

扫描路径对激光立体成形 TC4 构件热-力场的影响

Effect of scanning path on thermo-mechanical field of laser solid forming TC4 part

鹿旭飞^{1,2}, 林 鑫^{1,2}, 马 良^{1,2}, 曹 阳^{1,2}, 黄卫东^{1,2}

(1 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 西安 710072;

2 西北工业大学 金属高性能增材制造与创新设计工业和信息化部重点实验室, 西安 710072)

LU Xu-fei^{1,2}, LIN Xin^{1,2}, MA Liang^{1,2}, CAO Yang^{1,2}, HUANG Wei-dong^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2 Key Laboratory of Metal High Performance Additive Manufacturing and Innovative Design, Ministry of Industry and Information Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘要: 为减缓激光立体成形过程中由于大的热梯度导致的残余应力和变形, 首先采用原位测量监测成形过程中基板的温度及变形演化, 并以此校验有限元模型, 然后利用校准模型研究不同扫描路径对激光立体成形 TC4 钛合金构件热-力场演化行为的影响。结果表明: 模拟结果与实验吻合良好。最大热梯度和最大拉应力均出现在第一层扫描过程中, 温度梯度随沉积层数增加而逐渐减小。长边单向扫描方式下基板的变形量最大, 而采用短边往复扫描方式下残余应力和变形最小; 采用棋盘格扫描方式能有效减小基板的变形, 但不能减小构件的残余应力。另外, 基板的横向弯曲变形能有效抑制基板的纵向弯曲, 而相变诱导的应力释放对激光立体成形构件的残余应力和变形具有显著的影响。

关键词: 扫描路径; 热-力场; 激光立体成形; TC4 合金; 有限元分析

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2018.001474

中图分类号: TN249; TG356.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2019)12-0055-08

Abstract: In order to mitigate both residual stress and distortion induced by large thermal gradient in laser solid forming (LSF) process, the *in-situ* measurement first was used to monitor the thermal and distortion evolutions of the substrate during LSF and to calibrate the finite element model. Using the validated model, the effect of different scanning paths on the evolution of thermo-mechanical fields in LSF was analysed. The results show that good agreement is obtained between the numerical results and the experimental measurements. The maximum thermal gradient and the maximum tensile stress occur in the deposition of the first layer, and with the increasing of the layers, the temperature gradient is reduced gradually. The largest distortion is resulted from the long edge unidirectional scanning mode while the minimum residual stress and distortion is produced by short edge reciprocating scanning. The checkerboard scanning method can effectively reduce distortion of the substrate while hardly reduce the residual stress. In addition, the transverse bending of the substrate can notably curb the longitudinal bending of the substrate. Stress relaxation induced by the phase transformation has a significant effect on both residual stress and distortion of LSF part.

Key words: scanning path; thermo-mechanical field; laser solid forming; TC4 alloy; finite element analysis

激光立体成形(LSF)是一种基于同步送粉技术的先进工业制造技术,按照特定扫描策略,沉积连续层片

结构,最终得到近净成形零件^[1-2]。与传统加工技术相比较,LSF技术能够大大提高材料利用率并降低加工

成本,成形件的性能与锻件相当。但 LSF 过程中材料经受一个快热快冷循环,成形件中形成不均匀的温度场和极高的热梯度,导致残余应力和变形的出现,最终降低零件的几何精度和力学性能^[3-5]。成形件的最终变形和残余应力是一个累积的过程,具有历史相关性,因此深入理解 LSF 过程中热-力场的演化规律对有效控制残余应力和变形至关重要。

目前,国内外许多学者已经通过有限元数值模型来预测增材制造过程中的热-力场演化及残余应力和变形^[6-9],并利用原位实验测量验证了模型^[10-15]。Denlinger 等^[12-14]发展并验证了一个 LSF 模型,并通过原位温度和变形以及残余应力测量来校验 Ti-6Al-4V 热力耦合模型。他们发现 Ti-6Al-4V 中固态相变产生的应变会抵消其他类型应变,故在模型中设置退火温度为 690℃以考虑固态相变对应力场的影响,模拟结果与实验结果能够很好地匹配。他们还发现随着沉积过程中的间歇时间变小,构件的残余应力和变形变大,但 LSF 过程中的热-力场演化没有被详细分析。杨光等^[16]采用数值模拟和实验两种手段研究了扫描路径对激光修复钛合金残余应力与变形的影响,结果表明采用层间交错扫描路径的残余应力较小,但路径种类较少。目前,国内外研究人员通过优化工艺参数和扫描路径以及预热基板等方法来减缓增材制造过程中的应力及变形^[17],本文采用原位热-变形测量实验和有限元分析深入分析了不同扫描路径对 LSF 基板单边夹持构件热-力场演化行为的影响,为优化 LSF 扫描路径、减小甚至消除 LSF 过程中的残余应力和变形提供科学指导。

1 实验与模拟方法

1.1 实验方法

利用西北工业大学自主研发的 LMF-IIB 型 LSF 设备进行一个长边往复扫描方式的 LSF 原位测量实验。实验所用的基板是退火的锻造 TC4 钛合金基板(140mm×50mm×6mm),实验前将基板一端约束,另一端可自由变形。所用送给粉末为旋转电极法制作的 TC4 粉末,粒径为 44~149μm,实验前将粉末在 120℃真空炉烘干 3h。本实验沉积 14 道 4 层的长方体(78mm×22.5mm×2mm),熔覆层厚度为 0.5mm。实验采用激光功率为 1500W 的光纤激光作为热源,扫描速率为 17mm/s,激光束直径为 3mm,粉末送进速率为 12.0g/min,熔覆道中心间距为 1.5mm。在沉积过程中,利用热电偶和位移传感器实时测量基板底面的温度和变形,监测位置如图 1 所示,其中 TC1,TC2 和

TC3 点为热电偶测温点,DS1,DS2 和 DS3 点为位移传感器监测点。

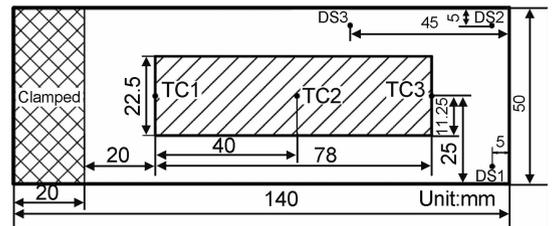


图1 热电偶和位移传感器监测位置

Fig.1 Detection location of the thermocouples and displacement sensors

1.2 模拟方法

首先利用有限元软件创建一个三维瞬态 LSF 热分析模型,计算成形件的温度场,然后将获得的温度场结果输入到一个三维准静态力学增量模型中计算应力应变场。与激光能量相比,塑性应变能非常小,因此本模型采用顺序耦合模式进行热-力场分析。一个热-弹-塑性 LSF 热力耦合模型在前期研究中已经被创建并被校验^[15],相变诱导的应力释放也被考虑到模型中^[14],即通过设置退火温度来实现,模拟过程中当材料温度超过 740℃,材料将处于完全退火状态。

LSF 构件有限元网格模型共包括 46704 个正六面体单元,54145 个节点。沉积金属的单元是按照每个光斑直径 4 个和每个层厚 1 个的标准进行划分,即单元尺寸为 0.75mm×0.75mm×0.5mm。随着远离沉积区,基板的网格尺寸逐渐增加,这样既有效减少了单元数目,又能保证计算精度。模型中的激光热源采用均匀体热源,工艺参数设置与实验一致,基板一端被完全约束。利用原位测量结果校验 LSF 模型从而获得模型各项参数。环境温度设置为 25℃,在所有自由表面施加对流和辐射条件,TC4 材料的辐射率设置为 0.27,对流换热系数设置为 5W/(m²·℃),基板夹持端表面的对流换热系数设置为 50W/(m²·℃),冷却方式为空冷。TC4 的材料属性参数见表 1^[15]。

为了研究相同工艺参数下,不同扫描路径对 LSF 构件热-力场演化的影响,设置 11 种不同的扫描路径,如图 2 所示,分别为长边单向扫描(case 1)、长边往复扫描(case 2)、短边单向扫描(case 3)、短边往复扫描(case 4)、层间正交变向扫描(case 5)、由内向外轮廓偏置扫描(case 6)、由外向内轮廓偏置扫描(case 7)、棋盘格平行短边扫描(case 8)、棋盘格平行长边扫描(case 9)、棋盘格 90°旋转扫描(case 10)和棋盘层间正交变向扫描(case 11)方式。其中长边与短边的设定是基于绝对长度,通常扫描线小于 30mm 为短扫描线,而大于 50mm 为长扫描线。对不同路径的模型设

置相同的工艺参数和边界条件,分析不同扫描路径下 LSF 热-力场演化。

表 1 TC4 钛合金材料属性参数^[15]
Table 1 Material property parameter of TC4 titanium alloy^[15]

Temperature/ °C	Density/ (kg · m ⁻³)	Thermal conductivity/ (W · (m · °C) ⁻¹)	Heat capacity/ (J · (kg · °C) ⁻¹)	Poisson's ratio	Thermal expansion coefficient/ (10 ⁻⁶ · °C ⁻¹)	Young's modulus/GPa	Elastic limit/MPa
20	4420	7	546	0.345	8.78	110	850
205	4395	8.75	584	0.35	10	100	630
500	4350	12.6	651	0.37	11.2	76	470
995	4282	22.7	753	0.43	12.3	15	13
1100	4267	19.3	641	0.43	12.4	5	5
1200	4252	21	660	0.43	12.42	4	1
1600	4198	25.8	732	0.43	12.5	1	0.5
1650	3886	83.5	831	0.43	12.5	0.1	0.1
2000	3818	83.5	831	0.43	12.5	0.01	0.01

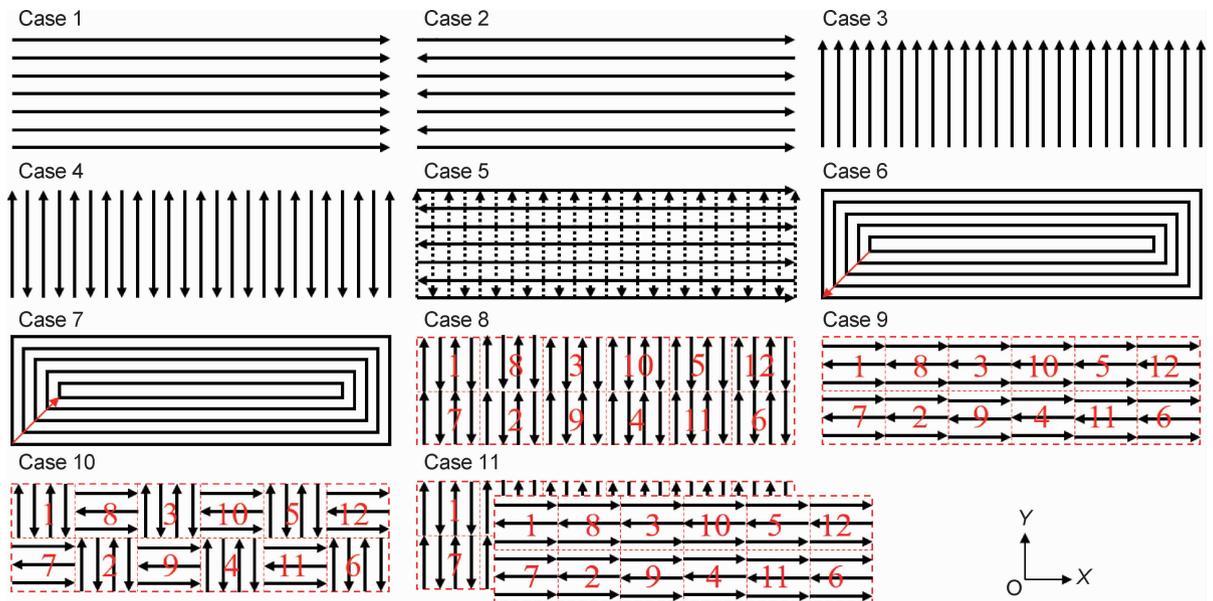


图 2 LSF 工艺扫描路径示意图
Fig. 2 Schematic diagram of scanning paths in the LSF process

2 结果与讨论

2.1 模型验证

图 3 为利用 LSF 热力耦合模型模拟长边往复扫描方式下基板特定位置的温度和变形演化历史。图 3 (a)是基板 TC1,TC2 和 TC3 点的温度测量结果与对应几何模型上相应节点的温度历史,模拟结果与实验结果相符。各曲线具有相似的演化特征,在沉积第 1 层过程中,基板温度迅速上升到 300°C 以上,随着沉积层数增加,基板温度增加速率逐渐减小。整体温度曲线呈现若干波峰和波谷,这主要是由于激光热源规律性的移动以及热损失的增加。另外,在成形过程中,激光热源的热输入大于热散失,热量在基板上不断积累,基板温度逐渐升高。当沉积结束后,激光热源关闭,基板先迅速冷却,冷却速率高达 10°C/s,200s 后冷速减

缓。位于基板中心的 TC2 点的峰值温度较其余两点的峰值温度高约 200°C,主要是基板内部热损失量较小。虽然基板上 TC1,TC3 两点位置相对于沉积区呈对称分布,热量输入和通过对流及辐射散失的热量相当,但是 TC1 点的峰值温度较 TC3 低约 50°C,这是由于 TC1 距夹具较近,而 TC3 靠近基板的自由端,故导热条件有所不同。图 3(b)是基板的变形历史,在第 1 层沉积过程中,基板的变形急剧增加,在第 2~4 层沉积过程中基板变形显著地减小,这是由于热累积导致的基板软化,使得应力释放,在冷却阶段基板变形先迅速增加随后保持稳定。

各试样整体模拟结果的平均误差可以通过下式进行计算:

$$\text{Error} = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{(x_{\text{exp}})_i - (x_{\text{sim}})_i}{(x_{\text{exp}})_i} \right|}{n} \times 100\% \quad (1)$$

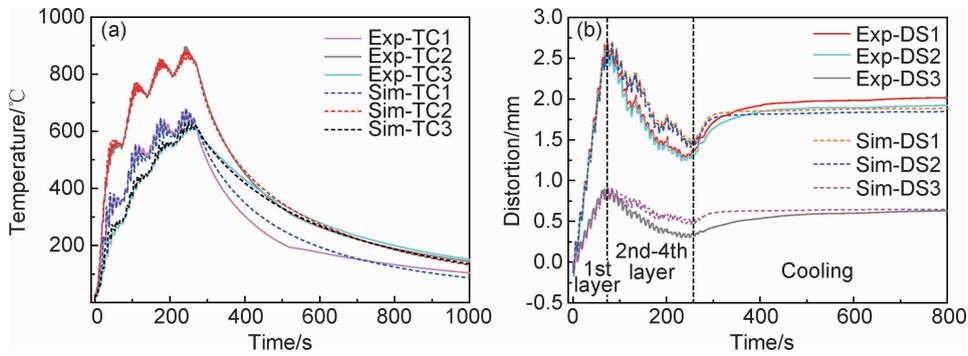


图3 计算和测量的LSF构件热-变形历史 (a)温度;(b)变形

Fig. 3 Calculated and measured thermal and distortion histories of LSF part (a)temperature;(b)distortion

式中: n 为总模拟时间增量数; i 为当前时间增量; x_{exp} 为实验测量值; x_{sim} 为模拟值。表2显示了模拟的各温度和变形的平均百分误差,其中最大误差值为6.57%。

表2 各温度及变形的平均误差(%)

Table 2 Average error of each temperature and distortion evolution(%)

TC1	TC2	TC3	DS1	DS2	DS3
4.21	2.05	2.15	6.57	6.51	4.93

2.2 扫描路径对热-力场的影响

2.2.1 扫描路径对温度场的影响

图4为在LSF工艺参数相同情况下,不同扫描路

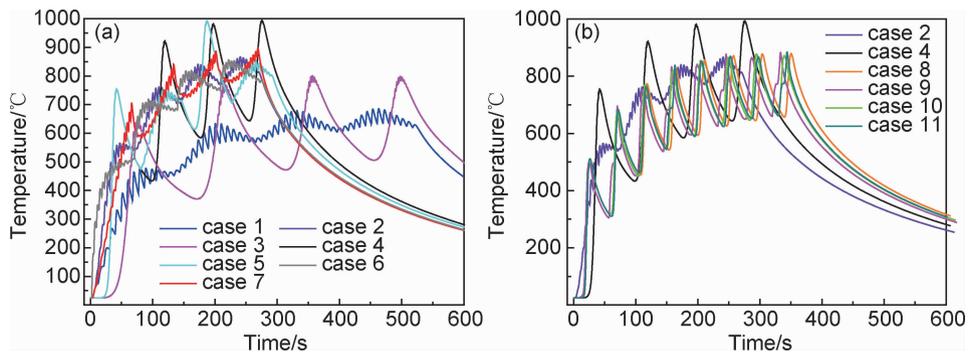


图4 不同扫描路径下基板TC2点的热历史

Fig. 4 Thermal histories of the substrate at TC2 point under different scanning paths

2.2.2 扫描路径对变形的影响

图5为计算的不同扫描路径下基板纵向弯曲变形历史,图6为模拟的不同扫描路径下基板在LSF过程中的最大纵向弯曲变形和残余变形。采用长边单向扫描方式在第1层熔覆结束时基板变形高达2.5mm,在第2~4层沉积过程中基板变形几乎没有增加,而在冷却阶段基板变形增加约0.5mm,该扫描方式下基板的最终变形最大。而采用长边往复扫描方式在第1层沉积结束时基板变形高达2.7mm,在第2~4层沉积过

程的基板底部TC2位置的温度演化历史。可以看出,当采用单向扫描方式时,由于熔覆道间存在一定的间歇时间,导致基板的热累积明显较小,即相应基板的温度较低,最大平均温度约为650℃。当采用短边往复扫描和层间正交变向扫描时,基板TC2点的温度曲线经历较大的波动,最大平均温度约为850℃。当采用长边往复扫描和轮廓偏置扫描方式时,基板TC2点的温度曲线波动较小,其最大平均温度约为850℃。当采用棋盘扫描方式时,基板TC2点的温度曲线也产生较大波动,并且各曲线变化规律很相似,但其最大平均温度较低,约为750℃。往复扫描和层间正交变向扫描以及轮廓偏置等扫描方式下的基板热累积较高。

程中基板软化导致应力释放,故变形呈线性减小,减小量为1.2mm,但在冷却阶段由于冷却收缩基板变形增加约0.5mm。对比长边单向和长边往复两种扫描,熔覆道间的间歇时间对变形影响很大,单向扫描方式下的间歇时间相当冷却阶段,使得基板的热累积减小,不利于应力释放。

采用短边单向扫描方式在第1层沉积结束时基板变形量增加到1.65mm,在第2~4层沉积过程中基板变形先迅速减小随后保持稳定,而在冷却阶段基板变

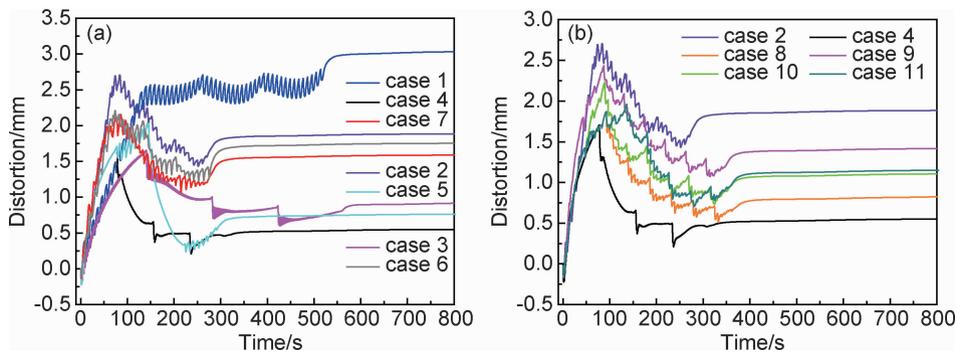


图 5 不同扫描路径下基板的变形历史

Fig. 5 Distortion histories of the substrate under different scanning paths

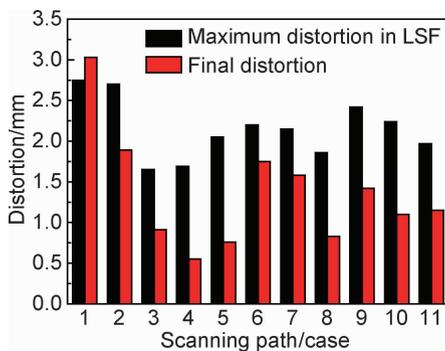


图 6 不同扫描路径下基板在 LSF 过程中的最大变形及最终变形

Fig. 6 Maximum distortion in LSF process and final distortion of the substrate under different scanning paths

形略有增加,该扫描方式下基板的最终变形为 0.91mm。而采用短边往复扫描方式在第 1 层沉积结束时基板变形则高达 1.69mm,在第 2~4 层沉积过程中基板变形减小了 1.2mm,在后期沉积过程及冷却阶段基板变形基本保持不变,其残余变形仅为 0.55mm 且为最小值。对比短边单向和短边往复两种扫描,基板均会出现应力释放,这是由于短边扫描较长边扫描局部热累积速率较高,故靠近熔池附近的基板内部应力易被释放。另外,间歇时间在第 1 层沉积过程中对基板的变形几乎没有影响,但影响后期沉积过程中基板的应力释放速率。

采用层间正交变向扫描第 1 层结束时变形与短边往复扫描相同,均为 1.65mm。在第 2 层沉积过程中基板变形逐渐增加到 2.05mm,这表明长边扫描促进基板变形,而短边扫描则有利于减缓基板变形。在第 3 层沉积过程采用短边往复扫描,基板变形急剧下降了 1.72mm,这是由于前两层的热累积已经促使基板达到较高的温度,因此应力能够在第 3 层沉积过程中充分释放,导致累积的基板变形大幅度减缓。第 4 层沉积过程采用沿长边往复扫描方式,基板的变形再次增加,冷却初始阶段变形继续增加,随后保持为

0.76mm,这与采用长边往复扫描方式的残余变形一致。

采用由内向外轮廓偏置和由外向内轮廓偏置两种扫描方式,第一层沉积结束时基板变形量都约为 2.2mm,约等于短边往复和长边往复两种扫描基板变形的平均(1.69mm 和 2.7mm),这是由于轮廓偏置路径由 50%短边往复路径和 50%长边往复路径组成。在第 2~4 层沉积过程中,两种偏置路径的基板变形均逐渐减少,减少量均大于 0.85mm。在冷却阶段,两种轮廓偏置扫描方式的基板变形均增加约为 0.35mm。

采用棋盘格平行短边扫描第一层沉积结束时基板变形为 1.86mm,在第 2~4 层沉积过程中基板变形迅速减小,而冷却阶段基板变形略有增加,其最终变形为 0.83mm。棋盘格平行短边扫描下基板在沉积过程中的最大纵向弯曲变形和残余变形均较大,相比短边往复扫描分别增加 0.17mm 和 0.28mm。这是由于短边往复扫描下基板的热累积量较高。采用棋盘格平行长边扫描第一层沉积结束时基板变形为 2.42mm,在第 2~4 层沉积过程中基板变形同样迅速减小,而冷却阶段基板变形也略有增加,基板的最终变形为 1.42mm。相比长边往复扫描,棋盘格平行长边扫描下基板在沉积过程中的最大纵向弯曲变形和残余变形均较小,分别减小 0.28mm 和 0.47mm。虽然长边往复扫描下基板热累积量较高,应力释放更充分,但显然缩短纵向扫描线长度对减缓纵向弯曲变形更有效。

采用棋盘格 90°旋转和棋盘层间正交变向两种扫描,基板的残余变形基本一致,约为 1.13mm,介于棋盘格平行短边扫描和棋盘格平行长边扫描之间。但第一层沉积结束后,采用棋盘格 90°旋转扫描的基板变形(2.24mm)明显较大,该变形同样介于棋盘格平行短边扫描和棋盘格平行长边扫描之间,这是由于棋盘格 90°旋转和棋盘层间正交变向扫描均是由 50%棋盘格平行短边扫描和 50%棋盘格平行长边扫描组成。

综上,基板变形在第 1 层沉积过程中急剧增加,对残余变形贡献最大。所有的变形减小均是对初始变形的减缓,减缓程度取决于应力释放程度。纵向扫描对变形有强烈的促进作用,而横向扫描能够有效减缓基板的纵向弯曲变形。棋盘扫描虽不利于基板的热累积,但缩短了纵向扫描线长度,因此有利于减小基板纵

向弯曲变形。

2.2.3 扫描路径对应应力场的影响

图 7 为不同扫描路径下构件的纵向残余应力场(σ_{xx}),图 8 为不同扫描路径下构件的横向残余应力场(σ_{yy})。可以看到在基板与沉积金属接触界面的棱角处存在较高的拉应力。

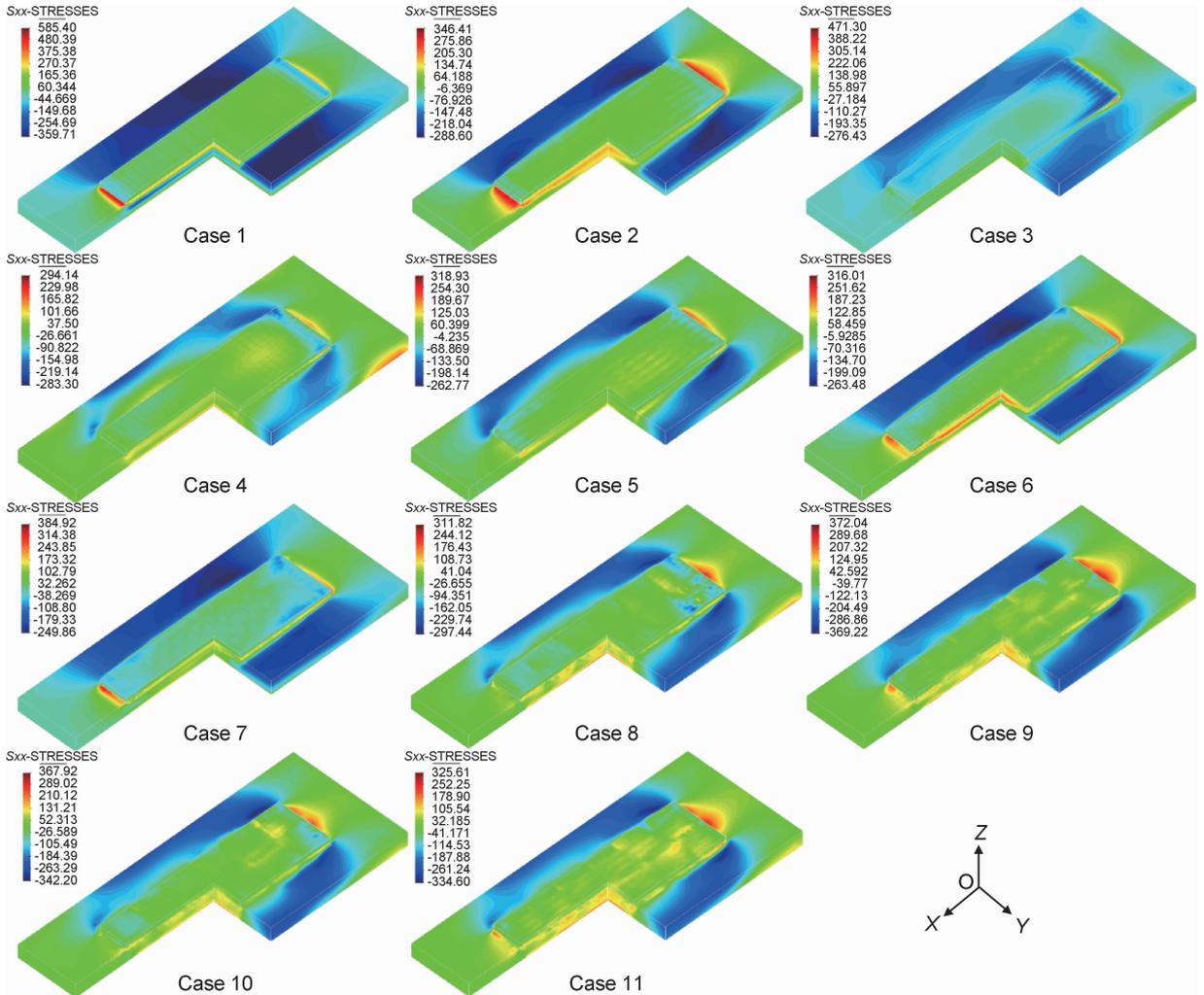


图 7 不同扫描路径下的纵向残余应力场(σ_{xx})

Fig. 7 Longitudinal residual stress field (σ_{xx}) under different scanning paths

当采用长边单向扫描方式时,沉积金属端部产生高达 585MPa 的拉应力,同时在沉积金属附近基板上的压应力高达 350MPa;当采用长边往复扫描方式时,与长边单向扫描方式下的构件残余应力场分布规律相似,但构件的残余应力略有减小,主要是由于往复扫描方式下基板的热累积更高,有利于基板的应力释放。当采用短边单向扫描方式时,构件的纵向残余拉应力显著减小,而位于长方体端部的横向拉应力则明显增高,最大拉应力为 720MPa,这是由于扫描线均平行于短边,一系列沉积道冷却收缩约束基板上表面的横

向收缩,而垂直沉积道的纵向拉应力则相对较小。当采用短边往复扫描方式时,与短边单向扫描方式相比,构件的残余应力显著减小,并且该扫描方式下基板的残余应力最小。与长边扫描方式相比,短边扫描方式下基板与沉积金属界面上没有较高的拉应力。当采用层间正交变向扫描方式时,基板的残余应力水平介于长边往复和短边往复扫描之间,基板与沉积金属界面的纵向应力较小。

当采用轮廓偏置扫描方式时,构件的纵向残余应力场与长边扫描相似,基板与沉积金属界面存在较大

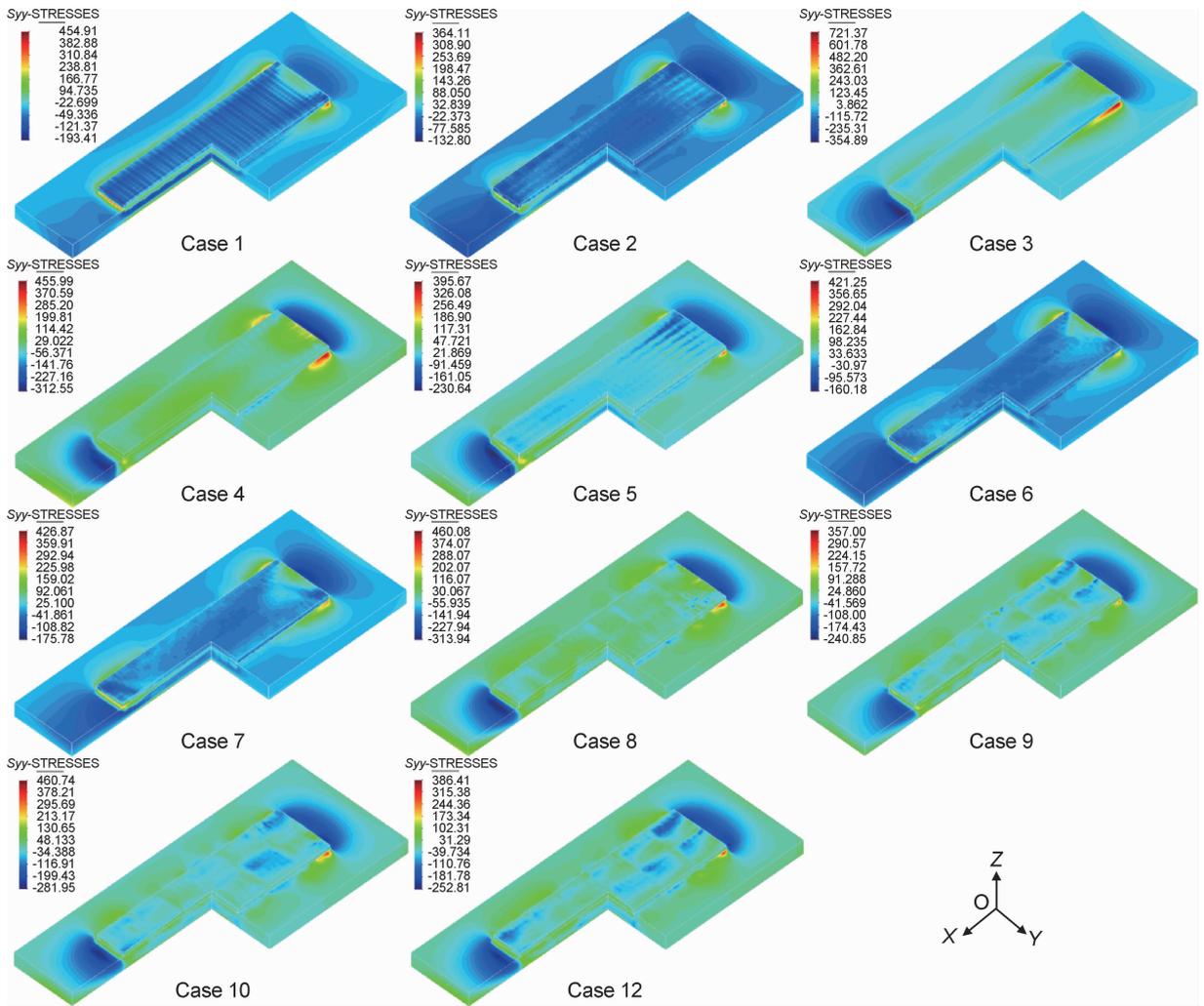


图 8 不同扫描路径下的横向残余应力场(σ_{yy})

Fig. 8 Transverse residual stress field (σ_{yy}) under different scanning paths

的拉应力,这是由于轮廓偏置扫描中同样存在沿纵向的长扫描线,而由内向外轮廓偏置扫描方式下构件的应力水平较由外向内轮廓偏置扫描方式下构件的应力水平高。对比长边往复扫描和棋盘格平行长边扫描,构件的纵向残余应力分布基本相同,而棋盘格平行长边扫描的构件横向残余应力分布略小。对比短边往复扫描和棋盘格平行短边扫描,构件的纵向残余应力分布基本相同,而棋盘格平行短边扫描的构件横向残余应力分布略小。当采用棋盘格 90°旋转和棋盘层间正交变向两种扫描方式,基板的残余应力水平介于棋盘格平行短边扫描和棋盘格平行长边扫描两种方式之间。

3 结论

(1)最大的热梯度和最大的基板变形出现在第一层扫描过程中,温度梯度随沉积层数增加逐渐减小。

(2)相比往复扫描方式,单向扫描方式中的间歇时间对构件有冷却作用,使得基板的热积累量减小,最终导致较大的变形和残余应力。

(3)长边单向扫描方式下基板的变形量最大,而采用短边往复扫描方式下残余应力和变形最小。相比于长边扫描方式,平行于短边扫描方式下基板的横向弯曲变形能有效抑制基板的纵向弯曲。

(4)采用棋盘格扫描方式,即减小基板的纵向扫描线长度,能有效减小基板的变形,但不能减小构件的残余应力。

参考文献

[1] 黄卫东,李延民,冯莉萍,等. 金属材料激光立体成形技术[J]. 材料工程,2002(3):40-43.
HUANG W D,LI Y M,FENG L P,et al. Laser solid forming of metal powder materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2002(3): 40-43.
[2] HUANG W D, LIN X. Research progress in laser solid forming

- of high-performance metallic components at the state key laboratory of solidification processing of China[J]. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2014, 1(3): 156-165.
- [3] LU X F, LIN X, CHIUMENTI M, et al. *In situ* measurements and thermo-mechanical simulation of Ti-6Al-4V laser solid forming processes[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 153: 119-130.
- [4] CAO J, GHARGHOURI 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.
- [5] LU X F, LIN X, CHIUMENTI M, et al. Residual stress and distortion of rectangular and S-shaped Ti-6Al-4V parts by directed energy deposition: modelling and experimental calibration [J]. Additive Manufacturing, 2019, 26: 166-179.
- [6] PEYRE P, AUBRY P, FABBRO R, et al. Analytical and numerical modelling of the direct metal deposition laser process [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, 41(2):25403.
- [7] ANCA A, FACHINOTTI V D, ESCOBAR-PALAFIX G, et al. Computational modelling of shaped metal deposition[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2011, 85(1): 84-106.
- [8] MARIMUTHU S, CLARK D, ALLEN J, et al. Finite element modelling of substrate thermal distortion in direct laser additive manufacture of an aero-engine component[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2013, 227(9): 1987-1999.
- [9] LUNDBACK A, LINDGREN L E. Modelling of metal deposition [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2011, 47(10): 1169-1177.
- [10] LUNDBACK A, PEDERSON R, COLLIANDER M H, et al. Modeling and experimental measurement with synchrotron radiation of residual stresses in laser metal deposited Ti-6Al-4V[C]// Proceedings of the 13th World Conference on Titanium. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2016: 1279-1282.
- [11] CHIUMENTI M, CERVERA M, SALMI A, et al. Finite element modeling of multi-pass welding and shaped metal deposition processes[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2010, 199(37/40): 2343-2359.
- [12] DENLINGER E R, HEIGEL J C, MICHALERIS P, 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.
- [13] DENLINGER E R, HEIGEL J C, MICHALERIS P. Residual stress and distortion modeling of electron beam direct manufacturing Ti-6Al-4V[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B, 2015, 229(10): 1803-1813.
- [14] DENLINGER E R, MICHALERIS P. Effect of stress relaxation on distortion in additive manufacturing process modeling [J]. Additive Manufacturing, 2016, 12: 51-59.
- [15] LU X F, LIN X, CHIUMENTI M, et al. Finite element analysis and experimental validation of the thermomechanical behavior in laser solid forming of Ti-6Al-4V[J]. Additive Manufacturing, 2018, 21: 30-40.
- [16] 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.
YANG G, DING L L, WANG X M, et al. Influence of scanning path on residual stress and distortion of laser repairing titanium alloy[J]. Infrared & Laser Engineering, 2015, 44(10): 2926-2932.
- [17] 卞宏友,杨光,李英,等. 金属激光成形分组平行扫描路径生成方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(11): 171-176.
BIAN H Y, YANG G, LI Y, et al. Grouping parallel scan path generating method of metal laser deposition shaping [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(11): 171-176.

基金项目:国家重点研发计划(2016YFB1100602,2016YFB1100104)

收稿日期:2018-12-27;修订日期:2019-06-18

通讯作者:林鑫(1973—),男,教授,博士,研究方向:高性能复杂金属构件激光增材制造,联系地址:西安市碑林区友谊西路127号西北工业大学公字楼(710072),E-mail: xlin@nwpu.edu.cn

(本文责编:杨雪)