

引文格式: 蒋布辉, 张伟, 陈晓, 等. 电子束熔丝增材随行退火系统及均匀面热源扫描 [J]. 航空制造技术, 2022, 65(4): 115-120.

JIANG Buhui, ZHANG Wei, CHEN Xiao, et al. Real time annealing system of electron beam freeform fabrication and scanning of uniform surface heat source[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(4): 115-120.

电子束熔丝增材随行退火系统及均匀面热源扫描*

蒋布辉¹, 张伟¹, 陈晓², 栗琪凯¹, 孔令其¹

(1. 北京航空航天大学, 北京 100191;

2. 军事科学院系统工程研究院军需工程技术研究所, 北京 100082)

[摘要] 在电子束熔丝沉积增材制造过程中, 采用电子束对零件成形区域进行扫描并控制热输入, 可以改善零件的温度分布, 实现随行退火, 达到减小应力和控制变形的目的。采用工控机、波形发生卡、扫描线圈及其驱动电路, 以及动态聚焦线圈及其驱动电路搭建了电子束高速扫描系统, 实现了电子束高速扫描及动态聚焦等功能。基于 LabVIEW 开发了随行退火扫描控制系统, 提出了基于像素点阵定位和动态聚集的控制方法, 实现了电子束扫描的精确定位和热输入控制; 研究了不同扫描路径对面热源温度均匀性的影响, 并采用多点同步测温电路对扫描区域的温度进行了测量。试验结果表明, 该电子束随行退火系统可以实现扫描位置和热输入的精确控制, 通过扫描路径优化显著提高了面热源温度分布的均匀性。

关键词: 电子束; 熔丝增材; 偏转扫描; 随行退火; 面热源

Real Time Annealing System of Electron Beam Freeform Fabrication and Scanning of Uniform Surface Heat Source

JIANG Buhui¹, ZHANG Wei¹, CHEN Xiao², LI Qikai¹, KONG Lingqi¹

(1. Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Quartermaster Engineering and Technology Institute of Systems Engineering Institute of Military Academy of Military Science, Beijing 100082, China)

[ABSTRACT] In the manufacturing process of electron beam freeform fabrication, the temperature distribution of the part can be improved by scanning the forming area of the part with electron beam and controlling the heat input, and the annealing along the part can be realized to reduce the stress and control the deformation. The high-speed scanning system of electron beam is built by using industrial computer, waveform generator, scanning coil and its driving circuit, and dynamic focusing coil and its driving circuit. The functions of high-speed scanning and dynamic focusing of electron beam are realized. Based on LabVIEW, the control system of real time annealing scanning is developed, and the control method based on pixel lattice positioning and dynamic aggregation is proposed to realize the precise positioning and heat input control of electron beam scanning; The influence of different scanning paths on the temperature uniformity of the heat source is studied, and the temperature of the scanning area is measured by using multi-point synchronous temperature measurement circuit. The experimental results show that the scanning position and heat input can be accurately controlled by the electron beam real time annealing system, and the uniformity of the temperature distribution of the surface heat source can be significantly improved by optimizing the scanning path.

Keywords: Electron beam; Freeform fabrication; Deflection scanning; Real time annealing; Surface heat source

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.04.115

* 基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1103101); 国家自然科学基金(51975036); 航空科学基金(20200054051001)。

电子束熔丝增材制造技术^[1-6]具有能量密度高、成形速度快、材料利用率高和成形质量好等优点,适用于制造高性能大型复杂金属构件,可有效缩短生产周期、降低制造成本,在航空航天领域得到迅速推广和应用。然而,由于电子束输入功率高、加热速度快,而且成形零件尺寸大,在成形过程中往往存在较大温度梯度,容易产生较大的热应力和变形,严重影响零件的成形精度^[7]。

黄志涛等^[8]采用分块填充成形以及热处理工艺方法来解决 TC18 钛合金电子束熔丝成形过程中的变形问题,减小了平板的翘曲量,但需要专门的热处理设备及其工艺,降低了生产效率。王宏泽等^[9]设计了电子束熔丝成形随行退火系统,利用电子束高频偏转扫描对成形零件进行加热,以减小应力和变形,该研究只进行了温度场扫描仿真,没有开展扫描试验研究。电子束高频偏转扫描技术指的是通过电磁透镜控制电子束高速偏转在工件表面进行扫描,通过控制扫描位置、扫描速度和停留时间等参数,对扫描区域进行均匀或非均匀加热,实时调节电子束熔丝增材过程中每层沉积层的热输入及温度场分布,从而实现成形过程中应力和变形控制。电子束偏转扫描随行退火无需单独的热处理设备,具有操作简单、实时和高效的优点,对于减小电子束熔丝增材制造中的变形和应力具有重要意义。

采用工控机、波形发生卡和扫描线圈高速驱动电路搭建了电子束高速扫描系统,开发了基于 LabVIEW 软件的电子束熔丝增材随行退火扫描控制程序,提出了像素点阵定位扫描控制方法,实现了电子束偏转扫描精确控制。重点研究了 100mm×100mm 均匀面热源扫描,通过扫描路径优化提高了扫描温度场分布的均匀性,为电子束熔丝增材制造随行退火温度场控制提供了技术参考。

1 电子束高速扫描系统

电子束高速扫描系统主要由控制工控机、任意波形发生卡、扫描线圈电流驱动电路及高速扫描线圈、动态聚焦线圈电流驱动电路及动态聚焦线圈组成;其中,扫描线圈电流驱动电路包括 X 方向扫描线圈电流驱动电路和 Y 方向扫描线圈电流驱动电路,高速扫描线圈有 X 方向扫描线圈和 Y 方向扫描线圈组成,如图 1 所示。

在电子束熔丝增材制造过程中,根据随行退火工艺要求提前编写好 G 代码文件,然后再通过随行退火系统控制界面读入该 G 代码扫描路径文件。控制程序自动对 G 代码文件进行解析并转换成 X、Y 方向的扫描数据,再将扫描数据写入任意波形发生卡,启动任意波形发生卡后输出 X、Y 方向两路输出波形,该输出波形再分别经 X、Y 方向扫描线圈电流驱动电路连接至高频高速扫描线圈,进而产生变化可控的磁场,实现电子束偏转扫描。同时,解析 G 代码后还得到扫描路径上各点的动态聚焦电流数据,也输入任意波形发生卡得到动态聚焦电流输出波形,再经动态聚焦线圈电流驱动电路后连接至动态聚焦线圈,实现动态聚焦线圈电流的实时调节。

1.1 扫描线圈

基于 Helmholtz 线圈的工作原理,结合电子枪的结构, X 方向和 Y 方向的扫描线圈均采用一对彼此平行且连通的共轴线圈组成,并且两线圈内的电流方向一致,大小相同,且线圈之间的距离与线圈边长的一半近似相等,这样在其公共轴线中心点附近小范围区域可以产生均匀的磁场^[10]。为了获得较低的感抗,提高扫描线圈驱动电流的变化率,扫描线圈采用空心结构。设计好的 X 方向和 Y 方向线圈匝数为 120 匝,电感量约为 1.25mH。当线圈驱动电流为 2A 时,扫描线圈中心区域的磁感应

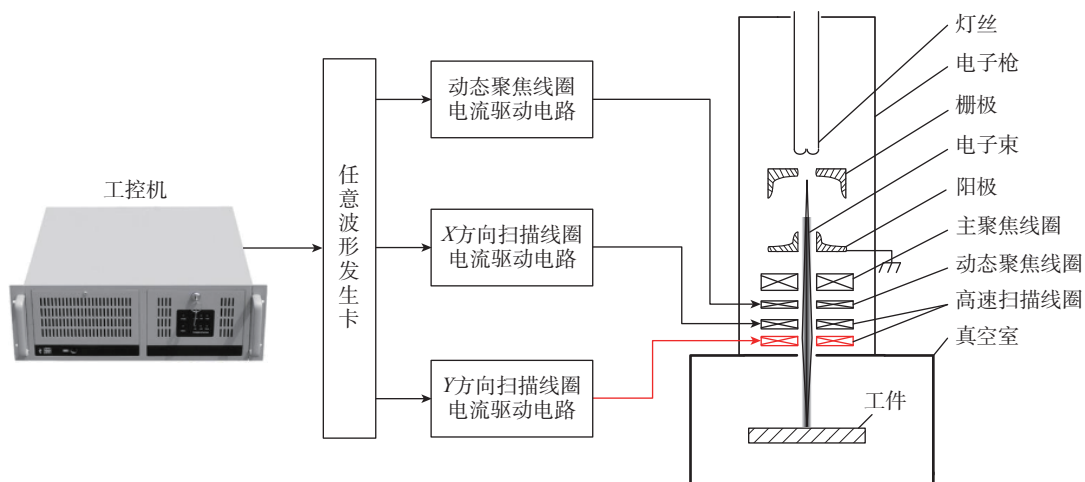


图 1 电子束高速扫描系统

Fig.1 High-speed electron beam scanning system

强度均 $>20\text{Gs}$, 可以满足大角度偏转扫描的要求^[11]。

1.2 动态聚焦线圈

动态聚焦线圈的主要功能是在扫描过程中动态实现电子束的高速聚焦与散焦。当扫描点需要加热时, 动态聚焦线圈加载适当的驱动电流, 电子束聚焦于工件表面对工件进行加热; 当扫描点不需要加热时, 快速调整动态聚焦线圈驱动电流, 使电子束散焦, 使得工件表面热输入减小, 加热效果不明显。动态聚焦线圈采用空心螺线管结构, 线圈匝数为 400 匝, 线圈电感为 3.8mH , 动态聚焦电流在 $0\sim 1\text{A}$ 变化时, 可以满足高速动态聚焦的要求。

1.3 扫描线圈高速驱动电路

基于高频、高电压、大电流功率的放大器 PA93, 提出了一种双逆推电路拓扑, 结合 PI 调节电路设计了扫描线圈驱动电路, 实现了扫描线圈驱动电流的快速变化和高精度输出。其中, X 方向的扫描线圈驱动电路工作原理如图 2 所示。

工控机将解析后获取的扫描数据写入任意波形发生卡, 得到 X 、 Y 方向两路输出波形, 分别作为 X 和 Y 方向扫描线圈驱动电流闭环控制的电流给定信号 I_{gx} 和 I_{gy} 。在图 2 中, 电流给定信号 I_{gx} 与扫描线圈的电流反馈信号 I_{fx} 进行误差运算, 误差运算结果再输入 PID 闭环调节电路中得到输出电压值 U_{gx} ; 该 U_{gx} 再输入双逆推功放电路, 在高压大电流 PA93 功率放大电路 I 的输出端可以得到线圈驱动电压 U_{ox+} , U_{ox+} 再经 PA93 功率放大电路 II 反向放大后得到驱动电压 U_{ox-} ; 然后, PA93 功率放大电路 I 的输出端和 PA93 功率放大电路 II 的输出端再分别连接至 X 方向扫描线圈的两端, 驱动扫描线圈产生扫描电流。当 PI 闭环调节电路进入稳态工作时, I_{gx} 与 I_{fx} 的误差为零, 就可以实现了 X 方向扫描线圈驱动电流的闭环精确控制。同样的工作原理, 可以实现 Y 方向扫描线圈驱动电流的闭环精确控制。 X 、 Y 方向两路输出波形的电压范围为 $-5\sim +5\text{V}$, 经扫描线圈电流驱动电路后产生 $-2\sim +2\text{A}$ 的扫描线圈驱动电流。试验表明, 当 X 、 Y 方向扫描线圈中的驱动电流分

别在 $-2\sim +2\text{A}$ 连续变化, 电子束在 X 方向和 Y 方向的扫描痕迹长度为 350mm , 由此可知电子束的最大扫描范围为 $350\text{mm} \times 350\text{mm}$ 。

图 2 中 PA93 功率放大电路采用 $\pm 48\text{V}$ 电源进行供电, 功放电路的输出电压范围在 $-40\sim +40\text{V}$ 左右, 与普通运放电路相比线圈的驱动电压大大提高; 同时, 采用双逆推电路结构通过正反向两路 PA93 功率放大电路输出端正向电压和反向电压推拉, X 方向扫描线圈的驱动电压为 U_{ox+} 与 U_{ox-} 的差值, 是单路功率放大电路驱动电压的 2 倍。综合上述两方面的设计, 大大提高了扫描线圈的驱动电源电压, 使得线圈电流可以快速变化, 从而实现了电子束的高速扫描。

1.4 动态聚焦线圈驱动电路

动态聚焦线圈驱动电路的工作原理与扫描线圈驱动电路基本相同, 经任意波形发生卡得到一路动态聚焦电流输出波形作为动态聚焦线圈驱动电流闭环控制的电流给定信号, 然后采用电流霍尔传感器反馈聚焦电流, 并通过 PID 调节电路实现动态聚焦电流的闭环精确控制。

2 控制软件设计

2.1 控制界面

基于 LabVIEW 软件^[12] 开发了电子束熔丝增材随炉退火系统控制程序, 主界面如图 3 所示。

该控制程序支持圆、椭圆、矩形, 以及圆面、椭圆面和矩形面扫描, 扫描频率和扫描间距可设定。此外, 为了方便观察输入的扫描数据是否正确, 在主界面上还可以模拟显示扫描的图形。

2.2 扫描控制方法

为提高扫描位置和热输入量的控制精度, 采用像素点阵定位方法来实现电子束扫描的精确控制, 即将连续的扫描空间 ($350\text{mm} \times 350\text{mm}$) 离散到点, 实现精确到每个点的偏转数字量控制, 并通过单独设定每个点的停留时间来精确控制热输入量。选择 0.1mm 作为点间距对 $350\text{mm} \times 350\text{mm}$ 的扫描区域进行离散化, 将扫描范围划

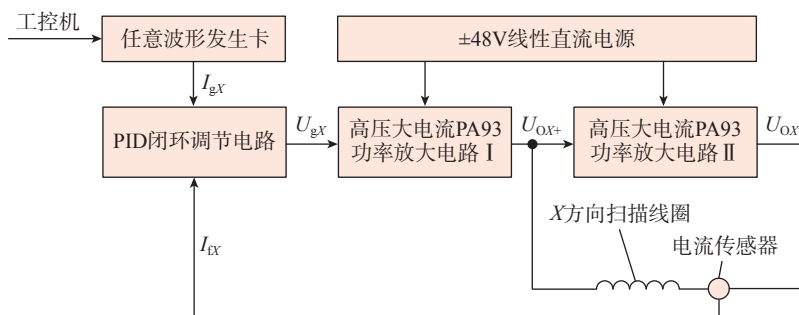


图 2 X 方向扫描线圈高速驱动电路工作原理

Fig.2 Working principle of X direction scanning coil high-speed drive circuit

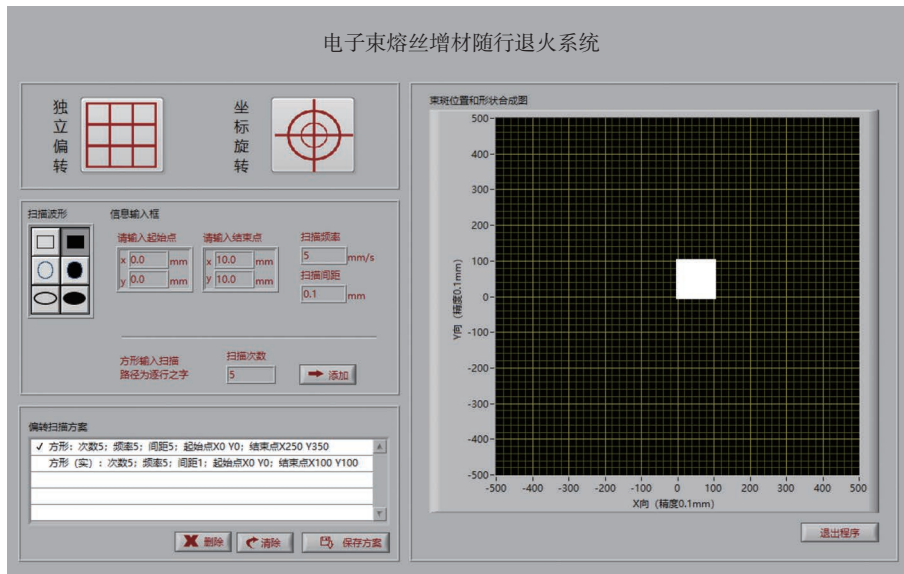


图3 电子束高速扫描控制程序主界面

Fig.3 Interface of electron beam high-speed scanning control program

分为 3500×3500 个网格。根据点的偏转距离进行离散化可以得到点的行列数值,然后再根据行列值查询扫描线圈驱动电流的数字控制量,从而实现精确到点的扫描控制。其中, X 方向扫描值对应扫描阵列的行值, Y 方向扫描值对应扫描阵列的列值。通过 0.1mm 精细划分和扫描位置标定可以实现精确的扫描热源输入位置控制。

在设定面热源扫描工艺时,根据是否加热对每个扫描点将会赋值一个动态聚焦线圈电流值,当电子束扫描到某一点位置时,对应的动态聚焦电流数据通过任意波形发生卡输出至动态聚焦线圈驱动电路,实时调节驱动电流,实现聚焦或散焦控制,从而实现精确到点的热输入控制。

2.3 控制流程

面热源扫描数据输入采用 G 代码文件格式,其控制程序流程如图 4 所示。程序读入 G 代码文件(TXT 格式文件)后对文件进行逐行解析,通过检索文件中的 G 代码命令关键字,并根据不同命令及相关参数进行运算,计算扫描轨迹中各点坐标,通过查表的方式生成 X 、 Y 方向两路扫描电流数据和动态聚焦电流数据。在解析完所有 G 代码文件后分别将两路扫描电流数据和动态聚焦电流数据写入到波形发生卡中,然后启动波形发生卡即可同步输出 X 、 Y 方向两路扫描电流控制波形和动态聚焦电流波形,分别作为 X 和 Y 方向扫描线圈驱动电流闭环控制的电流给定信号 I_{gX} 和 I_{gY} 。

3 均匀面热源扫描

3.1 扫描路径

在电子束熔丝增材制造过程中,需要采用均匀面热

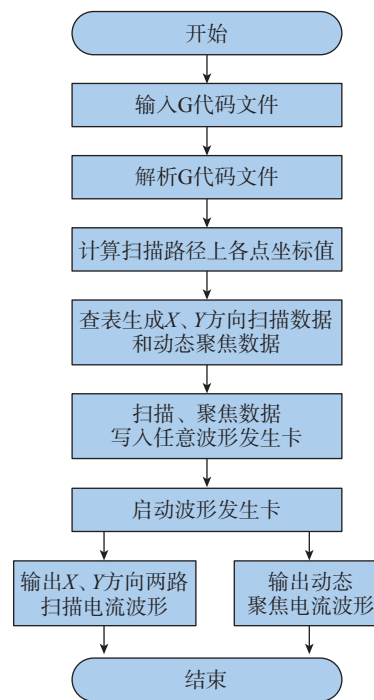


图4 G 代码文件输入控制程序流程

Fig.4 Flow chart of G code file input control program

源对成形零件的局部区域进行加热,可以减小热应力和变形。因此,为了获得均匀的面热源,采用 3 种直线往复扫描路径对工件的局部区域进行扫描加热,其中,图 5 (a) 为单向直线往复扫描,束斑在纵向一个方向下上作来回逐点往复移动。图 5 (b) 为双向直线往复扫描,束斑先进行纵向扫描,再进行横向扫描。图 5 (c) 为双向直线往复加轮廓往复扫描,束斑在双向直线往复扫描的基础上,对扫描区域的轮廓进行 3 次直线往复扫描。

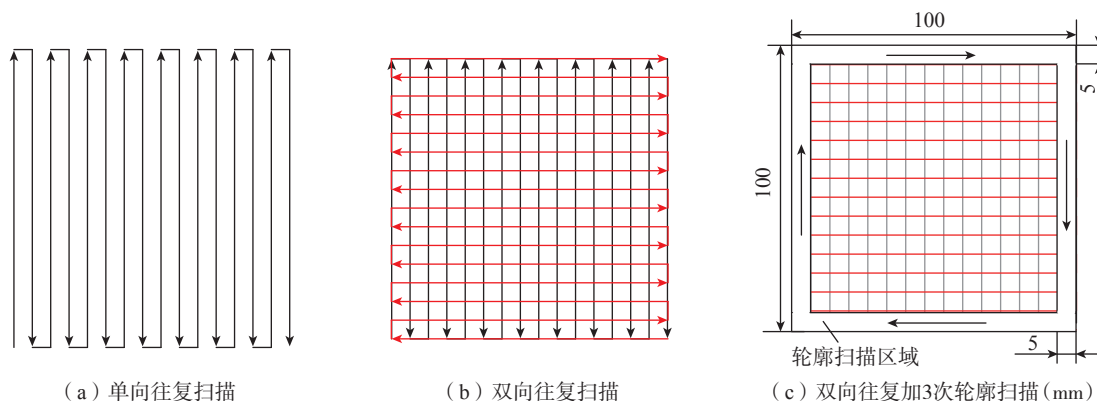


图5 3种扫描路径

Fig.5 Three kinds of scanning paths

3.2 扫描温度测量

在实际扫描试验中,电子束加速电压为 60kV,工作距离 500mm,束流 30mA,扫描速度 20m/s,工件材料为 TC4 钛合金,尺寸为 150mm×150mm×10mm,扫描区域为 100mm×100mm,扫描轮廓为 100mm×100mm 区域边缘 5mm 范围,见图 5 (c)。扫描区域温度采用放在工件底部孔中的 9 支 k 型热电偶测量,如图 6 所示。

分别采用 3 种扫描路径对工件进行重复扫描,当中心点(第 5 点)的温度达到 800℃时,记录下各测温点的温度值。不同扫描路径下 9 个温度点的温度分布如图 7 所示。可以看出,单向往复扫描时,扫描区域温差较大,为 59℃,温度均匀性最差;双向往复扫描时,面热源品质比单向往复扫描的面热源均匀性稍好,但最大温差仍然较大,为 46℃。双向往复加 3 次轮廓扫描,扫描区域的最大温差显著降低,为 23℃,面热源温度分布比较均匀。

由上述试验可知,利用轮廓扫描进行外圈补偿,可有效提高面热源均匀性。为了获得更加均匀的面热源,在双向往复加 3 次轮廓扫描的基础上再增加 3 次轮廓扫描,扫描区域的温度测量结果如图 8 所示。

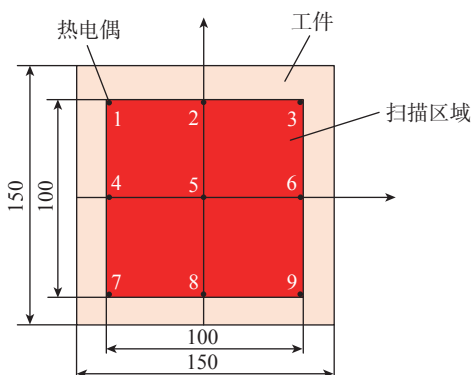


图6 热电偶测温点安装示意图(mm)

Fig.6 Schematic diagram of installation of thermocouple temperature measurement point (mm)

从图 8 可见,增加 3 次轮廓扫描后,扫描区域边缘热输入增加,使得整个扫描区域的温差进一步减小为 9℃。因此,在电子束熔丝增材制造过程中,根据零件成形区域的温度分布或变形控制要求,可以采用电子束对特定区域进行随行退火扫描,通过扫描路径规划,改善

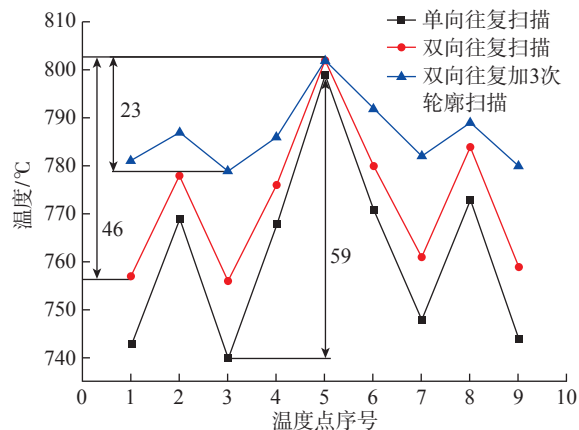


图7 3种扫描方式下温度点最大温差

Fig.7 Maximum temperature difference of temperature points in three kinds of scanning modes

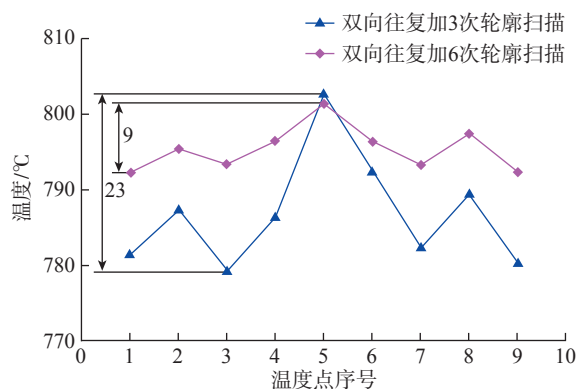


图8 双向往复扫描加 6 次轮廓扫描

Fig.8 Two-way reciprocating scan plus six times contour scans

零件成形区域的温度分布,达到减小应力、控制变形的目的,从而提高零件的成形质量。

4 结论

(1) 搭建了电子束熔丝增材制造随行退火系统,提出了基于像素点阵定位和动态聚集的控制方法,实现了电子束扫描的精确定位和热输入控制,最大扫描范围可达 350mm×350mm,可以满足电子束熔丝增材制造过程中随行退火的要求。

(2) 采用 3 种直线往复扫描路径对成形零件 100mm×100mm 的局部区域进行扫描加热,并采用多点同步测温电路对扫描区域进行温度测量。试验结果表明,采用双向往复扫描并增加轮廓扫描可以改善面热源温度分布的均匀性,当采用双向往复加 6 次轮廓扫描时,面热源的温差减小到 9℃。

参考文献

[1] WĘGŁOWSKI M S, BLACHA S, PHILLIPS A. Electron beam welding-techniques and trends-review[J]. Vacuum, 2016, 130: 72–92.

[2] KÖRNER C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting—A review[J]. International Materials Reviews, 2016, 61(5): 361–377.

[3] TAMINGER K, HAFLEY R A. Electron beam freeform fabrication: A rapid metal deposition process[J]. Advanced Materials & Processes, 2003, 56: 9–10.

[4] TAMINGER K M, HAFLEY R A. Electron beam freeform fabrication for cost effective near-net shape manufacturing[J]. Nato Avt, 2006, 139: 16–19.

[5] 王宁宁, 韩冬, 吴军, 等. 电子束熔丝增材制造 TC11 钛合金显微组织及力学性能研究 [J]. 航天制造技术, 2019(6): 36–39.

WANG Ningning, HAN Dong, WU Jun, et al. Microstructure and mechanical properties of TC11 titanium alloy electron beam fuse additive manufacturing[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2019(6): 36–39.

[6] 黄薇. 电子束增材制造钛合金的组织特征与拉伸性能研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2017.

HUANG Wei. Study on the characteristics of microstructure and tensile properties of titanium alloy by electron beam additive manufacturing[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2017.

[7] 熊进辉, 李士凯, 耿永亮, 等. 电子束熔丝沉积快速制造技术研究现状 [J]. 电焊机, 2016, 46(2): 7–11.

XIONG Jinhui, LI Shikai, GENG Yongliang, et al. Research status of electron beam freeform fabrication[J]. Electric Welding Machine, 2016, 46(2): 7–11.

[8] 黄志涛, 锁红波, 杨光, 等. 热处理工艺对电子束熔丝成形 TC18 钛合金组织性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2015, 36(12): 50–54.

HUANG Zhitao, SUO Hongbo, YANG Guang, et al. Effect of heat treatment on microstructure and property of TC18 titanium alloy prepared by electron beam rapid manufacturing[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(12): 50–54.

[9] 王宏泽, 刘方军, 张伟. 电子束熔丝成形随行退火系统设计及其仿真 [J]. 航空制造技术, 2019, 62(8): 88–92, 97.

WANG Hongze, LIU Fangjun, ZHANG Wei. Programming and simulation of real time annealing technology for electron beam rapid manufacturing system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(8): 88–92, 97.

[10] SAQIB M, S N F, J N F. Design and development of Helmholtz coils for magnetic field[C]//2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Piscataway, NJ: IEEE, 2020: 1–5.

[11] 赵攀峰, 刘方军, 张伟. 电子束高频偏转扫描线圈的设计与仿真 [J]. 航空制造技术, 2019, 62(3): 75–80.

ZHAO Panfeng, LIU Fangjun, ZHANG Wei. Design and simulation of high-frequency electron beam scanning deflection coil[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(3): 75–80.

[12] JEROME J. Virtual instrumentation using LabVIEW[M]. Coimbatore: PHI Learning Private Limited, 2010.

通讯作者: 陈晓, 博士, 高级工程师, 研究方向为人机工程及自动化控制。

(责编 七七)

(上接第 114 页)

[14] XIE P, ZHU S, SHAO Y, et al. Simulation and experimental analysis of autoclave co-curing CFRP hat-stiffened panels with silicone airbag mandrels[J]. Iranian Polymer Journal, 2019, 28: 505–514.

[15] MA X Q, GU Y Z, MIN L I, et al. Investigation of carbon fiber composite stiffened skin with vacuum assisted resin infusion/prepreg co-curing process[J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(10): 1956–1966.

[16] VAFAYAN M, BEHESHTY M H, GHOREISHY M H R, et al. The prediction capability of the kinetic models extracted from isothermal data in non-isothermal conditions for an epoxy prepreg[J]. Journal of Composite Materials, 2014, 48(9): 1039–1048.

[17] ABLIZ D, ARTYS T, ZIEGMANN G. Influence of model parameter estimation methods and regression algorithms on curing kinetics and rheological modelling[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 134(30): 45–137.

[18] BOGETTI T A, GILLESPIE J W. Process-induced stress and deformation in thick-section thermoset composite laminates[J]. Journal of Composite Materials, 1992, 26(5): 626–660.

[19] SVANBERG J M, HOLMBERG J A. Prediction of shape distortions. Part II. Experimental validation and analysis of boundary conditions[J]. Composites, Part A: Applied science and manufacturing, 2004, 35: 723–734.

[20] ZHU Q, GEUBELLE P H. Dimensional accuracy of thermoset composites: Simulation of process-induced residual stresses[J]. Journal of Composite Materials, 2001, 35(24): 2171–2205.

[21] 朱凌宇. 热固性树脂基纤维增强复合材料固化变形研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.

ZHU Lingyu. Study on curing induced shape distortion for thermosetting resin matrix fibre-reinforced composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.

通讯作者: 许英杰, 教授, 工学博士, 研究方向为航空航天复合材料结构一体化设计与制造。

(责编 七七)