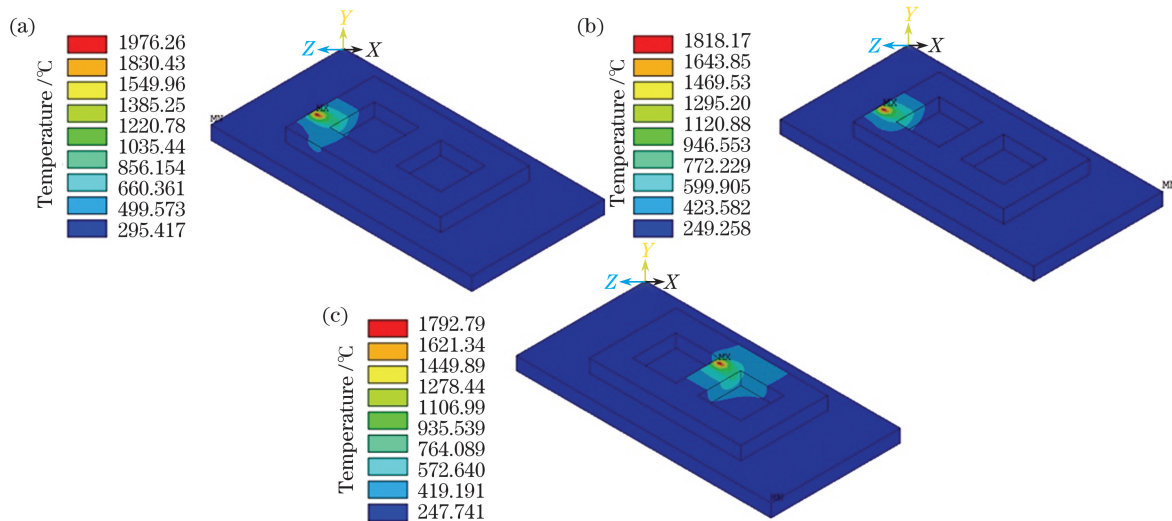


图 7 框类结构件的温度分布云图。(a)连续跳转扫描;(b)间隔跳转扫描;(c)最大跨距跳转扫描

Fig. 7 Temperature distribution nephograms of frame structure. (a) Continuous jump scanning; (b) interval jump scanning; (c) maximum span jump scanning

减少,此时激光移动到第二个特征区域,在第二个特征区域温度上升的同时,第一个特征区域迅速冷却,两个特征区域之间有一定的距离,在短时间内无法产生强烈的热累积效应,所以间隔跳转和最大跨距跳转扫描方式下的熔池最高温度均较连续跳转扫描方式下的低。两个特征区域之间的跨距越大,热量传入基材的位置相隔得越远,基材得到的热量传导范围就越大,所以相较于间隔跳转,最大跨距跳转可以较好地减弱热累积带来的影响。

3.3 跳转顺序对框类结构件应力场演变的影响

图 8 显示了三种跳转方式沉积框类结构件的应力演化过程。当 $t=369$ s 时,第 3 层沉积刚结束;当 $t=625$ s 时,第 5 层沉积刚结束。由图 8(a)、(c)、(e) 可知,在结束第 3 层沉积时,三种跳转方式下的应力均分布在扫描起始的第一个特征区域,且集中在该特征区域与基材接触的位置。这是因为沉

积初期,激光束能量传入第一个特征区域,该区域的温度迅速升高,但其他区域的温度仍然较低,会产生很大的温度梯度,从而产生较大的热应力(此时最远跨距跳转下的最大应力为 518 MPa,低于其他两种跳转方式)。由图 8(b)、(d)、(f) 可以看出:在结束第 5 层沉积时,应力开始向其他特征区域扩散(除扫描起始的第一个特征区域外),且同样分布在沉积层与基材接触的位置;相较于 $t=369$ s,此时特征区域连接位置出现了应力的分布。这是因为激光沉积某一特征区域时,该区域的材料受热膨胀,其变形受到相邻特征区域材料的约束,导致这两个特征区域连接处的应力出现集中,此时,三种跳转方式下的应力均高于 $t=369$ s 时的应力。由图 8 还可以看出,随着沉积高度增加,应力集中现象越发明显,最大跨距跳转扫描下的最大应力为 671 MPa(仍低于其他两种跳转方式下的最大应力)。

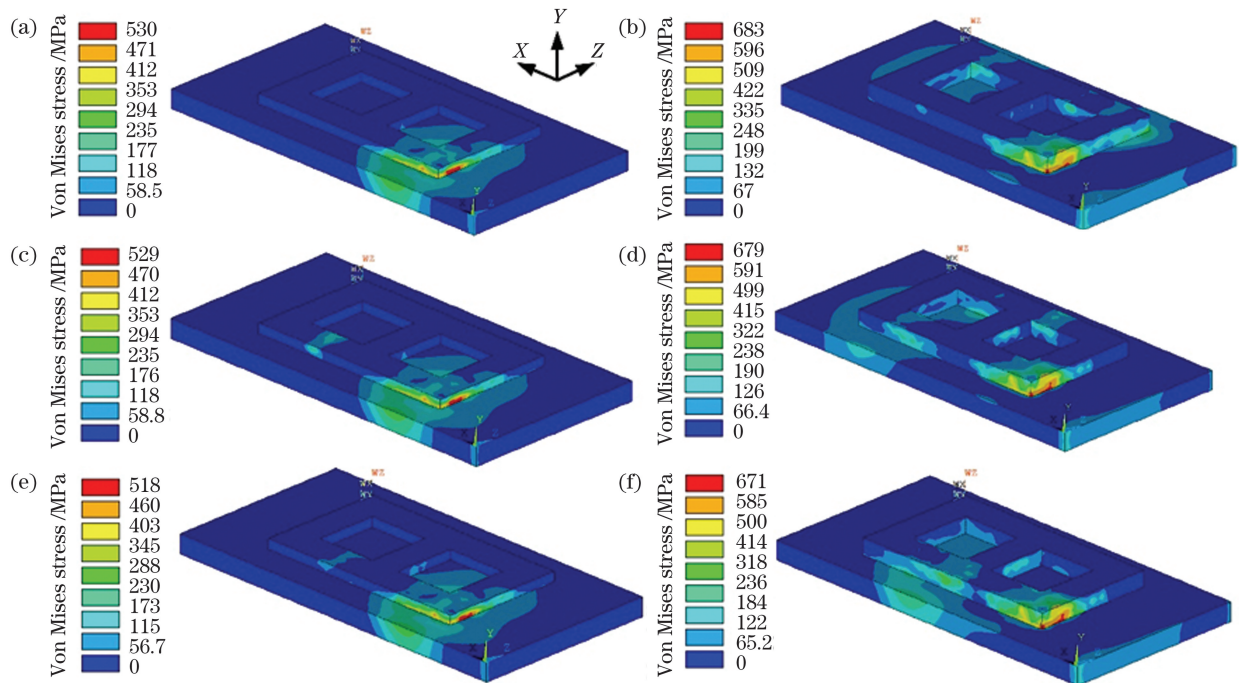


图 8 框类结构件的应力场演化。(a)连续跳转扫描, $t=369$ s;(b)连续跳转扫描, $t=625$ s;(c)间隔跳转扫描, $t=369$ s;(d)间隔跳转扫描, $t=625$ s;(e)最大跨距跳转扫描, $t=369$ s;(f)最大跨距跳转扫描, $t=625$ s

Fig. 8 Evolution of stress field of frame structure. (a) Continuous jump scanning, $t=369$ s; (b) continuous jump scanning, $t=625$ s; (c) interval jump scanning, $t=369$ s; (d) interval jump scanning, $t=625$ s; (e) maximum span jump scanning, $t=369$ s; (f) maximum span jump scanning, $t=625$ s

3.4 跳转顺序对框类结构件冷却前后应力场的影响

图 9 为三种跳转扫描方式下第 6 层沉积刚结束时与冷却 300 s 后的应力分布云图。由图 9(a)、(c)、(e) 可知,在沉积刚结束时,三种跳转扫描方式下,部分应力分布在沉积层与基材接触或相距较近的区域。这是因为距沉积层较近的基材,由于没有

激光的直接照射,温度相对较低,在扫描过程中该区域对沉积层材料的受热膨胀和冷却收缩产生了一定的抑制、约束作用,因此导致该区域有一定的应力累积,应力集中在扫描起始的第一个特征区域;相较于沉积第 5 层结束时,此时特征区域连接处的应力增大,符合上文所述随着沉积高度增加,应力集中现象

越发明显这一结论。此时最大跨距跳转扫描下的应力最大值为 690 MPa, 低于其他两种跳转扫描方式。由图 9(b)、(d)、(f) 可知, 冷却 300 s 后, 沉积层应力分布范围变化不大, 基材由于采用单侧固定的约束方式, 所以高应力区向约束位置聚拢, 集中在约束端两侧, 最大跨距跳转扫描方式下此位置的应力为

747 MPa, 相较于其他两种跳转扫描方式更小。这是由于最大跨距跳转扫描可以避免相邻特征区域的连续沉积, 前一特征区域能够进行有效散热, 弱化了热量的累积, 而且激光束的热量以最大跨距传入基材, 基材各位置均得到了预热, 可以减小基材的温度梯度, 从而减小了基材的应力集中与变形。

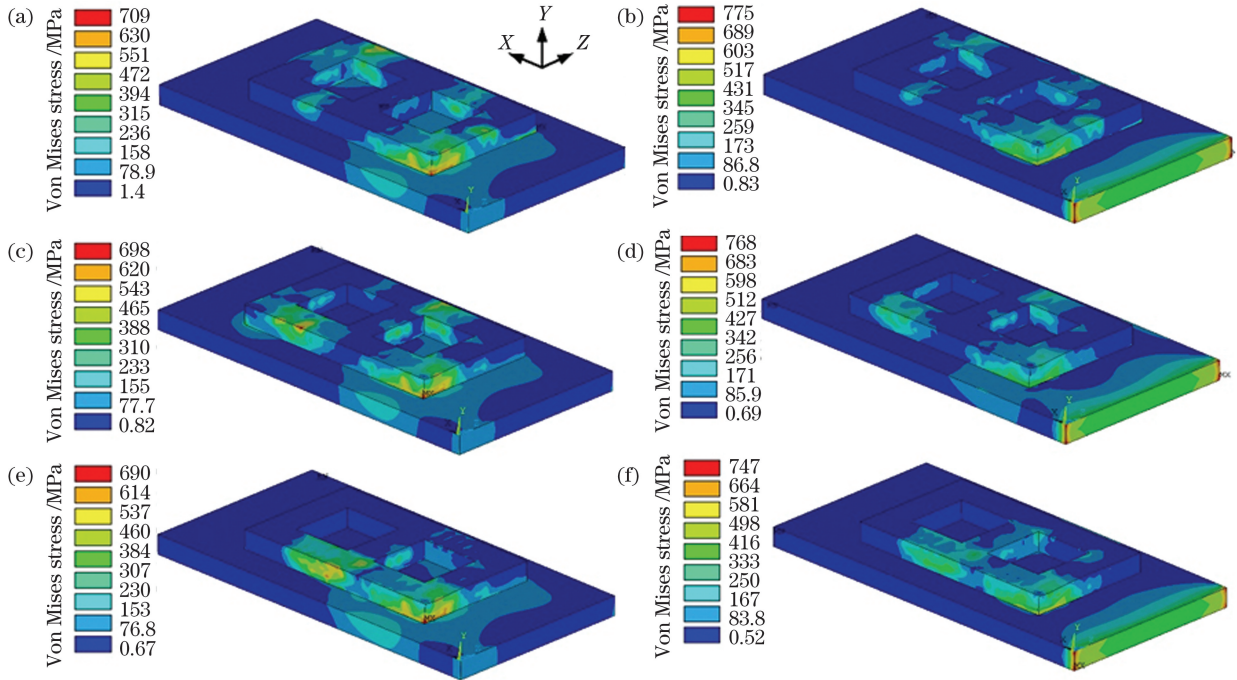


图 9 框类结构件的应力分布云图。(a)连续跳转扫描, 沉积刚结束时; (b)连续跳转扫描, 冷却 300 s; (c)间隔跳转扫描, 沉积刚结束时; (d)间隔跳转扫描, 冷却 300 s; (e)最大跨距跳转扫描, 沉积刚结束时; (f)最大跨距跳转扫描, 冷却 300 s

Fig. 9 Stress distribution nephograms of frame structure. (a) Continuous jump scanning, just after the deposition; (b) continuous jump scanning, after cooling for 300 s; (c) interval jump scanning, just after the deposition; (d) interval jump scanning, after cooling for 300 s; (e) maximum span jump scanning, just after the deposition; (f) maximum span jump scanning, after cooling for 300 s

4 实验验证

4.1 实验方法

为了验证三种跳转扫描方式对框类结构件变形影响数值模拟的正确性, 利用额定功率为 6 kW 的光纤激光器在配有气体循环净化系统的氩气保护箱中, 采用三种不同的跳转扫描方式沉积样件。基材选择锻造退火态 TA15 钛合金板材, 金属粉末选择 TA15 钛合金球形粉末(实验前需经过真空烘干 5 h), 实验过程中采用的工艺参数与数值模拟中的完全一致。为了对基材沿 Z 轴方向的一个端面的节点施加全部方向的约束, 实验中对基材进行单侧固定夹持。试件冷却后, 对基板未约束端面的变形量进行测量。在采用连续跳转扫描方式加工框类结构件过程中, 用热电偶法测量图 5 中所示节点 C 处的温度变化。

4.2 实验验证分析

图 10 是用连续跳转扫描方式进行模拟与实验时节点 C 的温度-时间历程(时间为 750 s), 可知, 实验过程中所测温度的变化趋势与数值模拟结果大体

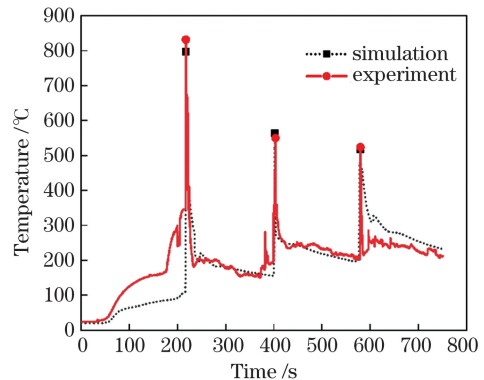


图 10 节点 C 的温度-时间历程

Fig. 10 Temperature-time history of node C

相符。前 750 s 共沉积三层,故两曲线均出现了三个温度峰值。三处温度峰值的模拟结果与实验结果相近,温度峰值最大误差出现在 220 s 附近,误差为 4.1%,温度场的数值模拟结果与实验结果较为相符。

图 11 为数值模拟与实验得到的三种跳转扫描方式下基材和框类结构件的变形量,可见,基材和框

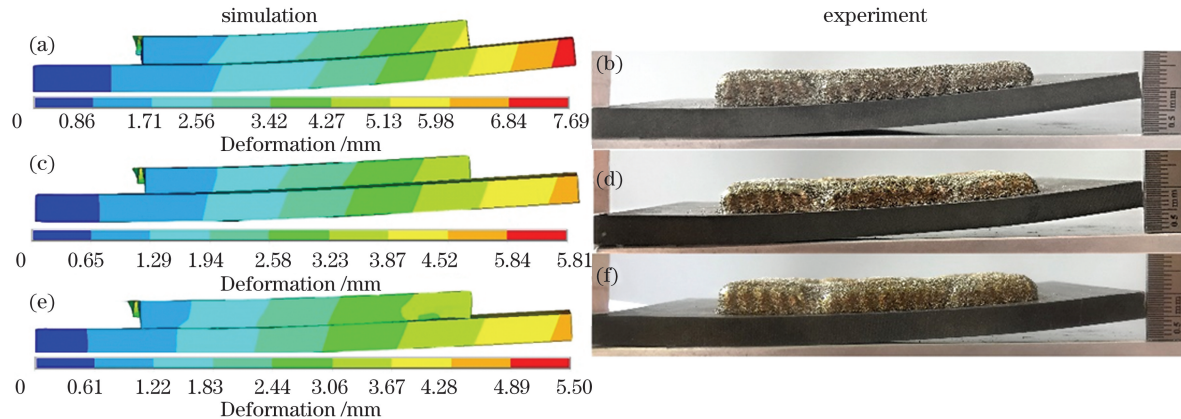


图 11 基材和框类结构件的变形。(a)(b)连续跳转扫描;(c)(d)间隔跳转扫描;(e)(f)最大跨距跳转扫描

Fig. 11 Formation of substrate and frame structure. (a)(b) Continuous jump scanning; (c)(d) interval jump scanning; (e)(f) maximum span jump scanning

在连续跳转扫描、间隔跳转扫描和最大跨距扫描方式下,模拟得到的基材的最大变形量分别为 7.69 mm、5.81 mm 和 4.89 mm,而实验得到的基材最大变形量分别为 8 mm、6 mm 和 5 mm,与数值模拟结果的误差分别为 3.88%、3.27% 和 2.22%,实验结果与模拟结果较为符合。在最大跨距跳转扫描方式下沉积得到的基材的变形量最小,再次验证了采用该扫描方式可以减小框类结构件的变形。

5 结 论

改变扫描起点位置会影响 L 型与 T 型特征区域的温度分布,采用异侧起点扫描沉积两种特征区域,可以使基材的温度分布更均匀。

在激光沉积制造框类结构件过程中,连续跳转扫描方式下的熔池温度最高;激光沉积结束后,冷却前后特征区域之间的连接位置处均存在应力集中,未冷却时应力集中分布在沉积层与基材接触或相距较近的区域,冷却后应力集中分布在基材约束位置;最大跨距跳转扫描下的应力分布范围更小,应力分布得更均匀。

框类结构件的沉积实验表明,在三种不同的跳转扫描方式下,基材和框类结构件均向光源方向发生了不同程度的弯曲变形,其中最大跨距跳转扫描

类结构件均向光源方向发生了不同程度的弯曲变形。这是因为沉积结束后,激光远离导致基材上表面温度迅速降低,之前激光辐照区域的材料开始收缩,同时,基材下表面由于传热效应温度仍继续升高,下表面材料的热膨胀量持续增加,屈服应力不断下降,最终使得基材和框类结构件产生面向激光源的翘曲变形^[19-21]。

方式下基材和框类结构件的变形量最小,表明采用该扫描方式可以改善框类结构件的变形情况。

参 考 文 献

- [1] Wang H M, Zhang S Q, Tang H B, et al. Research progress of laser rapid prototyping technology for large titanium alloy structures[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2008, 44(6): 28-30. 王华明, 张述泉, 汤海波, 等. 大型钛合金结构激光快速成形技术研究进展[J]. 航空精密制造技术, 2008, 44(6): 28-30.
- [2] Wang H M. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2690-2698. 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.
- [3] Shamsaei N, Yadollahi A, Bian L K, et al. An overview of direct laser deposition for additive manufacturing; part II: mechanical behavior, process parameter optimization and control [J]. Additive Manufacturing, 2015, 8: 12-35.
- [4] Colegrove P A, Donoghue J, Martina F, et al. Application of bulk deformation methods for microstructural and material property improvement and residual stress and distortion control in additively

- manufactured components [J]. *Scripta Materialia*, 2017, 135: 111-118.
- [5] Liu Y, Li Y M, Huang X P, et al. Microstructure of laser net shape manufactured Ti-6Al-4V[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34 (S1): 163-166.
刘勇, 李延民, 黄小平, 等. Ti-6Al-4V 合金的激光净成形制造及其显微组织[J]. *中国激光*, 2007, 34 (S1): 163-166.
- [6] Manvatkar V, De A, DebRoy T, et al. Spatial variation of melt pool geometry, peak temperature and solidification parameters during laser assisted additive manufacturing process[J]. *Materials Science and Technology*, 2015, 31(8): 924-930.
- [7] Manvatkar V, De A, DebRoy T, et al. Heat transfer and material flow during laser assisted multi-layer additive manufacturing [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(12): 124905.
- [8] Yang J, Huang W D, Chen J, et al. Residual stress on laser rapid forming metal part[J]. *Applied Laser*, 2004, 24(1): 5-8.
杨健, 黄卫东, 陈静, 等. 激光快速成形金属零件的残余应力[J]. *应用激光*, 2004, 24(1): 5-8.
- [9] Milewski J O, Thoma D J, Fonseca J C, et al. Development of a near net shape processing method for rhenium using directed light fabrication [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 1998, 13 (5): 719-730.
- [10] Paydas H, Mertens A, Carrus R, et al. Laser cladding as repair technology for Ti-6Al-4V alloy: influence of building strategy on microstructure and hardness [J]. *Materials & Design*, 2015, 85: 497-510.
- [11] Liu F C, Lin X, Huang C P, et al. The effect of laser scanning path on microstructures and mechanical properties of laser solid formed nickel-base superalloy Inconel 718[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509(13): 4505-4509.
- [12] Long R S, Liu W J, Xing F, et al. Effects of scanning methods on temperature during laser directly metal shaping[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2008, 19(4): 528-531.
龙日升, 刘伟军, 邢飞, 等. 扫描方式对激光金属沉积成形过程温度的影响[J]. *光电子 • 激光*, 2008, 19(4): 528-531.
- [13] Yan W Z, Zhao W J, Yue Z F, et al. Study on the role of deposition path in additive manufacturing process [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2018, 29(3): 58-66.
闫五柱, 赵万嘉, 岳珠峰, 等. 沉积态增材制造过程中的沉积路径影响研究[J]. *航空科学技术*, 2018, 29(3): 58-66.
- [14] Yang G, Zhou J P, Qin L Y, 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, 38(5): 63-68, 131-132.
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, 38(5): 63-68, 131-132.
- [15] Yang G, Zhou J P, Qin L Y, et al. Influence of separate area scanning on the temperature field of laser deposition manufacturing of titanium alloy [J]. *Applied Laser*, 2015, 35(4): 428-436.
杨光, 周佳平, 钦兰云, 等. 分区扫描对激光沉积制造钛合金温度场的影响[J]. *应用激光*, 2015, 35 (4): 428-436.
- [16] Bian H Y, Zuo S G, Qu S, et al. Generation algorithm of subarea annular scan paths for laser deposition forming [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(2): 021601.
卞宏友, 左士刚, 曲伸, 等. 激光沉积成形分区环形扫描路径生成算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(2): 021601.
- [17] Zhou X X, Xin B, Gong Y D, et al. Effect of scanning direction on microstructure and mechanical properties of part formed via variable thickness layer cladding deposition [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(8): 0802003.
周显新, 辛博, 巩亚东, 等. 扫描方向对变厚度熔覆成形件组织与力学性能的影响[J]. *中国激光*, 2019, 46(8): 0802003.
- [18] Pei M Y, Wurikaixi A Y T, Wang S Q, et al. Influence of the laser-cladding scanning path on thin-plate distortions [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(17): 171403.
裴明源, 乌日开西·艾依提, 王胜权, 等. 激光熔覆扫描路径对薄板变形的影响研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(17): 171403.
- [19] 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.
- [20] Mercelis P, Kruth J P. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2006, 12(5): 254-265.
- [21] Shi Y J, Shen H, Yao Z Q, et al. Temperature gradient mechanism in laser forming of thin plates [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39(4): 858-863.

Thermal-Mechanical Coupling of Regional Scanning Based on Characteristic Regions in Laser Additive Manufacturing

Yang Guang¹, Li Yuhang¹, Zhou Siyu¹, Wang Xia¹, Qin Lanyun^{1*}, Wang Xiangming²

¹ School of Mechatronic Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang, Liaoning 110136, China;

² Shenyang Aircraft Design Institute, Shenyang, Liaoning 110035, China

Abstract

Objective Large-scale integral titanium alloy structural parts have been used as an indicator to measure the technological advancement of defense equipment. Laser additive manufacturing technology, with its unique advantages, has gradually become one of the processing methods for large-scale integral titanium alloys. In laser additive manufacturing, formed parts are circularly heated by a focused and high-energy laser beam. A large temperature gradient will be established in the formed parts, resulting in complex stress and strain evolution during the forming process. After forming, enormous residual stress is generated inside the formed elements, causing the substrate to warp significantly. This problem has been one of the factors impeding the development of this technology. Many scholars have found that the method of subfield scanning can effectively control the internal stress during additive manufacturing of large-scale components. However, the layer configuration of the large frame structure is relatively complicated. It is necessary to consider the appropriate means for planning the scanning trajectory and jump sequence according to the structural characteristics of large-scale frame structures.

Methods To mitigate the deformation and cracking of formed parts in laser additive manufacturing due to uneven temperature distribution, a subfield scanning strategy based on characteristic regions was proposed. This study focused on two aspects: scanning starting point positions and jump strategy between characteristic regions. First, ANSYS was used to simulate two kinds of characteristic regions' deposition manufacturing processes, including the L-shaped and T-shaped regions. The influences of the ipsilateral side starting point scanning and the opposite side starting point scanning on the temperature field distribution of characteristic regions and the thermal cycle of substrates' nodes were analyzed. The best scanning starting points for the two characteristic regions were identified. After that, the frame structures' deposition manufacturing processes were simulated using three jump scanning strategies: continuous jump, interval jump, and maximum span jump. The temperature distribution nephograms of the frame structures under the three jump scanning strategies were obtained. Second, temperature field simulation results were loaded on stress analysis models to analyze the stress evolution process. Finally, the thermocouple's temperature variations of substrates' nodes during the deposition processes were monitored, and substrate deformation after deposition was measured. The experimental and simulation results were analyzed.

Results and Discussions The above research shows that changing the scanning start points will affect the L-shaped and T-shaped characteristic regions' temperature distribution. When using opposite side starting points to deposit characteristic regions, the influence range of temperature can be reduced; the cumulative heat effect can be reduced (Fig. 3), thereby decreasing thermal behavior's influence during the deposition process on the substrate's mechanical properties. In addition, when using opposite side starting points to deposit characteristic regions, the substrate's nodal thermal cycle curve rises slowly, and the node's peak temperature is also low (Fig. 4). When the frame structure's deposition is only completed, the maximum temperature of the molten pool with the maximum span jump scanning is lower than the interval jump scanning and continuous jump scanning (Fig. 7). During the deposition process, the three jump strategies' stresses are distributed in the characteristic region, where the scan starts, and the characteristic regions' junctions. The phenomenon of stress concentration becomes more visible as the deposition layer's height increases (Fig. 8). The deposited layer's stress distribution range does not change much after cooling; the substrate's high-stress area gathers to the constrained position, concentrated on both sides of the constrained end. The stress at maximum span jump scanning is lower than that at interval jump scanning and continuous jump scanning (Fig. 9).

Conclusions Following the above analysis, this article proposed a subfield scanning strategy based on characteristic regions for the large frame structure, classified according to its organizational characteristics. It is divided into two

characteristic regions: T-shaped and L-shaped regions. The effects of scanning start point positions and characteristic regions' jump scanning strategy on thermal behavior and stress evolution during the scanning process were investigated using theoretical analysis and numerical simulation. The simulation results were tested and verified through thermocouple temperature measurement and substrate warping deformation experiments. The results of the investigation agree with the simulation results. Studies have shown that the maximum span jump scanning strategy based on the characteristic regions can make the substrate's temperature distribution more uniform during the deposition manufacturing process, resulting in less stress and deformation of the formed parts. Discrete control of thermal stress is realized to reduce the macroscopic deformation and cracking of the formed parts. This study serves as a theoretical basis and method guidance for improving the forming quality of large-scale integral titanium alloy structural parts.

Key words laser technique; laser additive manufacturing; characteristic region; subfield scanning; numerical simulation

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390