

沉积路径对激光立体成形钛合金 T 型缘条热/应力场的影响

姜亚琼 林鑫 马良 谭华 杨海欧 黄卫东

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 分别建立了基于轮廓偏置、长光栅、短光栅三种沉积路径的 Ti-6Al-4V 合金 T 型缘条激光立体成形过程热/应力场有限元模型。结果表明熔池最大温度梯度沿垂直方向的分量 $G_{Y_{max}}$ 比扫描方向的分量 $G_{X_{max}}$ 大得多, 随成形高度的增加, 二者都先下降后快速趋于稳定, 最终稳定的 $G_{Y_{max}}$ 约是 $G_{X_{max}}$ 的三倍。短光栅沉积时瞬时最大温度梯度 $G_{T_{max}}$ 呈现小幅度的振荡变化, 且整体小于另外两种沉积路径。长光栅路径的应力增长速率略大于轮廓偏置路径, 短光栅的最小。成形结束后, 采用轮廓偏置路径的横、纵向缘条连接处的背面出现应力集中, 长光栅沉积的缘条端部存在大范围的应力集中, 而采用短光栅沉积的缘条整体应力分布最均匀。沉积结束后, 三种沉积方式基板上各个方向的残余应力分布规律基本相同, 但是, 采用短光栅沉积的基板上应力值比其他两种路径小。

关键词 激光技术; 激光立体成形; 热/应力场; 沉积路径; T 型缘条

中图分类号 TG142 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0703003

Effects of Scanning Patterns on the Thermal/Stress Field during Laser Solid Forming T-Shape Chord of Ti-6Al-4V Alloy

Jiang Yaqiong Lin Xin Ma Liang Tan Hua Yang Haiou Huang Weidong

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract Finite-element models of the thermal/stress field for three different scanning patterns, i. e. contour offsetting, long raster and short raster patterns, during laser solid forming (LSF) processes for T-shaped chord of Ti-6Al-4V alloy are developed respectively. It is shown that the component along the vertical direction $G_{Y_{max}}$ of the maximum temperature gradients in the melting pool is much bigger than its component along the scanning direction $G_{X_{max}}$. Both $G_{Y_{max}}$ and $G_{X_{max}}$ decrease in first few layers and then become almost constant with the increase of cladding height. Finally $G_{Y_{max}}$ is about three times as great as $G_{X_{max}}$. The instantaneous maximum temperature gradient $G_{T_{max}}$ for short raster pattern always presents a fluctuation with a small amplitude range and which is smaller than those for other patterns as a whole. The increasing velocity of stress for long raster pattern is somewhat larger than that for contour offsetting, the increasing velocity of stress for short raster pattern is the smallest. When the deposition of the T-shape chords are finished, there exists a residual stress concentration at the back of conjunction of horizontal and vertical parts of the T-shape chord for contour offsetting pattern, at the two ends of the chord for long raster pattern. And the residual stress distribution in T-shape chord formed by short raster pattern is uniform. The residual stresses in different directions on the substrate for these three scanning patterns show the same distribution regularity, but the residual stress of short raster is smaller than others.

Key words laser technique; laser solid forming; thermal/stress field; scanning pattern; T-shaped chord

OCIS codes 140.3390; 140.6810; 140.3590

收稿日期: 2014-01-22; 收到修改稿日期: 2014-02-26

基金项目: 国家自然科学基金 (513230003, 51005181, 51105311)、国家 973 计划 (2011CB610402)、国家 863 计划 (2013AA031103)、高等学校学科创新引智计划 (08040)

作者简介: 姜亚琼 (1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事激光立体成形及修复仿真模拟等方面的研究。

E-mail: jyq90s@sina.cn

导师简介: 林鑫 (1973—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光立体成形及修复再制造等方面的研究。

E-mail: xlin@nwpu.edu.cn (通信联系人)

1 引 言

激光立体成形技术(LSF)以“离散+堆积”的成形思想为基础,能够实现高性能复杂结构零件的无模具、快速、全致密近净成形^[1],给航空航天高性能大型钛合金结构件的成形提供了一个快速、低成本的柔性制造途径,具有广阔的应用前景。

激光立体成形件的组织性能及成形精度与其加工过程中热作用密切相关,要实现激光立体成形飞机构件组织和性能的精确控制,准确把握其成形过程中热/应力场演化至关重要。针对激光立体成形过程中温度及应力场的演化,国内外学者广泛采用有限元方法来进行研究^[2-9]。不少关于二维温度场^[2]、直薄壁件^[3-4]和复杂构件^[5]三维瞬态温度、应力场的研究取得了较为满意的结果。这些结果显示,激光立体成形的热作用过程与成形工艺密切相关。成形过程中,除了常规的工艺控制,沉积路径决定了粉末质量输入和热输入过程,往往也是成形过程中的一个重要控制因素。但是,目前关于沉积路径的研究^[7-9]多是在基板上简单沉积单层或数层熔覆沉积层,而沉积路径对具体结构件成形过程中的热/应力场演变影响的研究则很少涉及。本文通过借鉴上述数学模型和研究方法,基于数值模拟中的“单元生死”思想^[4-5],采用焓值法统一考虑熔化凝固传热^[3,6],针对航空中常见的钛合金 T 型缘条结构件,通过对比分析不同沉积路径下缘条的温度及应力场演变规律,揭示了沉积路径对激光立体成形 T 型缘条热/应力场的影响,以期为钛合金复杂构件的激光立体成形及工艺优化提供理论支持。

2 T 型缘条热/应力场数学模型与物理模型

2.1 基本假设

激光立体成形过程中,激光-粉末-基材(熔覆沉积层)的相互作用非常复杂,为了简化计算,同时考虑到激光熔覆沉积是一个快速的熔化/凝固过程,且熔池的尺寸相对于整个成形件一般很小,特别是当进入准稳态后熔池大小及温度场基本保持恒定。因此,作如下假设:

- 1) 熔覆沉积层为各向同性,不考虑材料的气化作用和熔池内液态流动对温度场的影响;
- 2) 激光立体成形熔覆沉积区移动速度与激光扫描速度相等;
- 3) 材料初始应力为零,服从双线性强化准则和

米赛斯(Von Mises)屈服准则。

2.2 数学模型

2.2.1 热 源

激光立体成形过程中,连续扫描的激光束可以被看作成一个移动的高斯分布热源,激光束的能量分布可表示为

$$q(r) = \frac{2AP}{\pi r_0^2} \cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{r_0^2}\right), \quad (1)$$

作用于材料表面的激光束斑直径范围内的平均热流密度为

$$q(r)_m = \frac{1}{\pi r_0^2} \int_0^{r_0} q(r) \cdot 2\pi r dr = \frac{0.865AP}{\pi r_0^2}, \quad (2)$$

式中 P 为激光功率; r_0 为热源有效作用半径; A 为材料对激光的吸收系数, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 表示观察点到激光束中心的距离。

2.2.2 温度场

熔池及熔覆沉积层的热传输方程满足热传导控制方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \nabla \cdot (\rho c_p VT) - \nabla \cdot (K \nabla T) = Q, \quad (3)$$

式中 c_p 为比热容, T 为温度, K 为热导率, V 为工件移动速度, Q 为单位体积热生成率。

基材的初始温度为环境温度:

$$T|_{t=0} = T_0 = 300 \text{ K}, \quad (4)$$

表面边界采用自然换热边界条件:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = h_f (T - T_0)_{\Gamma} + \epsilon \sigma (T^4 - T_0^4)_{\Gamma}. \quad (5)$$

式中 Γ 表示物体边界, h_f 为表面换热系数, ϵ 为材料辐射率, σ 为波耳兹曼常数。

2.2.3 应力应变场

激光立体成形过程中熔覆沉积层的应力应变演化满足非线性热弹塑性的应力应变关系。在成形区域中力平衡方程为

$$\sigma_{ij} = 0, \quad (6)$$

式中 σ_{ij} 为应力分量,已包括热应力项。热应变可按如下式描述:

$$\epsilon_{ij}^T = \alpha_{ij} (T - T_0) \delta_{ij}, \quad (7)$$

式中 ϵ_{ij}^T 为热应变张量, α_{ij} 为热膨胀系数, T_0 为参考温度, δ_{ij} 为 δ 算子。

应力应变间的本构方程为

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl} (d\epsilon_{kl} - d\epsilon_{kl}^p - d\epsilon_{kl}^e - d\epsilon_{kl}^T), \quad (8)$$

式中 D_{ijkl} 为弹性本构张量系数, $d\epsilon_{kl}$, $d\epsilon_{kl}^p$, $d\epsilon_{kl}^e$, $d\epsilon_{kl}^T$ 分别为总应变、塑性应变、蠕变应变和热应变。

2.3 物理模型

2.3.1 几何模型和网格划分

所模拟的钛合金 T 型缘条是基于我国正在研制的 C919 客机翼肋缘条简化处理而成,其有限元网格模型如图 1 所示。定义缘条的长、短边分别为横向缘条和纵向缘条。基板尺寸为 $120\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,横向缘条长 72 mm ,纵向缘条长 21 mm ,厚度均为 6 mm ,高度 50 mm ,上下分别针对竖直平面弯曲 10° ,如图 2 所示。以 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的熔池大小为基本单元划分成形区域网格,基板上靠近熔覆层的单元仍采用同尺寸的网格,远离熔覆层的单元尺寸逐渐增大,这样既有效减少了单元数目又能保证计算精度。

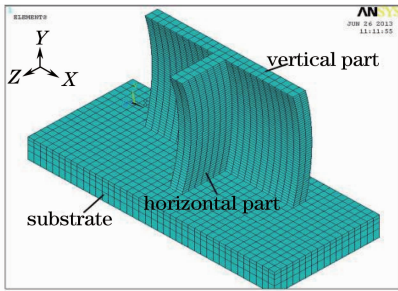


图 1 激光立体成形 T 型缘条的有限元网格模型

Fig. 1 Finite element mesh model of LSFed T-shape chord

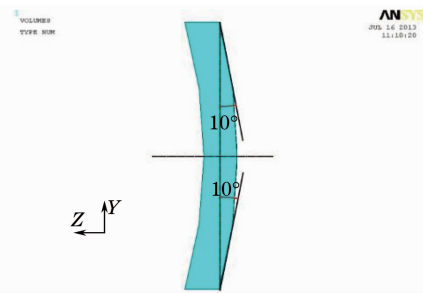


图 2 激光立体成形 T 型缘条的倾斜度示意图

Fig. 2 Inclination schematic of LSFed T-shape chord

2.3.2 工艺参数和基板约束方式

仿真研究计算条件为激光功率 2000 W ,光斑直

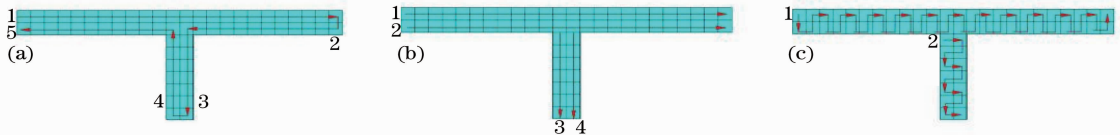


图 4 激光立体成形的沉积路径。(a) 轮廓偏置；(b) 长光栅；(c) 短光栅

Fig. 4 Scanning patterns during LSF. (a) Contour offsetting; (b) long raster; (c) short raster

3 计算结果与讨论

3.1 模型验证

图 5 给出了采用的热源模型和基于同样工艺参

径 3 mm ,扫描速度 180 mm/min ,熔覆层厚度 1 mm ,送粉率为 $9\sim 12\text{ g/min}$ 。在计算应力场时,基板采用“十字”约束,即沿 T 型缘条底面中心线位置,将基板上垂直于 Z 轴的面(如图 3 中的虚线 A 所示)施加 Z 方向的约束 ($U_z = 0$),垂直于 X 轴的对称面(如图 3 中的虚线 B 所示)施加 X 方向的约束 ($U_x = 0$),两个面在基板下表面的交点处采取自由度完全约束(即 $U_x = U_y = U_z = 0$),这样既保证熔覆时基板可以自由变形,又能保证基板不会扭曲或旋转。在下文分析中,选用图 3 所示横向缘条第一层熔覆层中心线上 a、b 两点作为熔覆层上的参照点,其中 b 点对应横向缘条端部位置,a 点偏离横向缘条端部 18 mm 。

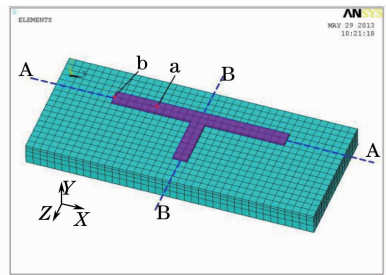


图 3 熔覆层和基板上特殊点和线

Fig. 3 Special points and lines on cladding layers and substrate

2.3.3 沉积路径

通常激光立体成形在结构体内外采用的是多种沉积路径组合,不过为了理清每一种沉积路径的影响,根据激光立体成形常用的沉积路径,选用轮廓偏置、长光栅和短光栅三种沉积路径进行对比研究,以期明晰其独立的影响机制,为后续的沉积路径优化奠定基础。

成形过程中,每层采用相同的沉积路径(如图 4 所示)由下至上沉积缘条,使用“单元生死”技术以激光扫描速度按时间和路径不断激活单元,仿真激光动态熔覆过程。

数(激光功率 $P=2000\text{ W}$,光斑直径 $D=3\text{ mm}$,扫描速度 $V=180\text{ mm/min}$,送粉率为 $9\sim 12\text{ g/min}$)实验得到的 TC4 宏观熔覆沉积层形貌。模拟结果中,顶

部熔覆沉积层形貌因为做了简化处理与实验结果不太符合,所计算的熔池深度 h_1 和宽度 w_1 分别为

0.941 mm和 3.742 mm,与实验测量的熔池深度 h_2 (0.9 mm)和宽度 w_2 (3.5 mm)符合良好。

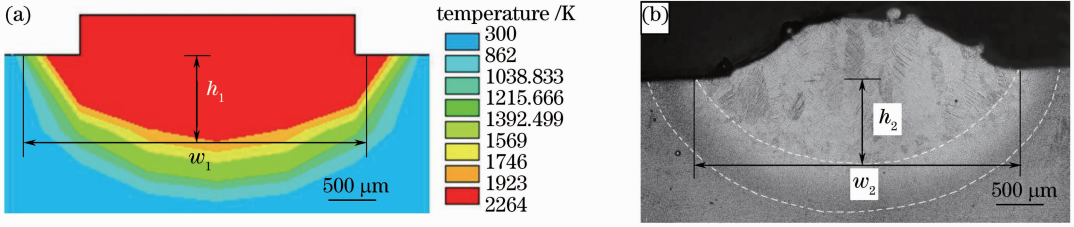


图 5 典型熔池形貌。(a) 模拟结果；(b) 实验结果

Fig. 5 Typical melted zone morphology. (a) Numerical result; (b) experimental result

3.2 成形过程温度场演变

图 6 给出了分别采用轮廓偏置、长光栅和短光栅沉积路径进行 T 型缘条激光熔覆沉积的温度场

演化过程。同一时刻不同沉积路径的缘条温度场不同,导致缘条整体热输入不同。相比轮廓偏置和长光栅路径,短光栅路径热源比较集中。随熔覆沉积

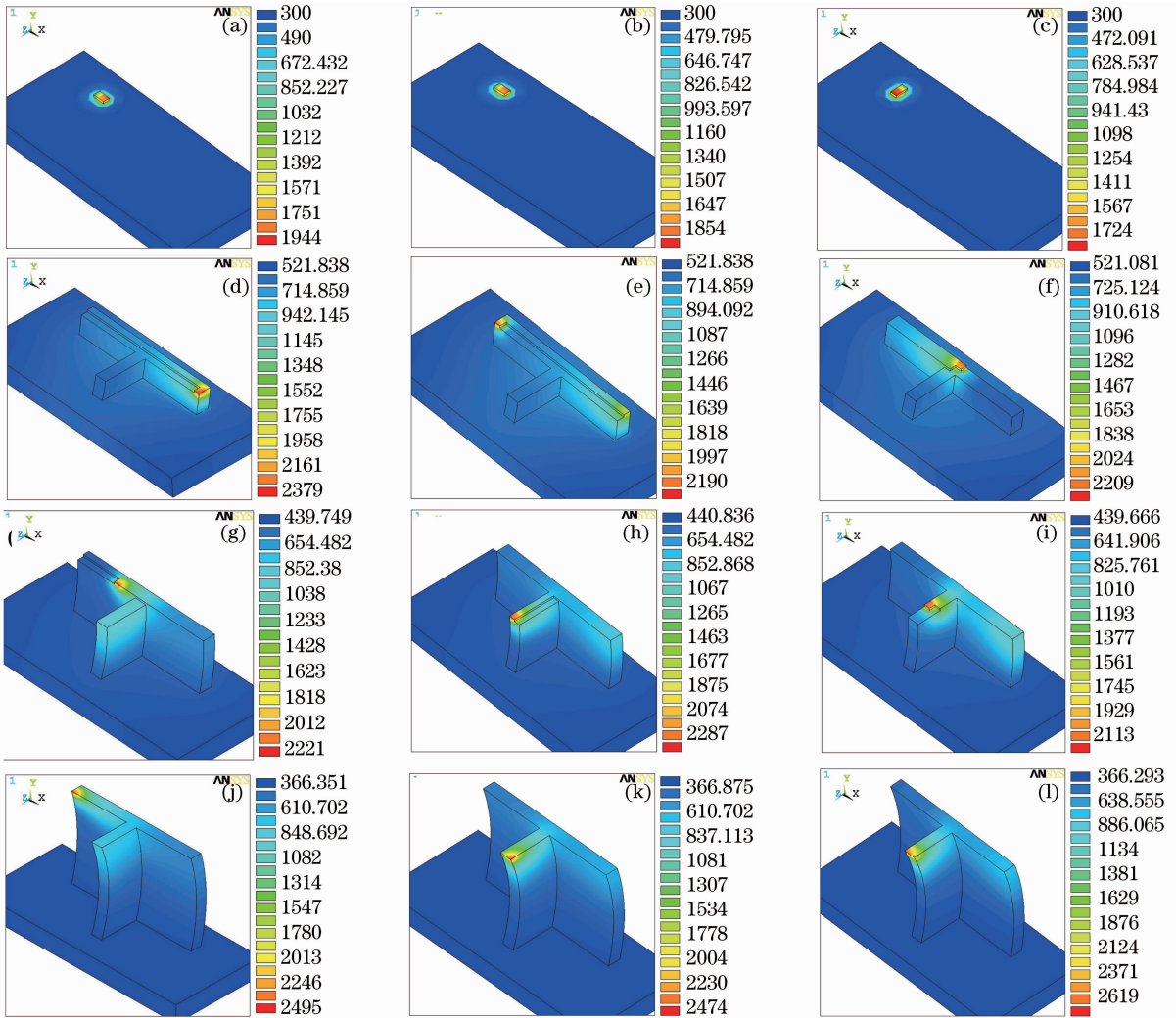


图 6 T 型缘条激光立体成形温度场演变(单位:K)。(a),(d),(g),(j)分别为轮廓偏置沉积路径在 2、583、1543、3100 s 时温度分布；(b),(e),(h),(k)分别为长光栅路径相应时刻的温度分布；(c),(f),(i),(l)分别为短光栅路径相应时刻的温度分布

Fig. 6 Temperature fields evolution during LSF of the T-shaped chord (unit: K). (a), (d), (g), (j) Temperature distributions by the contour offsetting scanning patterns at 2, 583, 1543, 3100 s; (b), (e), (h), (k) temperature distributions by the long raster scanning patterns at the corresponding time; (c), (f), (i), (l) temperature distributions by the short raster scanning patterns at the corresponding time

高度的增加:熔池高温区域不断扩大且向上移动,缘条温度场沿高度方向呈垂直向上的梯度分布;基板温度先升高,而后缓慢下降,说明最初几层,热量向基板传热速度大于基板向周围传热速度,而随着熔覆高度的增加,熔池向基板的传递的热量越来越少,加上基板与周围环境的散热,使得基板温度呈现下降趋势。

3.3 缘条件成形过程温度及温度梯度分布

3.3.1 沿成形高度方向上的温度梯度变化

图 7 为采用三种路径熔覆沉积缘条时,不同高度熔覆沉积层中对应图 3 中 a 点位置的熔池区域最大温度梯度沿竖直方向分量($G_{Y_{max}}$)和沿扫描方向分量($G_{X_{max}}$)的变化情况。轮廓偏置、长、短光栅沉积路径下,熔覆沉积第一层时 $G_{Y_{max}}$ 分别为 $5.775 \times$

10^5 、 5.990×10^5 、 5.733×10^5 K/m, $G_{X_{max}}$ 分别为 1.599×10^5 、 1.640×10^5 、 1.845×10^5 K/m, $G_{Y_{max}}$ 比 $G_{X_{max}}$ 大得多,也就是说基板冷却作用非常显著。三种沉积方式下的熔池温度梯度随成形高度增加有相同的变化趋势:熔覆沉积最初几层, $G_{Y_{max}}$ 大幅度减小,表明热量的迅速累积使基板冷却作用减弱,使竖直向下的传热作用减小,熔池散热条件变差。第 8 层以后 $G_{Y_{max}}$ 和 $G_{X_{max}}$ 逐渐趋于稳定,轮廓偏置、长、短光栅沉积路径 $G_{Y_{max}}$ 分别为 3.91×10^5 、 4.17×10^5 、 3.69×10^5 K/m,同时 $G_{X_{max}}$ 分别降为 1.41×10^5 、 1.48×10^5 、 1.46×10^5 K/m。最终稳定的 $G_{Y_{max}}$ 约是 $G_{X_{max}}$ 的三倍,说明缘条整体散热方向还是从上至下。

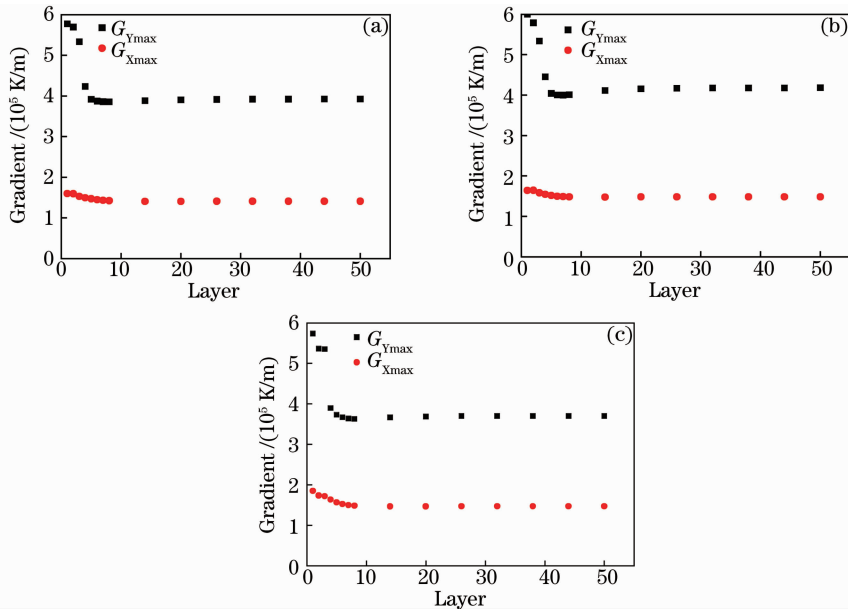


图 7 熔池区域最大温度梯度沿竖直方向和扫描方向分量随成形高度的变化。(a) 轮廓偏置;(b) 长光栅;(c) 短光栅

Fig. 7 Components along the vertical direction and scanning direction of the maximum temperature gradients in the melting pool at different heights. (a) Contour offsetting; (b) long raster; (c) short raster

3.3.2 不同成形高度上瞬时最大温度梯度变化

激光立体成形过程中,即使在熔覆沉积同一层,熔池的瞬时最大温度梯度 $G_{T_{max}}$ 也在不断的发生变化,如图 8 所示。熔覆第 1 层时[图 8(a)],三种沉积路径对应的熔池瞬态最高温度梯度($G_{T_{max}}$)的最大值都出现在横向缘条第一道的起始位置,轮廓偏置、长、短光栅所对应的 $G_{T_{max}}$ 最大值分别为 9.92×10^5 、 1.11×10^6 、 1.12×10^6 K/m,其次是横向缘条的尾部以及纵向缘条的尾部。起始位置处,由于基板强烈的冷却作用,熔池温度梯度较高,随后激光的扫描和加热使熔池周围基板温度升高,熔池温度梯度迅速降低。短光栅沉积路径对应的熔池瞬时最大温

度梯度呈现小幅度的振荡变化,这是由于短光栅热源在短轴方向上进行快速往复扫描时,热源比较集中,熔池附近温度升高,已熔覆区域的热量能有效降低下一位置的温度梯度,这使得短光栅 $G_{T_{max}}$ 整体小于轮廓偏置和长光栅。轮廓偏置及长光栅路径除了在激光束移动到端部位置或方向变化时 $G_{T_{max}}$ 出现较大的波动,其余位置相对较平稳。且两种路径都在横向缘条第 1 道熔覆完之后,熔覆层附近基板的温度迅速升高,导致后续熔覆沉积的熔池瞬态最高温度梯度 $G_{T_{max}}$ 整体降低。随着熔覆沉积层的增多[图 8(b)~(d)],基板冷却作用显著减弱,热累积效应明显增强,已沉积层的温度场分布对后续熔覆

沉积层熔池温度梯度影响显著, $G_{T_{max}}$ 明显降低。对于长光栅和短光栅路径沉积, 前一熔覆沉积层的结束点在纵向缘条尾部, 使得纵向缘条尾部温度最高, 而由于熔覆沉积的起始点与前一熔覆沉积层的结束点并不重叠, 因此起始点熔池附近的温度最低, 熔池的温度梯度较大。短光栅 $G_{T_{max}}$ 仍然呈振荡变化, 长光栅的 $G_{T_{max}}$ 曲线依旧是激光束在端部位置或扫描方向发生变化时出现大的波动, 其余位置比较平稳。而对于轮廓偏置路径沉积, $G_{T_{max}}$ 曲线与第 1 层有明显

不同: 由于其每一熔覆沉积层的起始点也是前一熔覆沉积层的结束点, 所以起始点熔池的温度梯度较小。当熔池远离横向缘条头部(起始位置)后, 由于熔池底部已熔覆沉积层的温度有所降低, 所以 $G_{T_{max}}$ 呈现上升趋势。当到达横向缘条尾部时, 由于激光束在尾部转折掉头有一定的停留时间, 导致热量会在此处发生一定的累积, 进而使得该处温度梯度明显减小。当激光束回转后远离尾部, $G_{T_{max}}$ 又呈现上升的趋势。熔覆纵向缘条时同样存在相似的规律。

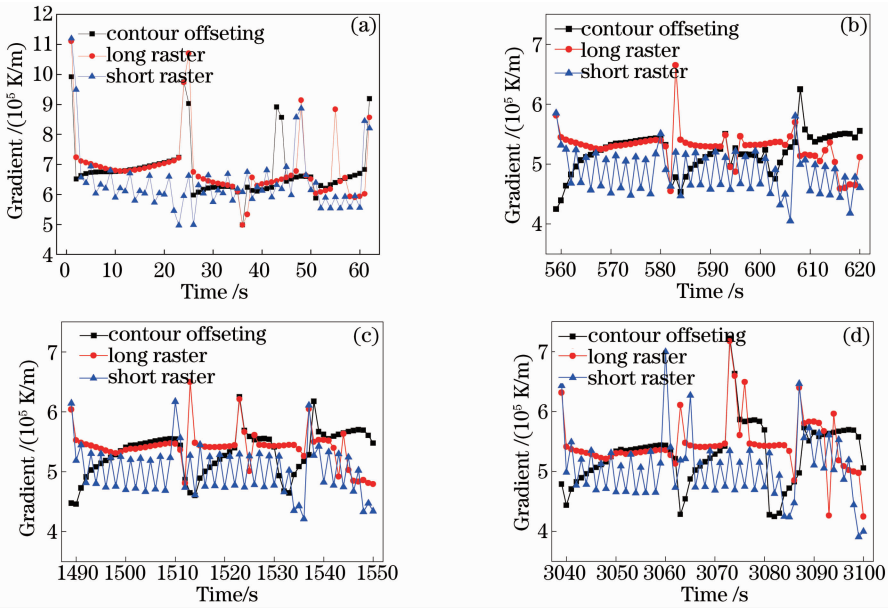


图 8 三种沉积路径下缘条在不同高度进行熔覆沉积时瞬时最大温度梯度($G_{T_{max}}$)随时间的变化曲线。

(a) 第 1 层; (b) 第 10 层; (c) 第 25 层; (d) 第 50 层

Fig. 8 Curves of the instantaneous maximum temperature gradient ($G_{T_{max}}$) at different layers by three different scanning patterns. (a) 1st layer; (b) 10th layer; (c) 25th layer; (d) 50th layer

计算三种沉积方式下熔覆沉积缘条第 1、10、25 及 50 层时 $G_{T_{max}}$ 的平均值(表 1), 可以看到, 短光栅最小, 轮廓偏置的略小于长光栅, 随熔覆层数的增

加, $G_{T_{max}}$ 迅速下降后趋于恒定, 这与图 7 中 $G_{X_{max}}$ 和 $G_{Y_{max}}$ 变化趋势一致。

表 1 三种沉积路径不同熔覆层瞬时最大温度梯度($G_{T_{max}}$)的平均值(单位: K/m)

Table 1 Average value of the instantaneous maximum temperature gradient ($G_{T_{max}}$) at different layers by three different scanning patterns (unit: K/m)

Scanning patterns	1st layer	10th layer	25th layer	50th layer
Contour offsetting	677459	519324	531701	528694
Long raster	684770	527404	540700	544930
Short raster	640553	485939	501730	506711

3.4 激光立体成形热循环及应力循环

T 型缘条的激光立体成形过程中, 随着熔覆沉积的往复进行, 熔覆沉积层将经历多次热循环。下面以图 3 所示的 b 点为例进行分析: 当热源移动到 b 点时, 该点温度迅速升高, 三种沉积方式的温度 [图 9(a) 和 (b)] 和温度梯度 [图 9(c) 和 (d)] 分别达

到最大。此时该点处于熔化状态, 即零应力状态。随后该点温度迅速下降, 即进入冷却阶段, 熔覆单元冷却收缩受到周围单元约束, 应力值逐渐增大 [图 9 (e) 和 (f)]。且当热源移动到该点相邻区域或上方时, 由于热传导作用, 该点会再次经历迅速升温 and 降温的过程, 同时热应力也是呈现先下降后上升的周

期性变化。

在 T 型缘条的热循环过程中,轮廓偏置沉积所对应的温度梯度总是略大于短光栅[图 9(d)]。采用长光栅路径时,由于每层经过该点后熔覆相邻道时仍会经过该点,所以热循环及温度梯度循环次数都是短光栅和轮廓偏置沉积的两倍,同时,长光栅热应力的增长速率略高于轮廓偏置[图 9(e)和(f)],短光栅应力增长速率最小。随着时间的推移,热源远

离该点,热循环曲线震荡幅度不断减小,波峰不断降低,温度波谷呈现平缓上升、短暂平稳然后缓慢下降的过程[图 9(a)];温度梯度循环曲线振幅不断减小,波峰迅速下降[图 9(c)],温度梯度趋于恒定的极小值;热应力循环曲线的波峰和波谷都不断上升,且三种路径下热应力增长速率都逐渐减小,热应力最终分别趋于恒定值[图 9(e)],轮廓偏置路径、长光栅和短光栅的应力分别为 680、710、580 MPa。

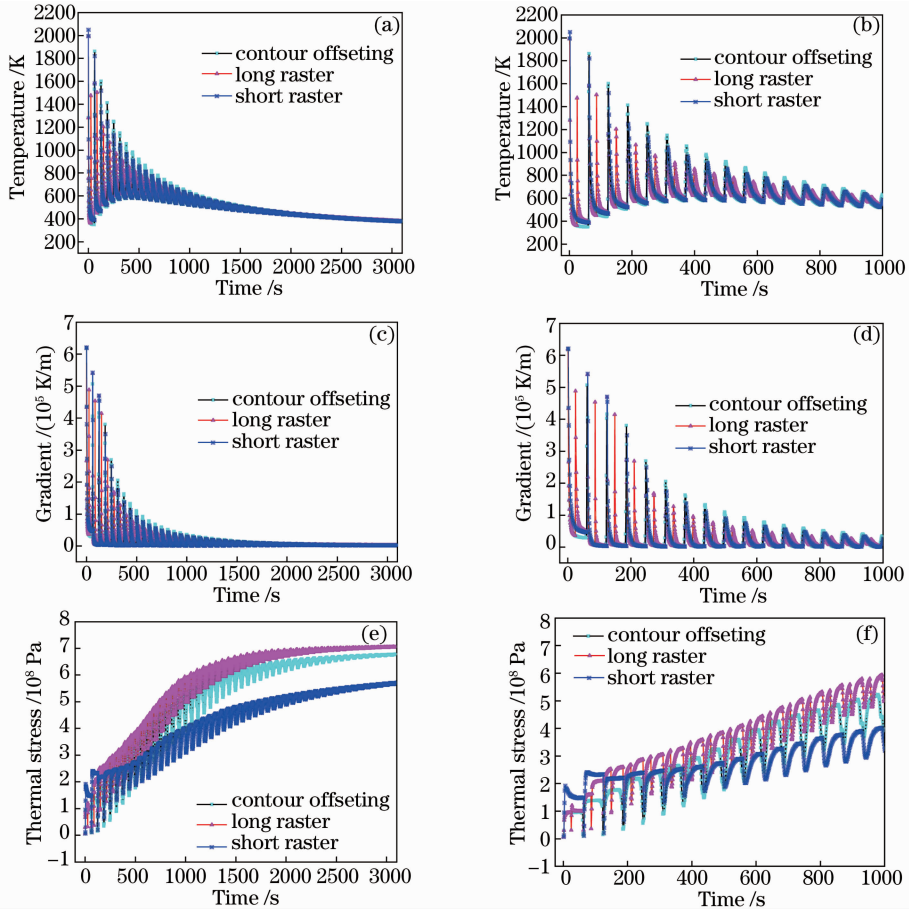


图 9 三种沉积路径下 b 点:(a) (c) (e) 分别为热循环曲线、温度梯度循环曲线、应力循环曲线;
(b) (d) (f) 分别为 0~1000 s 热循环曲线、温度梯度循环曲线、热应力循环曲线放大图

Fig. 9 (a) Thermal cycle curve, (c) temperature gradient cycle curve, (e) stress cycle curve of b point by three scanning patterns; magnification of (b) thermal cycle curve, (d) temperature gradient cycle curve, (f) stress cycle curve of b point in 0~1000 s

3.5 成形结束时等效应力场分布

沉积结束后,三种方式沉积的 T 型缘条的最大残余应力都分布在横向缘条两端靠近根部位置,且由外向内应力迅速减小;基板上应力值较小,主要集中在缘条轮廓周围。采用轮廓偏置沉积路径[图 10(a)],缘条端部应力从下到上呈 V 字型分布,最大等效应力达 779 MPa,位于横向缘条背面端部与基板连接处。横、纵缘条连接处的背面底部也存在明显的应力集中。除去端部和背部应力集中位置,缘

条整体所受应力水平较低。长光栅沉积的缘条端部则存在更大范围的应力集中[图 10(b)],且最大等效应力高达 818 MPa,除去端部,其余部位应力值均在 350 MPa 以下,横、纵缘条连接处的背面最大应力约为 450 MPa。相比前两种沉积路径,采用短光栅沉积的缘条整体应力分布最均匀[图 10(c)],只有缘条端部与基底连接的根部出现应力集中但范围非常小,最大等效应力为 776 MPa,背面应力也更均匀,应力水平维持在 250 MP 左右。

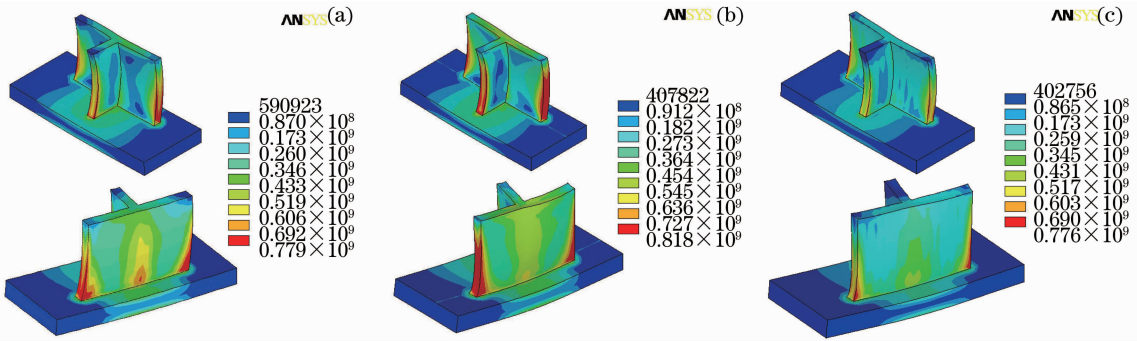


图 10 三种沉积路径 T 型缘条熔覆结束时等效残余应力分布。(a) 轮廓偏置;(b) 长光栅;(c) 短光栅

Fig. 10 Equivlent residual stress distributions of the T-shaped LSF chord while cladding finished by three different scanning patterns. (a) Contour offsetting; (b) long raster; (c) short raster

3.6 基板应力分析

图 11 显示了 T 型缘条熔覆结束时,基板表面三个方向的残余应力分布图。其中,沿 X 方向的压

应力主要分布在对应横向缘条中位置的两侧,最大拉应力在对应纵向缘条的两端及基板下表面。沿 Z 方向的最大拉应力在对应纵向缘条的尾部,压应

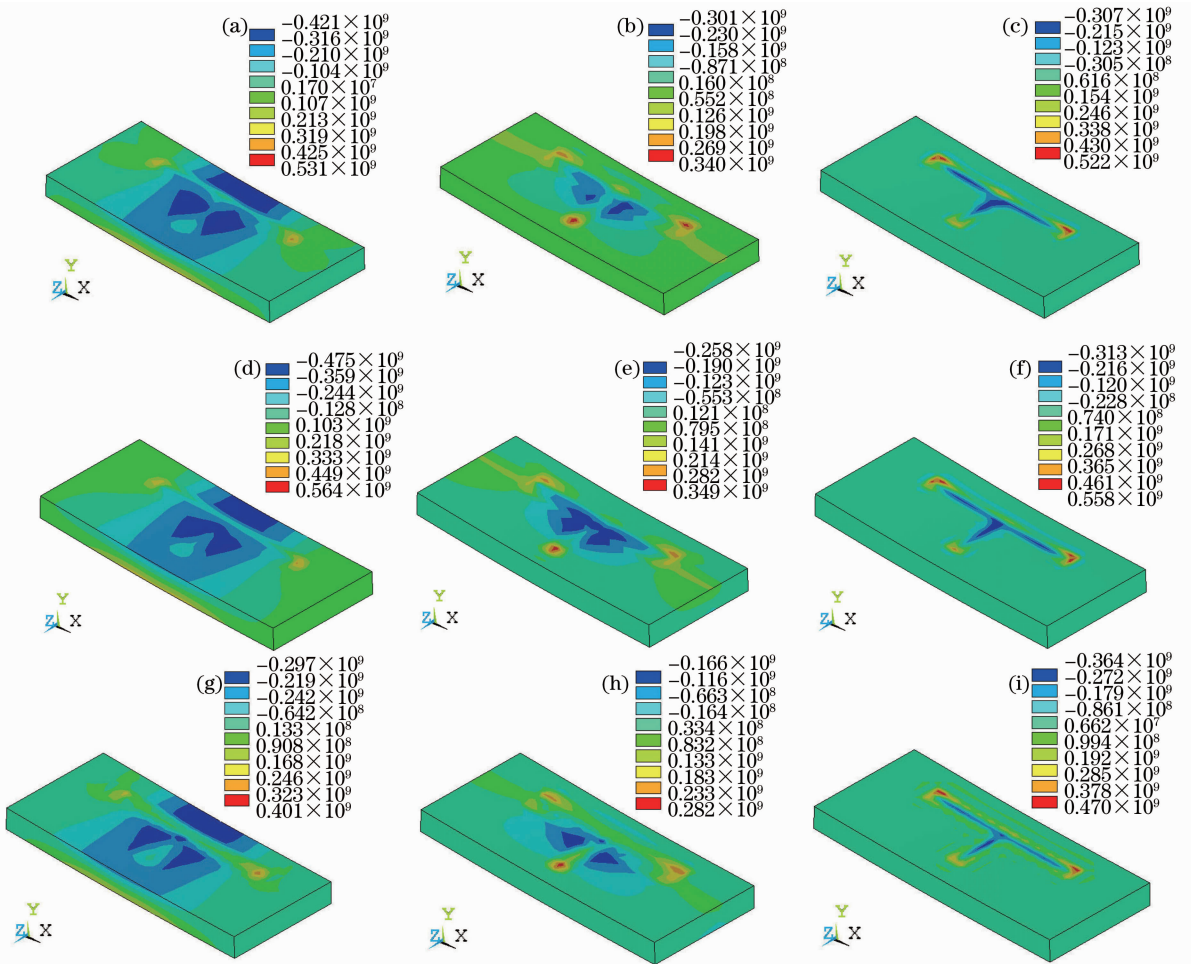


图 11 基板表面三个方向的残余应力分布图(单位:Pa)。(a),(b),(c)分别为轮廓偏置扫描方式下 X、Z、Y 方向应力分布;(d),(e),(f)分别为长光栅相应方向的应力分布;(g),(h),(i)分别为短光栅相应方向应力分布

Fig. 11 Residual stress distributions of three different directions on the substrate surface (unit: Pa). (a) (b) (c) Stress fields of X direction, Z direction, Y direction by contour offsetting scanning pattern; (d) (e) (f) stress fields of the corresponding directions by long raster scanning pattern; (g) (h) (i) stress field of the corresponding directions by short raster scanning pattern

力起源于横向与纵向缘条的连接处,主要分布在横向缘条对应位置的两侧。沿 Y 方向除对应缘条端部位置存在较大的拉应力外,其余部位均为压应力,并集中于缘条下部呈 T 型分布,最大压应力在缘条中心线对应位置附近,约为 276 MPa。在成形过程中,由于基板采用“十字”约束方式进行,基板两端主要发生了弹性变形,因此沉积结束后,应力接近于零。三种沉积路径下基板在不同方向上的应力分布规律基本相同,但是采用短光栅沉积时,其基板上应力值要小于长光栅路径,而轮廓偏置沉积路径基板的拉压应力值总是介于二者之间。

4 结 论

1) 激光立体成形 T 型缘条时,轮廓偏置和长、短光栅三种沉积路径熔池区域温度梯度沿竖直方向分量最大值($G_{Y_{max}}$)远大于沿扫描方向分量最大值($G_{X_{max}}$),缘条整体散热方向竖直向下,熔池温度梯度随成形高度的增加有相同的变化趋势:熔覆最初几层,基板冷却作用显著减弱, $G_{Y_{max}}$ 和 $G_{X_{max}}$ 逐步降低,至第 8 层时趋于恒定,不过沉积过程中,最终稳定的 $G_{Y_{max}}$ 约是 $G_{X_{max}}$ 的三倍。

2) 激光立体成形 T 型缘条时,随熔覆层数的增加,三种沉积路径下的瞬时最大温度梯度($G_{T_{max}}$)先下降后趋于恒定。短光栅沉积路径的 $G_{T_{max}}$ 呈小幅度的振荡变化,且整体小于环形和长光栅。同一熔覆高度上短光栅 $G_{T_{max}}$ 平均值最小,轮廓偏置沉积路径的 $G_{T_{max}}$ 略小于长光栅。

3) 随高度的增加,应力循环曲线波峰和波谷都不断上升,震荡幅值不断减小。长光栅路径应力增长速率和最终应力值都略大于轮廓偏置路径,短光栅路径应力增长速率及最终应力都最小。

4) 激光立体成形结束后,T 型缘条上最大残余应力都分布在横向缘条边缘靠近根部位置,基板上应力集中在缘条轮廓周围。对于轮廓偏置沉积路径,在横、纵缘条连接处的背面出现应力集中;长光栅沉积的缘条端部存在大范围的应力集中,且最大等效应力最高;短光栅缘条整体应力分布最均匀,只有缘条端部与基底连接的根部出现应力集中但范围非常小。

5) 沉积结束后,三种沉积路径基板上在三个方向上的残余应力分布规律基本相同,但是采用短光栅路径时,其基板上应力值要小于长光栅路径,而轮廓偏置沉积路径基板的拉压应力值总是介于二者之间。

参 考 文 献

- Huang Weidong, Lin Xin, Chen Jing. Laser Solid Forming[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007. 1-15.
黄卫东,林鑫,陈静.激光立体成形[M].西安:西北工业大学出版社,2007.1-15.
- Hoadley A F A, Rappaz M A. Thermal model of laser cladding by powder injection[J]. Metallurgical Transactions B, 1992, 23(5): 631-642.
- Shi Shihong, Wang Chen, Xu Aiqin, *et al.*. Temperature field numerical simulation of laser cladding based on internal powder feeding through a hollow laser beam[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0303002.
石世宏,王晨,徐爱琴,等.基于环形光管内送粉激光熔覆温度场的数值模拟[J].中国激光,2012,39(3):0303002.
- Wang Kai, Yang Haiou, Liu Fencheng, *et al.*. Stress and deformation finite element method simulation of thin wall part with pre-deformation substrate during laser solid forming[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0603002.
王凯,杨海鸥,刘奋成,等.基板预变形下激光立体成形直薄壁件应力和变形的有限元模拟[J].中国激光,2012,39(6):0603002.
- Shi Likai, Gao Shiyong, Xi Mingzhe. Finite element simulation for laser direct depositing processes of metallic vertical thin wall parts II. The simulation for thermal stress field during deposition processes[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(5): 454-458.
石力开,高士友,席明哲.金属直薄壁件激光直接沉积过程的有限元模拟 II. 沉积过程中热应力场的模拟[J].金属学报,2006,42(5):454-458.
- Jia Wenpeng, Lin Xin, Chen Jing. Temperature/Stress field numerical simulation of hollow blade produced by laser rapid forming[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(9): 1308-1312.
贾文鹏,林鑫,陈静.空心叶片激光快速成形过程的温度应力场数值模拟[J].中国激光,2007,34(9):1308-1312.
- Ma Liang, Hong ZanBin. Temperature and stress analysis and simulation in fractal scanning-based laser sintering[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2007, 34(9-10): 898-903.
- Long Risheng, Liu Weijun, Xing Fei. Effects of scanning methods on temperature during laser directly metal shaping[J]. J Optoelectronics • Laser, 2008, 19(4): 528-531.
龙日升,刘伟军,邢飞.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.
- Doan Tatkhua, Li Dichen, Lu Bingheng, *et al.*. Effect of scanning methods on the cracking of the DZ125L superalloy in laser direct metal forming[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1003002.
Doan Tatkhua,李涤尘,卢秉恒,等.扫描方式对激光金属直接成形 DZ125L 高温合金薄壁件开裂的影响[J].中国激光,2012,39(10):1003002.

栏目编辑:韩峰