

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.04.017

钛合金激光熔丝增材制造的温度场与应力场模拟

任朝晖, 刘 振, 周世华, 段景曦
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 激光熔丝增材成形过程中复杂热循环和残余应力分布会使沉积层产生较大的变形甚至开裂. 利用 ABAQUS 软件建立其完全热力耦合有限元模型, 采用移动热源子程序模拟激光加载, 生死单元技术模拟材料的添加. 综合考虑了材料的熔化潜热、对流/辐射换热边界条件、随温度变化的材料非线性等问题, 研究 Ti-6Al-4V 钛合金单道多层薄壁件沉积过程中的热循环特性和残余应力分布. 结果表明: 沉积成形经历了快速加热、快速冷却的过程, 随着层数的增加, 热累积效应增强; 沉积层整体呈拉应力状态, 易产生裂纹等缺陷.

关 键 词: 激光熔丝增材; 温度场; 残余应力; Ti-6Al-4V 钛合金; 完全热力耦合

中图分类号: TG 457.19 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2020)04-0551-06

Temperature Field and Stress Field Simulation of Titanium Alloy Laser Fuse Additive Manufacturing

REN Zhao-hui, LIU Zhen, ZHOU Shi-hua, DUAN Jing-xi
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: REN Zhao-hui, professor, E-mail: zhhren_neu@126.com)

Abstract: Complex thermal cycling and residual stress distribution during the laser fuse additive forming can cause large deformation or even cracking of the deposited layer. ABAQUS software was used to establish a fully thermo-mechanical coupled finite element model. The mobile heat source subroutine was used to simulate laser loading, and the life-and-death unit technology was used to simulate the addition of materials. The thermal cycle characteristics and residual stress distribution of Ti-6Al-4V titanium alloy's single-channel multi-layer thin-walled parts during the deposition were studied by considering the latent heat of fusion, convective/radiation heat transfer boundary conditions and material nonlinearity with temperature. The results showed that the deposition process has experienced the rapid heating and rapid cooling. With the increase of the number of layers, the thermal accumulation effect is enhanced. The sedimentary layer is in the tensile stress state and is prone to cracks and other defects.

Key words: laser fuse additive; temperature field; residual stress; Ti-6Al-4V titanium alloy; fully thermal-mechanical coupling

在激光熔丝增材制造领域,钛合金因具有比强度高、耐腐蚀性强等特点,在航空航天、深海船舶等领域被广泛应用.在激光熔丝沉积过程中经历了高能激光束的长期周期性剧烈加热和冷却,在零件内部产生了极其复杂的热应力和组织应力^[1],容易产生变形和残余应力问题,并且影响后续加工作业,使得增材制造(AM)零件常常达不到设定的要求,是制约其发展的重要因素^[2-3].

数值模拟是解决这类问题的有力工具,可以测试不同沉积模式对温度场和残余应力场的影响,优化工艺流程,国内外很多学者广泛采用有限元法来进行研究^[4-6].

Zhao 等^[7-8]利用三维瞬态传热数值模拟方法,研究了单道多层焊接快速成形过程中的热应力演化、残余应力分布及沉积方向对残余应力和残余应变的影响.戴德平等^[9]以 ABAQUS 软件

收稿日期: 2019-05-18
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB1103700); 国家自然科学基金资助项目(51475084).
作者简介: 任朝晖(1968-),男,辽宁沈阳人,东北大学教授,博士生导师.

为平台,开发了用于模拟激光熔覆过程的温度场和应力场的非线性有限元计算方法,对激光熔覆的温度场特征和焊接应力的演化过程进行了探究. Ali 等^[10]研究了扫描策略对选择性激光熔覆 Ti-6Al-4V 钛合金残余应力和力学性能的影响. 逯世杰等^[11]比较了不同有限元软件对 Q390 钢厚板 T 型接头焊接残余应力和变形预测的精度与效率. 目前,针对激光熔丝式增材制造的相关研究还较少,在进行数值模拟时大都采用顺序热力耦合方法而没有考虑变形对温度的影响,完全热力耦合分析相对较少.

本文以 Ti-6Al-4V 钛合金丝材为研究对象,以 ABAQUS 软件为平台建立了激光熔丝增材制造过程完全热力耦合有限元模型,对激光熔丝成形过程的温度场和应力场进行模拟. 为钛合金激光熔丝增材制造工艺优化、减少沉积层变形与裂纹提供理论依据和参考.

1 试验材料和方法

本文建立的数值模型数据来自文献[12]中的试验数据. 增材试验在压强为 20 Pa 的真空腔体内进行;激光热源的最大功率为 200 W,光斑直径为 0.8 mm,可通过输入激光功率百分比来调节激光功率的大小;采用 FLIRA655sc 系红外热像仪,图像分辨率为 640 × 480,帧频为 25 Hz,测温区间为 300 ~ 2 000 ℃;试验基板和焊丝均为 Ti-6Al-4V 钛合金,其中焊丝直径为 0.4 mm. 试验前对基板进行预处理.

工艺参数设置为激光功率 180 W,光斑直径 0.8 mm,扫描速度 6 mm/s,送丝速度 6 mm/s,基板预热 100 ℃,层间停留时间 60 s. 激光熔丝增材试验使用的 Ti-6Al-4V 钛合金基板材料尺寸为 150 mm × 80 mm × 10 mm. 在保证沉积层尺寸不变的情况下,适当减小基板尺寸以提高计算效率,减少计算时间,将模型基板尺寸设定为 60 mm × 14 mm × 5 mm. 沉积层长度为 50 mm,单道 11 层沉积层的厚度为 4.93 mm,平均宽度为 0.85 mm. 单道 11 层试样几何形状如图 1 所示.

2 有限元模拟方法

模型中基板和沉积层均采用 8 节点温度-位移耦合 6 面体单元,共有 52 502 个单元,63 160 个节点,有限元模型及网格划分如图 2 所示. 为了保证计算结果精度的前提下提高计算效率,对模

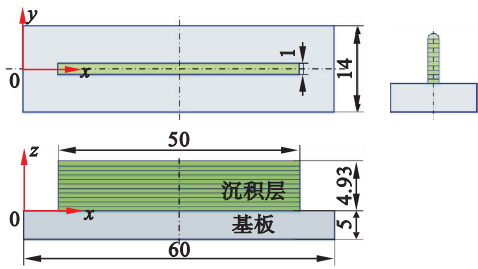


图 1 薄壁件试样的几何尺寸 (mm)
Fig. 1 Geometric dimension of thin-walled specimen

型进行过渡网格划分,沉积层网格划分最致密,其最小单元尺寸为 0.25 mm × 0.25 mm × 0.22 mm,热影响区次之,基板网格比较稀疏. 为了更真实地模拟激光熔丝沉积过程中沉积层的生成,采用生死单元 (MODEL CHANGE/ADD) 技术模拟材料的添加.

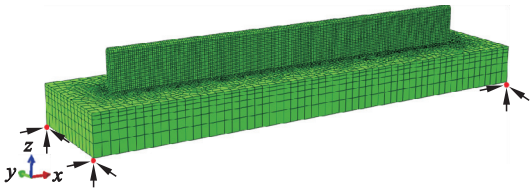


图 2 模型网格划分和约束条件
Fig. 2 Model meshing and constraints

激光沉积过程瞬态温度场控制方程为

$$\left. \begin{aligned} \rho c(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial t} + \rho c(\theta) v \cdot \nabla \theta &= \nabla \cdot k(\theta) \nabla \theta, \\ Q(x, y, z) &= \rho c(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial t}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $c(\theta)$ 为比热容, $J/(kg \cdot K)$; $k(\theta)$ 为热导率, $W/(m \cdot ^\circ C)$; ρ 是材料密度; v 是激光扫描速度; t 是时间; ∇ 是梯度算子; $Q(x, y, z)$ 是内热生成速率^[13].

设定仿真模拟初始温度为 20 ℃,周围环境与基板传热的自然边界条件为

$$-k(\nabla T \cdot \mathbf{n}) = P - h(T - T_0) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4). \quad (2)$$

式中: P 是基板和沉积层吸收的激光总功率; h 是对流换热系数; T 和 T_0 分别是表面温度和环境温度; \mathbf{n} 是外表面法向量; ε 是材料的辐射率,在计算中取值为 0.4; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数 ($5.67 \times 10^{-11} \text{ mW}/(\text{mm}^2 \cdot ^\circ C)$).

为了准确模拟激光穿透效应并捕获成形过程中的瞬态热传输现象,本文使用 Goldak 等^[14]提出的移动高斯热源分布,其中椭球热源的表达式为

$$q(r) = \frac{6\sqrt{3}P\eta}{\pi^{3/2}abc} \exp \left\{ -3 \left[\left(\frac{x}{a} \right)^2 + \left(\frac{y}{b} \right)^2 + \left(\frac{z}{c} \right)^2 \right] \right\}. \quad (3)$$

式中: a, b, c 为体热源的外形参数; P 为激光功

率; η 为能量吸收率,在本文中取值为 0.5. 使用 FORTRAN 语言编写 ABAQUS 用户子程序 DFLUX,实现连续高斯分布热源的加载. 单道多层沉积时的激光热源扫描方向如图 3 所示.

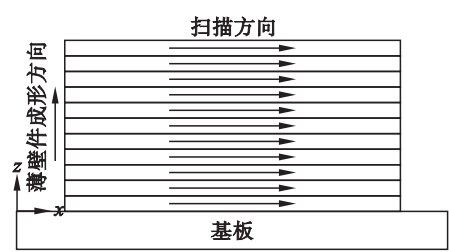


图 3 激光热源扫描方向

Fig. 3 Laser source scanning direction

在本文的仿真模拟计算中,沉积层和基板材料均为 Ti-6Al-4V 钛合金,计算中采用的材料高温热物理性能参数和高温力学性能参数见文献[6]. 材料性能参数随温度的变化如图 4 所示.

根据激光熔丝增材制造实际的物理过程,在建立有限元模型时做出以下假设:

- 1) 材料弹性应力-应变关系服从各向同性 Hooke 定律,塑性行为服从 Von Mises 准则.
- 2) 激光热源定义为体高斯热源,激光与材料的相互作用遵循传统传热学理论.
- 3) 忽略熔池流动及汽化对温度场的影响^[15].
- 4) 忽略基板对工作台和夹具的热传导.

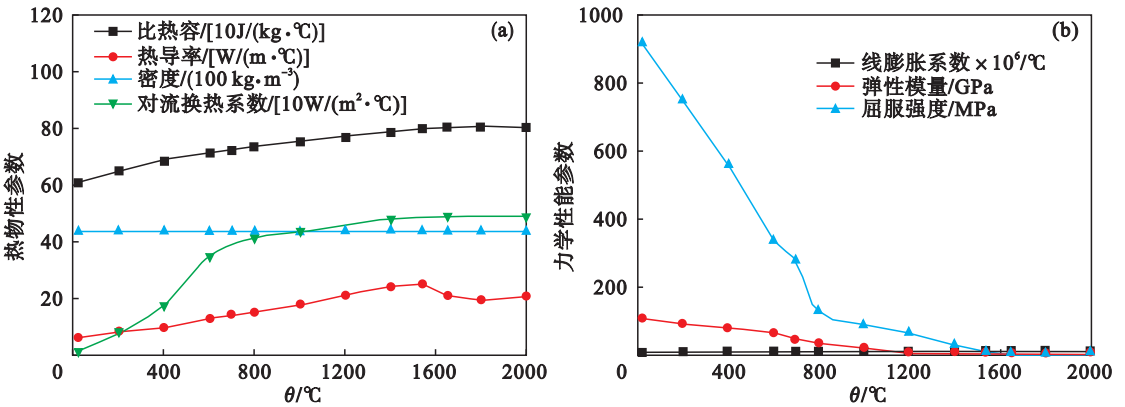


图 4 材料性能参数随温度的变化

Fig. 4 Variation of material performance parameters with temperature

(a)—热物理性能参数; (b)—力学性能参数.

3 结果分析与讨论

3.1 温度场计算结果分析

图 5 为单道 11 层激光熔丝沉积成形的温度

场演化过程. 图中灰色部分表示温度高于熔点(1 668 °C)的熔池区域. 由图可知,在熔池前端和两侧等温线较密集,在熔池后端比较稀疏,并且随着沉积层数量的增加,沉积层的高温区域变得越来越大,表明沉积形成过程中的热量累积是明显的.

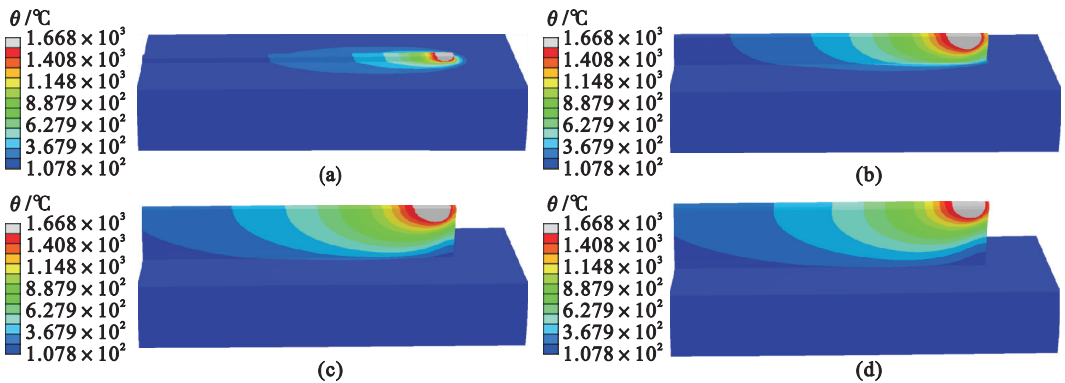


图 5 薄壁件成形过程温度场云图

Fig. 5 Temperature field cloud diagram of the thin-walled part forming process

(a)—第 1 层扫描结束; (b)—第 5 层扫描结束; (c)—第 9 层扫描结束; (d)—第 11 层扫描结束.

图 6 为单道多层试验与模拟所得的温度时间曲线对比图. 由图 6a 可知,模拟数据误差在 17% 以内,且变化趋势一致性良好.

由图 6b 可知,随着沉积层高度的升高,其热循环曲线的峰值温度呈非线性增加,说明在沉积过程中存在着热累积效应. 在第 1 层中点的热循

环过程中,第一个峰值为激光热源经过该点时熔池的形成过程;第二个峰值为热源经过第 2 层时该点的重熔过程;其他峰值温度不超过熔点(1 668 ℃),没有重熔现象的发生.在第 5 层和第 9 层热循环过程中分别存在着 3 个超过熔点的连续峰,说明层与层之间的冶金结合良好.

薄壁件层数对冷却速率的影响如图 7 所示.由图 7 可知,模拟得到的冷却速率最大误差在

19% 左右.整体上,与试验数据相比,模拟温度峰值较高,冷却速率较低.随着层数的增加,冷却速率下降.这是由于沉积第 1 层热损失主要通过基板的热传导所致,随着沉积层数的增加对基板的热传导效应减弱,沉积层表面的对流辐射散热效应逐渐增强,散热条件变差,热累积效应增加,这说明在散热机制中,热传导散热占据的比重最大^[15].

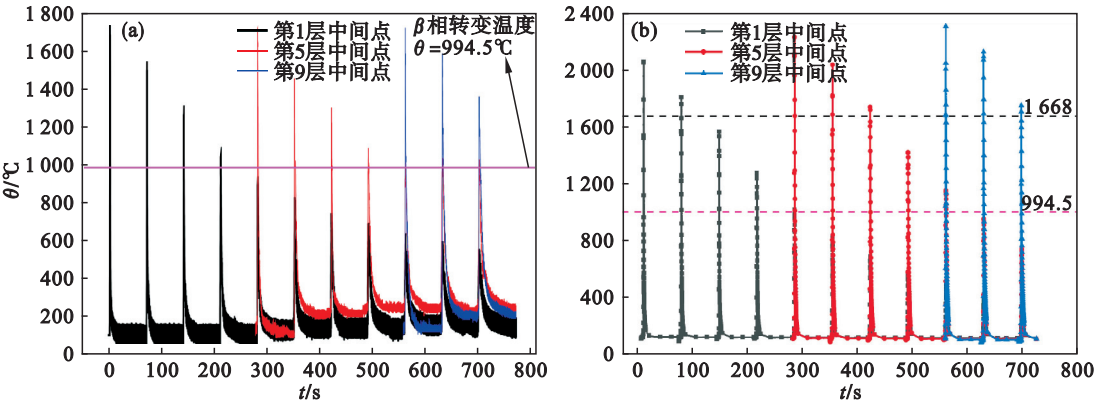


图 6 薄壁件成形过程热循环曲线比较

Fig. 6 Comparison of thermal cycle curves in the forming process of thin-walled parts

(a)—试验数据^[12]; (b)—模拟数据.

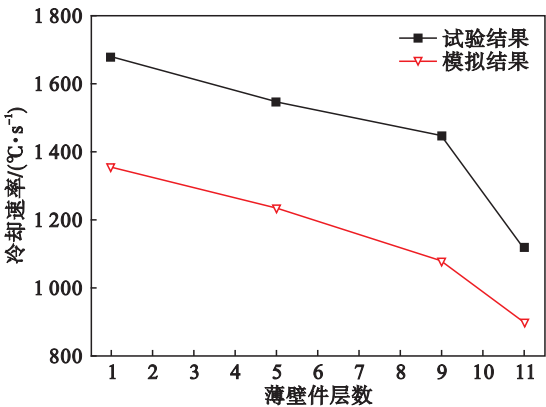


图 7 薄壁件层数对冷却速率的影响

Fig. 7 Effect of layers of thin-walled parts on cooling rate

3.2 应力场计算结果分析

图 8 为单道 11 层薄壁件沉积成形的残余应力分布云图.从图中可以看出,薄壁件整体处于拉应力状态,不同区域的应力状态有明显的差异,中部区域残余应力相对稳定且基本一致,在激光热源的起始点和结束点的两个区域应力波动较大,最大残余应力集中在沉积层与基板交界处,这主要由于热端效应的影响^[16].其中,最大等效 Von Mises 应力为 1 304 MPa, x 方向应力峰值为 1 032 MPa, y 方向应力峰值为 976.5 MPa,均大于材料常温时的屈服极限(920 MPa).

选取如图 9 所示的 3 条路径上的应力分布,

研究薄壁件应力场的分布特点.图 10a 为路径 AB 上的残余应力,可以看出,沉积层与基板结合面及紧靠沉积层两侧基板表面上 x 向应力为拉应力状态,且越靠近沉积层中心位置拉应力值越高.随着远离沉积层,基板表面上的应力逐渐转变为压应力状态.垂直扫描速度方向沉积层内部及靠近沉积层两侧基板的 y 向应力状态均为拉应力,沿基板厚度方向的 z 向应力状态变化较为复杂.总体而言, x 向拉应力值要大于 y 向和 z 向的应力,因此沉积层容易在垂直于扫描方向产生裂纹,主要是由于平行于激光扫描方向的温度梯度分量较高, x 向应力明显高于 y 向应力^[17].图 10b 为路径 CD 上的残余应力分布.可以看出,3 个方向的残余应力变化较为均匀,整体处于拉应力状态,其中 x 向应力最大, y 向和 z 向应力相对较小.图 10c 为沿薄壁件中心线路径 EF 上不同层 x 向应力的残余应力分布,可知,在沉积层与基板表面的结合线上 x 向应力表现为拉应力状态,且在起始点和结束点区域存在着较大的拉应力,在沉积层上 x 向应力主要表现为中部拉伸,起始点和结束点压缩,中部残余应力值基本保持稳定.由于基板上的熔池与未熔化的热影响区直接相接,受到未熔化热影响区的作用,因此沉积层与基板表面的结合面处产生的拉应力最大.

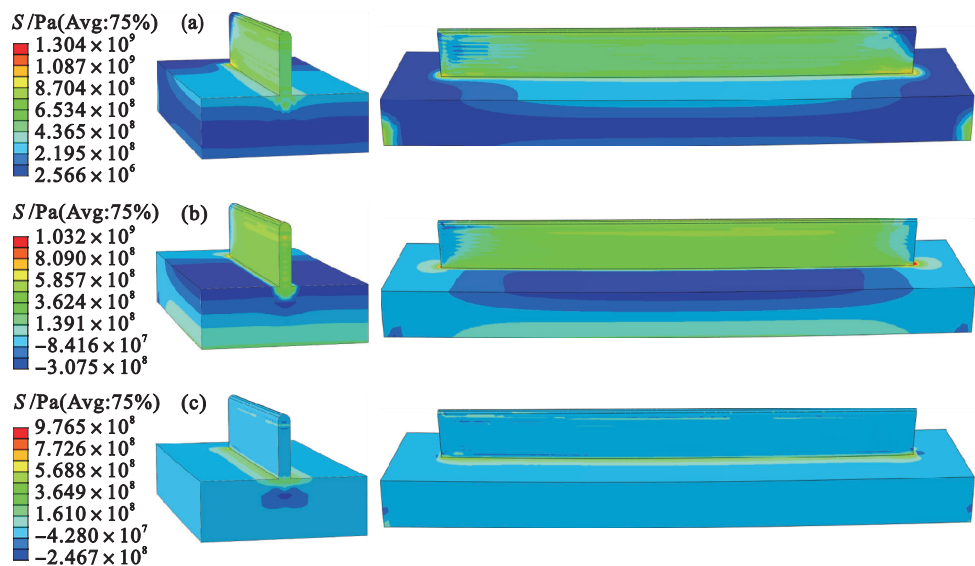


图 8 薄壁件沉积模型的残余应力分布
Fig. 8 Residual stress distribution of thin-walled part deposition model
(a)—等效残余应力；(b)—x 向应力；(c)—y 向应力。

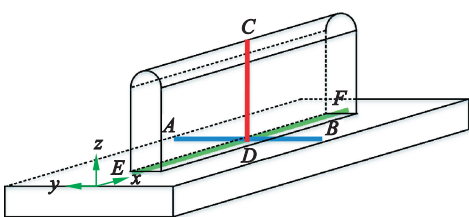


图 9 残余应力的路径定义
Fig. 9 Path definition of residual stress

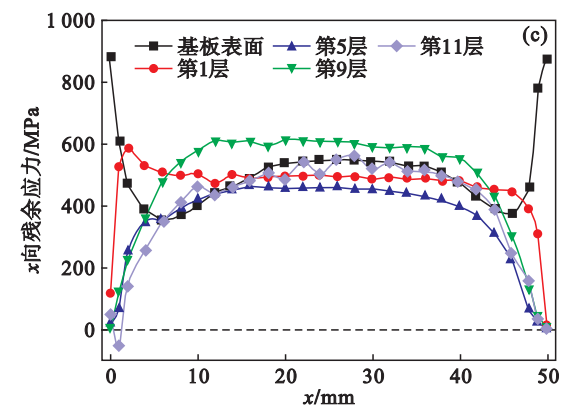
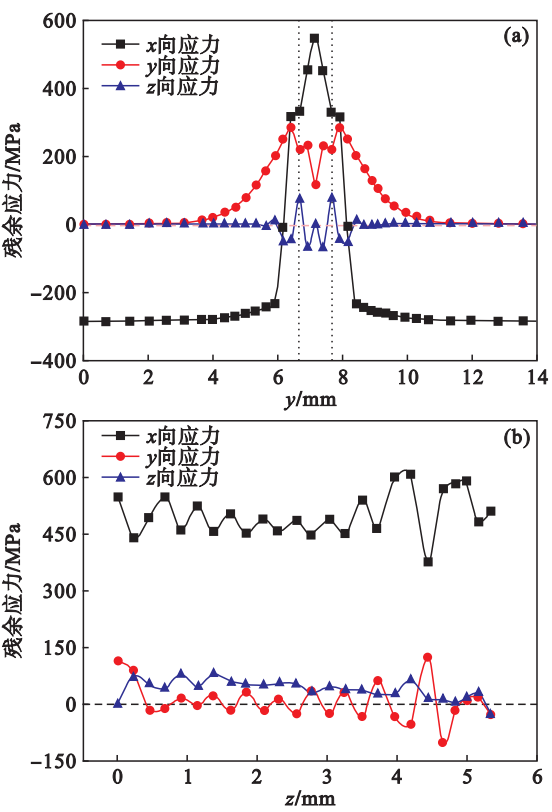


图 10 沿 3 条路径上的残余应力分布
Fig. 10 Residual stress distribution along three paths
(a)—路径 AB；(b)—路径 CD；(c)—路径 EF。

4 结 论

- 1) 计算的热循环曲线与试验测量值吻合良好,在单道 11 层成形过程中,随着薄壁件层数的增加,热累积效应增强,冷却速率下降,相邻两层甚至多层之间出现重熔现象,冶金结合条件良好。
- 2) 薄壁件残余应力整体呈现拉应力状态,x 方向应力值较其他两个方向大得多,在垂直于扫描方向易产生裂纹等缺陷。
- 3) 不同区域应力分布差异明显,中部区域残余应力相对稳定,两端应力分布比较复杂,最大残余应力集中在沉积层两端与基板交界处。

参考文献：

[1] 王华明,张述泉,王向明. 大型钛合金结构件激光直接制造

- 的进展与挑战[J]. 中国激光,2009,36(12):3204–3209.
(Wang Hua-ming, Zhang Shu-quan, Wang Xiang-ming. Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components[J]. *Chinese Journal Lasers*, 2009,36(12):3204–3209.)
- [2] Szost B A, Terzi S, Martina F, et al. A comparative study of additive manufacturing techniques; residual stress and microstructural analysis of CLAD and WAAM printed Ti-6Al-4V components[J]. *Materials and Design*, 2016, 89: 559–567.
- [3] Montevecchi F, Grossi N, Takagi H, et al. Cutting forces analysis in additive manufactured AISI H13 alloy [J]. *Procedia CIRP*, 2016, 46: 476–479.
- [4] 王福雨, 刘伟军, 赵宇辉, 等. 复杂薄壁零件激光快速成形过程的热力耦合场数值模拟[J]. 机械工程学报, 2013, 49(5): 191–198.
(Wang Fu-yu, Liu Wei-jun, Zhao Yu-hui, et al. Thermo-mechanical coupling field simulation of complex thin-wall part laser rapid prototype process[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(5): 191–198.)
- [5] Montevecchi F, Venturini G, Scippa A, et al. Finite element modeling of wire-arc-additive-manufacturing process [J]. *Procedia CIRP*, 2016, 55: 109–114.
- [6] Fu C H, Guo Y B. Three-dimensional temperature gradient mechanism in selective laser melting of Ti-6Al-4V [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2014, 136(6): 1–7.
- [7] Zhao H, Zhang G, Yin Z, et al. A 3D dynamic analysis of thermal behavior during single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(3): 488–495.
- [8] Zhao H, Zhang G, Yin Z, et al. Three-dimensional finite element analysis of thermal stress in single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(1): 276–285.
- [9] 戴德平, 蒋小华, 蔡建鹏, 等. 激光熔覆 Incone 1718 镍基合金温度场与应力场模拟[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 1–8.
(Dai De-ping, Jiang Xiao-hua, Cai Jian-peng, et al. Numerical simulation of temperature field and stress distribution in Incone 1718 Ni base alloy induced by laser cladding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 1–8.)
- [10] Ali H, Ghadbeigi H, Mumtaz K. Effect of scanning strategies on residual stress and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2017, 712: 175–187.
- [11] 逯世杰, 郑乔, 张超华, 等. 不同有限元软件对 Q390 钢厚板 T 型接头焊接残余应力和变形预测精度与计算效率的比较[J]. 机械工程学报, 2019, 55(6): 11–22.
(Lu Shi-jie, Zheng Qiao, Zhang Chao-hua, et al. A comparative study on computational accuracy and efficiency of welding residual stress and deformation in a Q390 steel thick plate T joint among three kinds of different FEM software [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 56(6): 11–22.)
- [12] 李慧敏. 激光熔丝增材制造工艺特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
(Li Hui-min. Study on the process characteristics of wire based laser additive manufacturing [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.)
- [13] Hao M, Sun Y. A FEM model for simulating temperature field in coaxial laser cladding of Ti6AL4V alloy using an inverse modeling approach[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 64: 352–360.
- [14] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite-element model for welding heat-sources [J]. *Metallurgical Transactions B—Process Metallurgy*, 1984, 15(2): 299–305.
- [15] Edwards P, O’Conner A, Ramulu M. Electron beam additive manufacturing of titanium components: properties and performance [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2013, 135(6): 1–7.
- [16] Liang W, Murakawa H, Deng D. Investigation of welding residual stress distribution in a thick-plate joint with an emphasis on the features near weld end-start [J]. *Materials and Design*, 2015, 67: 303–312.
- [17] Parry L, Ashcroft I A, Wildman R D. Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermo-mechanical simulation [J]. *Additive Manufacturing*, 2016, 12: 1–15.