

基于红外热像的激光微细丝成形过程热累积研究

宋栓军, 邱成鸿, 韩宇琪, 方泽钰
(西安工程大学 机电工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 激光微细丝增材制造技术是一种能快速成形小型零件的制造技术, 但由于受制造过程中热累积效应的影响, 往往无法保证对成形零件的精准控形控性。针对这一问题, 利用标定后的红外热像仪采集单道多层薄壁零件的表面温度, 研究其制造过程温度场特征变化规律及热累积效应, 为成形工艺的优化提供依据。结果表明: 利用红外热像仪可实现对薄壁堆积过程温度场演化规律的研究, 随着熔覆高度的增加, 高温区域面积逐渐增大, 热累积效应明显增强。熔覆过程中, 热量向下传导, 散热条件逐渐变差, 各层冷却速率随层数增大而减小, 直至趋于平稳。此外, 当熔覆层数大于 15 层时, 热累积效应不再对 15 层以下熔覆层产生影响。

关键词: 增材制造; 激光微细丝; 红外热像; 热累积

中图分类号: TG456.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)11-3841-06

激光送丝增材制造技术是一种能够根据三维模型, 利用激光热源将丝材逐层堆积为功能齐全的金属零件快速成型技术^[1-2]。其中, 丝材的直径决定了零件的最小成形尺寸, 直径过大的丝材成形零件不能满足精密结构的要求, 还会导致最终成形质量较差, 而使用直径为 0.3 mm 丝材的激光细丝增材制造技术不仅能避免上述问题, 还能降低成本耗费, 减少后处理时间。因此, 激光微细丝增材制造技术具有极大的发展前景。

在激光微细丝增材制造过程中, 激光持续加热基板产生熔池, 丝材不断递送从而形成连续熔覆单道, 多层堆积单道后制造出成形零件^[3]。在这种情况下, 上层对下层有复热作用, 下层对上层有预热作用, 零件热累积效应不断增加, 而过度的热累积会导致零件的残余应力和变形较大, 表面光洁度较差, 几何精度相对较低。这些问题将严重影响零件的最终形状和力学性能^[4-5]。因此, 研究分析该工艺过程温度场特征, 对保证零件成形质量具有重要意义。文献[6]基于仿真软件对激光熔丝过程温度场进行模拟仿真, 研究了薄壁成形过程中的热循环特性; 文献[7-9]通过三维有限元数值模拟研究了单道多层电弧增材制造过程中的温度场演化和残余应力分布; 文献[10]针对金属电子束选区熔化过程, 建立了瞬态温度场及熔池演化的有限元模拟方法, 探究了热源功率对温度场特征的影响规律。可以看出, 目前大部分研究主要集中于增材制造过程温度场的数值模拟, 但模拟

仿真忽略了实际复杂的温度条件, 无法准确判断真实的温度场变化情况。随着测温技术的发展, 红外热像仪逐渐用于对增材制造过程温度场的监测^[11]。文献[12]采用红外热像仪监测单道激光熔丝过程温度场, 获得了送丝速度对熔池温度、冷却速率等温度场特征的影响规律, 但并未进一步研究薄壁温度场变化情况; 文献[13]同样采用红外热像仪研究了冷却速率和熔池温度对 SLM 制备的成形件组织的影响, 但没有具体说明热累积变化。

为此, 针对微细丝增材制造薄壁成形过程中热累积效应增大影响成形零件质量的问题, 本实验利用红外热像技术对激光微细丝增材制造过程进行监测, 探究该工艺下单道多层薄壁堆积热累积变化情况, 以期为成形质量优化提供依据。

1 实验

激光微细丝增材制造系统如图 1 所示。它主要由气体保护、激光器、送丝机、运动模块和焊接相机组成。激光器为 IPG-QCW150 光纤激光器, 波长为 1064 nm, 最大功率为 250 W, 最小激光光斑直径为 0.5 mm。如图 1 所示, 工作平面在 3 个独立步进电机的驱动下可以沿 x 、 y 、 z 轴运动。在薄壁堆积过程中, 激光器和送丝机在同一平面且始终静止, 工作平面在 x 轴上移动进行金属熔覆。在熔覆一层后, 工作平面需要在 z 轴上下降一定的高度, 以便进行下一次熔覆。

收稿日期: 2022-11-17

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (61701384); 西安市科技计划先进制造业技术攻关项目 (21XJZZ0016)

作者简介: 宋栓军, 男, 1974 年生, 博士, 副教授, 西安工程大学机电工程学院, 陕西 西安 710048, 电话: 029-62779113, E-mail: songshuanjun@xpu.edu.cn

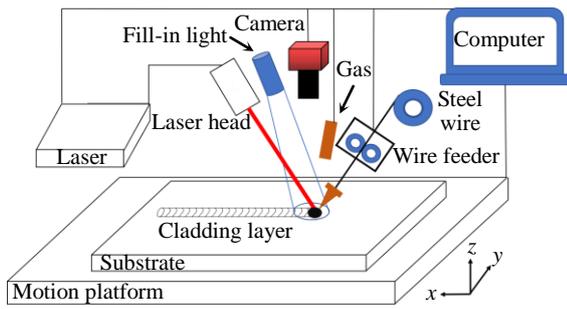


图 1 增材制造实验平台示意图

Fig.1 Schematic diagram of additive manufacturing experimental platform

本研究使用的测温设备为 Flir X6250sc 中波红外热像仪，这款热像仪的相关规格见表 1。热像仪采用双机位分别记录堆积过程，其示意图如图 2 所示。两机位分别位于薄壁件正前方和正上方 85°位置，空间分辨率同为 0.135 mm/pixel，可分别捕获到薄壁熔池温度以及薄壁表面温度场。在本实验中，红外热像仪参数的设置，包括帧速、温度范围，对温度的测量是非常重要的。在熔覆过程中，薄壁件表面温度分布明显不均匀。为实现精确测量温度，故温度范围设定在 500~2500 °C，帧速率始终为 100 Hz。

在激光微细丝增材制造中，以直径 0.3 mm 的 316L 不锈钢钢丝作为材料熔覆在尺寸为 100 mm×100 mm×5 mm 的 316L 不锈钢板上。保护气体为氩气，气体流量始终保持为 15 L/min。工艺参数方面，为避免定激光功率带来的高层重熔坍塌的情况，故采用大功率熔覆底层，变功率熔覆后续层的实验方法，具体工艺参数如表 2 所示。其中，激光功率从大到小分别对应 1~3 层、4~6 层、7~9 层、10~12 层，12 层后保持功率为 75 W 不变。

同时，为精准的测量温度，需对被测物体辐射率进行标定试验。采用三铯 M22 型比色高温计进行标定试验，该设备采用相邻波长辐射能量比值来确定目标温度，

表 1 热像仪数据

Table 1 Data of thermal imager

Detector type	MCT detector
Spectral range/ μm	3.0-5.0
Frame range/Hz	1-145
Resolving power/pixel	640×512
Measuring range/ $^{\circ}\text{C}$	0-2500
Measurement accuracy/%	± 1

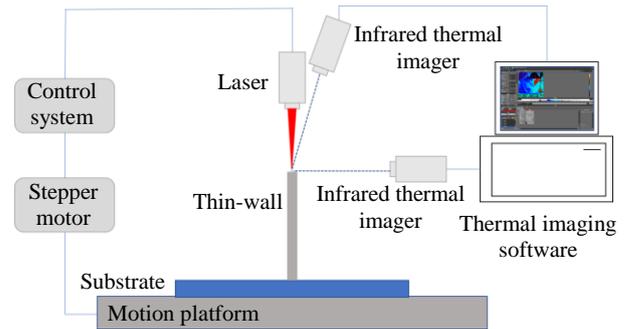


图 2 温度场监测示意图

Fig.2 Schematic diagram of temperature field monitoring

表 2 多层堆积工艺参数

Table 2 Parameters of multi-layer stacking process

Parameter	Value
Laser power/W	125, 112, 100, 85, 75
Scanning speed/ mm min^{-1}	150
Feeding speed/ mm min^{-1}	300
Cladding length/mm	30
Number of accumulation layers	30

无需标定便可精准测量^[14]。此试验通过比色高温计和红外热像仪同时监测熔池温度，并改变热像仪辐射率使其测量结果与高温计保持一致，进而实现辐射率标定。试验结果表明：辐射率为 0.1 时最为贴近真实温度，且后续实验辐射率均保持为该值。

2 结果与讨论

2.1 温度场演化

一般来说，不同层数下熔覆过程的温度场演化是相似的，这里选择熔覆过程中的红外热像图来说明它的基本特征。图 3 为单道多层的激光细丝增材制造温度场演化，图中为 1 至 6 层末尾端点处激光关闭时部分温度分布，其中端点部分凸出的高温区域是由于丝材和熔池之间产生液桥，在红外热像图上表现为该现象。从图中可以看出，随着层数的增加，薄壁件上的高温区域面积不断增加，且伴随着越发明显的拖尾现象，其原因在于散热条件的逐渐改变：当熔覆层数较低时，熔覆层接近基板，散热面积大、热传导快；在熔覆层数逐渐增大之后，改变了其散热方式，主要通过空气对流和薄壁墙体散热，散热条件差，热传导效率低，从而使得热累积严重，高温区域明显增大。

图 4 给出了各层在激光关闭后冷却 0.1 s 的温度场情况，避免了激光持续加热所带来的影响。从图中可以看出，随着层数的增加，热累积效应依然存在，拖尾现象

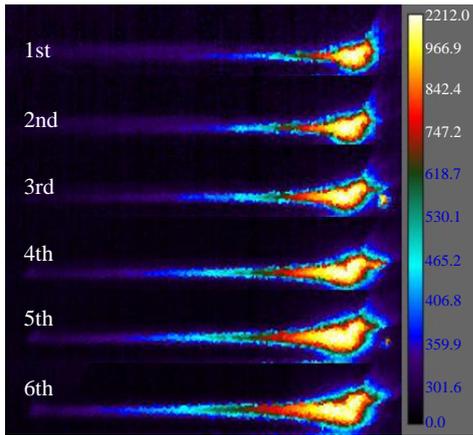


图 3 激光关闭时不同层数温度场

Fig.3 Temperature field in different layers when laser is turned off

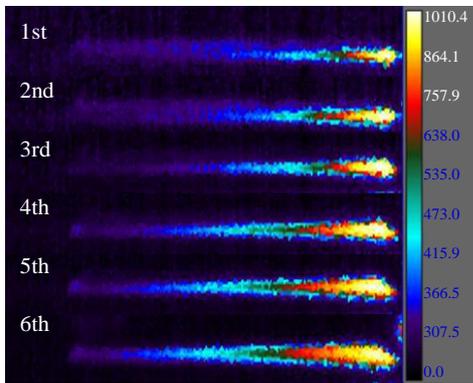


图 4 不同层数冷却 0.1 s 后温度场

Fig.4 Temperature field in different layers after cooling for 0.1 s

依旧明显，同时由于热累积以及散热条件的共同影响，不同层数在冷却 0.1 s 后的最高温度各不相同。如表 3 所示，第 1 层熔覆道最高温度为 532 °C，第 6 层熔覆道最高温度为 917 °C，增加了 385 °C。同时，熔池温度在 0.1 s 内从 1500 °C 左右的温度区间降低到了 532 °C，体现了激光细丝增材制造过程中急冷急热物理特性，印证了其所具备的高冷却速率，对研究该工艺下的微观组织性能有着直接帮助。

表 3 冷却 0.1 s 后熔覆道最高温度

Table 3 Maximum temperature of cladding channel after cooling for 0.1 s

Number of layers	Maximum temperature/°C
1	532
2	619
3	688
4	739
5	742
6	917

从整体上看，熔覆部分温度逐渐降低，且温度分布随时间增长逐渐趋于均匀。本研究将薄壁件的平均温度定义为薄壁件整个表面的平均温度。通过红外相机记录零件表面温度，并通过 Flir 红外相机所配套 ResearchIR 软件进行数据处理，该软件可计算所选区域的像素点个数，根据空间分辨率和像素点个数可计算出该区域的实际面积。本实验中所计算区域包括红外相机可以捕捉到的整个薄壁部分，用于此计算的像素点个数取决于熔覆层数。在图 5 中，30 层薄壁零件的平均温度计算约有 8000 个点。

如图 5 所示，薄壁件的最高温度在初始 0.1 s 内迅速下降，随后下降趋势变得逐渐缓慢。冷却约 2 s 后，薄壁件的温度分布基本均匀。薄壁件的平均温度与最高温度相比，温度变化相对缓慢。这是因为该工艺采用细丝熔覆，导致薄壁厚度不大，且随着层数的增加，激光功率减小，使得激光加热时对底层熔覆道温度影响较小，温度不高，最终导致整个薄壁的平均温度变化不大。

2.2 高温区域分析

在多层堆积激光细丝增材制造过程中，相同条件下，随着熔覆高度的增加，热积累变的严重。在本节中，薄壁件各层熔覆道的熔覆宽度是相似的。因此，薄壁件每层熔覆过程中的高温区域可以用来说明热累积效应。图 6 为薄壁件第 1 层，10 层，20 层，30 层熔覆过程中大于 400 °C 的红外热像图，图中黄色部分为大于 600 °C 的区域，红色部分是大于 400 °C 的高温区域，从中可以直观的看出，随着熔覆层数的增加，高温区域面积不断增加，且形状逐渐变化为拖尾水滴形，这与第 3 节中的熔池形状热图像相符合。其中，第 20 层温度图上端出现一定面积的不规则凸起，这是由于在熔覆该层过程中，丝材偏离熔池预定轨迹，但液桥并未断开，致使高温区域发生异常变化。

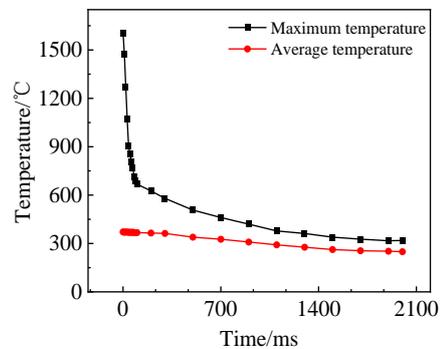


图 5 薄壁最高温度和平均温度随冷却时间变化

Fig.5 Variation of maximum and average temperature of thin wall with cooling time

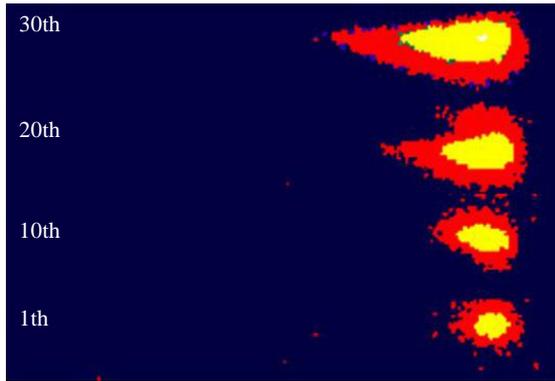


图 6 薄壁成形过程中大于 600 °C 温度图

Fig.6 Temperature diagram above 600 °C during thin wall forming

图 7 是薄壁件成形工艺过程中，不同层数下温度大于 600、800、1000 °C 的区域面积。从图中可以看出，随着熔覆层数的增长，高温区域面积在不断增大，这即是由于熔覆过程中的热累积所导致，具体表现为：当熔覆层数为 30 时，大于 1000 °C 的高温区域面积是 20 层的 1.5 倍，是 10 层的 2 倍；而大于 600 °C 的区域更为明显，其面积是 20 层的 1.8 倍，是 10 层的 2.4 倍。

2.3 温度梯度分析

在薄壁熔覆过程进行到高层的时候，此时的散热方式主要通过薄壁件表面来进行。由此，为探究其具体的热量传递方式，提取熔覆过程中熔池部分的等温梯度，如图 8 所示。这张图像拍摄于第 30 层熔覆过程的中间时刻。薄壁件的温度分布与前面章节所提及的类似。从等温梯度图中可以看出，熔池后方沿沉积方向的温度梯度较小，而熔池下方的垂直温度梯度较大。因此，熔池的热量在熔覆过程中主要通过薄壁部分向下传导，当熔池温度过大时不仅会影响当前熔覆层，还会影响前几层，所以，熔池温度控制对薄壁件成形工艺十分重要。同时

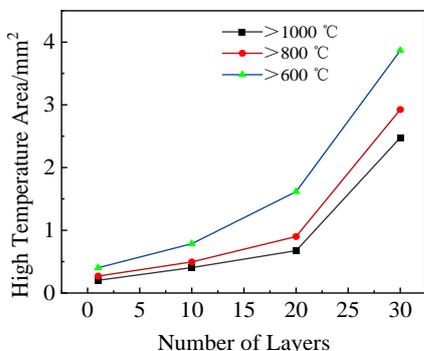


图 7 不同层数下薄壁高温面积变化

Fig.7 Area change of thin wall at high temperature under different layers

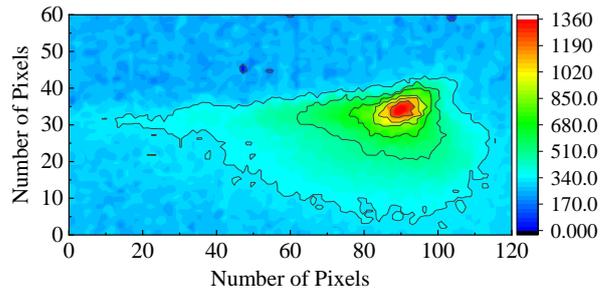


图 8 温度梯分布

Fig.8 Temperature gradient distribution

需要提及的是，图像右上角的凸起是由于在熔覆过程中，丝材在激光加热的作用下与熔池形成液桥所造成的。

图 9 是薄壁件熔覆过程中熔池部分照片。从中可以直观看出熔覆区域形状与温度梯度类似。高光区域呈半圆形，且热量呈辐射状向下传递产生红色高温区域；液桥的存在使得熔池与丝材之间形成凸起的高温区域，平缓的熔池表面变得倾斜，同时也解释了温度梯度图中上表面倾斜的原因。

2.4 层间热循环分析

由前面章节可知，当前层的熔池高温对已成形层存在热效应。热效应的增大会导致下层熔覆道发生金属相变，进而改变薄壁件的组织性能；过大的热效应还会导致其重熔、坍塌，影响整个打印过程，造成薄壁件的损坏。因此，为探究当前熔覆过程对下层熔覆道的影响规律，以第 1 层熔覆道中间点为监测点，提取其在熔覆过程中的不同层数下热循环曲线。

图 10 是薄壁熔覆过程中不同层数下该监测点的热循环曲线。可以看出，该监测点在经历第 1 层熔覆道时，其最高温度即熔池温度，为 1621 °C；在经历第 5 层熔覆时，其最高温度降低为 1100 °C，并未超过 316L 不锈钢熔点（1375 °C），说明该工艺下的熔池温度并不会对第 5 层造成重熔，而根据其热量向下传递的规律，当前熔覆层的前一层作为“基板”，势必会进行重熔，这也符合

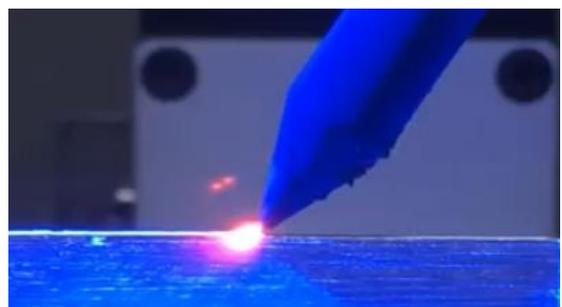


图 9 薄壁熔覆成形过程

Fig.9 Thin-wall cladding forming process

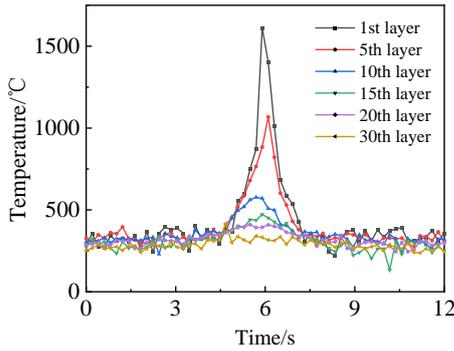


图 10 不同层数热循环曲线

Fig.10 Thermal cycle curves of different layers

激光增材制造过程熔覆特性; 熔覆第 10 层时, 最高温度持续降低, 热量传递不断减小; 熔覆第 15 层时, 熔池最高温度接近于平稳温度, 说明此时熔覆过程对底层温度影响很小, 热量传递到该位置基本已经消散完毕, 因此, 第 20、30 层的热循环曲线同样保持平稳, 不受熔覆过程的影响。由此可以证明: 熔覆过程中产生的热效应对 15 层下的熔覆道影响非常小。

2.5 冷却速率变化规律

基于红外热像仪的实时监测, 提取多层堆积中 1 层、5 层、10 层、15 层、20 层、30 层的温度数据, 并计算其平均冷却速率, 结果如图 11 所示。从图中可以看出, 第 1 层熔覆道的冷却速率最高, 考虑到实验设计中, 对冷却速率影响最大的扫描速度始终保持为 150 mm/min 不变, 而从图 10 中又可得, 尽管激光功率并未保持一致, 但由于热累积的存在使得各层熔池温度均处于一定范围。因此, 其冷却速率最高的原因可归结于底层熔覆与基板相接触, 散热面积大, 热传导效率快。而后随着熔覆高度的增加, 熔覆层与基板距离逐渐增大, 散热方式由基板散热转变为薄壁散热, 散热条件变差, 冷却速率随着降低, 从 1 层的 1179 °C/s 逐渐减低到第 15 层的 820 °C/s。

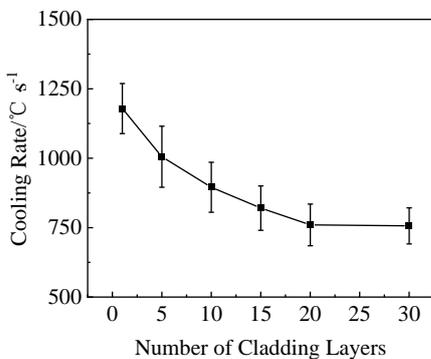


图 11 不同层数冷却速率曲线

Fig.11 Cooling rate curve of different layers

在熔覆层数达到 15 层之后, 冷却速率降低趋势开始变得缓慢, 从 15 层的 820 °C/s 降低到 20 层的 760 °C/s, 最终 30 层的冷却速率为 756 °C/s, 由此可知, 冷却速率在 20 层之后基本不会变化。在 2.4 节中总结过, 熔覆过程中产生的热效应对 15 层下的熔覆道影响非常小, 而其对冷却速率的影响可解释为, 当熔覆层数大于 15 层时, 其散热方式基本不发生改变, 在熔池温度和其余工艺参数不变的情况下, 冷却速率基本保持稳定。

3 结论

- 1) 薄壁堆积过程中, 随着成形零件高度的增加, 高温区域面积逐渐增大, 热累积影响越发显著。
- 2) 熔覆过程中热量沿薄壁向下扩散并累积, 层数越高, 散热条件越差, 进而导致冷却速率随之降低, 热累积效应依然存在。
- 3) 当前层熔覆对其下 15 层内的熔覆层有温度影响, 并随层数的增加, 影响逐渐降低, 直至消失。

参考文献 References

- [1] Guo Chunhuan(果春焕), Yan Jiayin(严家印), Wang Zechang(王泽昌) et al. *Heat Fabrication Technology(热加工工艺)*[J], 2020, 49(16): 5
- [2] Lu Bingheng(卢秉恒), Li Dichen(李涤尘). *Mechanical Manufacturing and Automation(机械制造与自动化)*[J], 2013, 42(4): 1
- [3] Li Fuquan(李福泉), Gao Zhenzeng(高振增), Li Liqun(李俐群) et al. *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2017, 46(1): 177
- [4] Zhang Feiqi(张飞奇), Chen Wenge(陈文革), Tian Meijiao(田美娇). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2018, 47(6): 1890
- [5] Wang Shuai(王帅), Gu Huimin(顾惠敏), Wang Wei(王伟) et al. *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2019, 48(9): 2910
- [6] Ren Chaohui(任朝晖), Liu Zhen(刘振), Zhou Shihua(周世华) et al. *Journal of Northeast University(东北大学学报)*[J], 2020, 41(4): 551
- [7] Zhao H, Zhang G, Yin Z et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2011, 211(3): 488
- [8] Zhao H H, Li H C, Zhang G J et al. *Rev Adv Mater Sci*[J], 2013, 33: 402
- [9] Zhao H, Zhang G, Yin Z et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2012, 212(1): 276
- [10] Jiang Jing(江静), An Ning(安宁), Yang Guangyu(杨广宇) et al. *China Laser(中国激光)*[J], 2022, 49(8): 60

- [11] Cheng B, Lydon J, Cooper K *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2018, 32: 744
- [12] Zhu Jinqian(朱进前), Lin Zemin(凌泽民), Du Farui(杜发瑞) *et al.* *Infrared and Laser Engineering*(红外与激光工程)[J], 2018, 47(6): 145
- [13] Farshidianfar M H, Khajepour A, Gerlich A P. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2016, 231: 468
- [14] Marshall G J, Young W J, Thompson S M *et al.* *JOM*[J], 2016, 68(3): 778

Thermal Accumulation of Laser Filamentous Wire Forming Process Based on Infrared Thermography

Song Shuanjun, Qiu Chenghong, Han Yuqi, Fang Zeyu

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: Laser filamentous wire additive manufacturing technology can rapidly form small parts. However, due to the influence of thermal accumulation effect in the manufacturing process, it is often unable to ensure the precision shape control of formed parts. In order to solve this problem, this research uses the calibrated infrared thermography to collect the surface temperature of single pass multi-layer thin-walled parts, and studies the characteristic variation law of temperature field and heat accumulation effect in the manufacturing process, which provides a basis for the optimization of forming process. The results show that the infrared thermal thermography can be used to study the evolution of temperature field in the process of thin wall stacking. With the increase in cladding height, the area of high temperature zone gradually increases, and the heat accumulation effect is significantly enhanced. In the process of cladding, the heat is conducted downward, the heat dissipation condition becomes worse gradually, and the cooling rate of each layer decreases with the increase in the number of layers until it becomes stable. In addition, when the number of cladding layers is more than 15, the thermal accumulation effect will no longer affect the cladding layers below the 15th layer.

Key words: additive manufacturing; laser filamentous wire; infrared thermography; heat accumulation

Corresponding author: Song Shuanjun, Ph. D., Associate Professor, School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, P. R. China Tel: 0086-29-62779113, E-mail: songshuanjun@xpu.edu.cn