

# 电子束熔丝增材制造过程 在线监测技术研究现状\*

郭嘉琪, 黄安国, 黄 康, 庞盛永

(华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 武汉 430074)

**[摘要]** 综述了电子束熔丝增材制造过程在线监控的研究现状, 集中讨论成形过程熔池形貌监测、成形过程温度场监测、流动场监测, 着重介绍了对熔池形貌的在线监测, 并展望了电子束熔丝增材制造过程在线监测未来可能的发展方向: (1) 制造过程中电子、离子等信号的在线监测; (2) 引入新的信号进行在线监测; (3) 对每一层堆积体的质量和层高进行实时跟踪; (4) 多信号协同在线监测。

**关键词:** 增材制造; 电子束熔丝沉积; 在线监测; 熔池形貌; 温度场; 流动场

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2018.17.057



郭嘉琪

硕士研究生, 研究方向为增材制造过程的在线监测。

电子束熔丝增材制造可以快速成形结构复杂且力学性能较好的大尺寸零件, 被广泛应用于航空航天领域<sup>[1-3]</sup>。然而, 成形过程中的变形、开

裂、冶金孔、未熔合等问题严重影响制件的成形质量和尺寸精度。这些问题与熔池形态不稳定和成形件温度分布不均密切相关<sup>[4-5]</sup>。因此, 对熔池形态、成形过程温度场进行在线监测, 结合闭环控制手段, 及时发现问题, 实时调整补偿, 对于提高成形质量和精度至关重要。成形过程的监测引起国内外研究人员的广泛关注。

本文主要从熔池形貌检测、成形过程温度场监测、流动场监测 3 个方面介绍电子束熔丝增材制造技术在线监测的研究现状, 并展望监测技术的未来发展趋势。

## 电子束熔丝增材制造在线 监测现状

电子束增材制造过程中, 高温、高真空、高辐射的苛刻成形环境和大尺寸、结构复杂等较高的成形要求大大增加了监测的难度<sup>[6]</sup>。目前, 电子束熔丝增材制造技术监测技术尚处于发展阶段。电子束熔丝增材制造

过程与电子束焊接类似, 由于电子束焊接出现时间较早, 其在线监测技术的研究较为深入, 有许多方法和经验值得借鉴。

### 1 熔池形貌监测

电子束增材制造过程中, 熔池尺寸变化对成形质量有很大影响。通过引入视觉设备, 可以实时采集制造过程中熔池形貌的图像信息。采集的信息一方面为制定增材制造工艺提供试验数据, 另一方面可以作为闭环控制系统的反馈信号, 对工艺参数进行适当调整。

自 2006 年开发出首台电子束熔丝增材制造设备后, 美国宇航局在 10 多年时间里对 EBF3 (electron beam freeform fabrication) 系统的监测进行了深入研究, 相继开发 5 种不同的成像装置: 内置 CMOS 相机、光纤 + 外置 CCD 相机、背散射探测器、内置 CCD 相机、内置短波红外 (SWIR) 相机。内置 CMOS 相机法将 CMOS 相机安装于真空室内电子

\* 基金项目: 工信部基金资助项目 (XX-079); 国家重点研发计划 (2017YFE0100100); 国家自然科学基金项目 (51675202)。

束枪的托架上,并提出两种放置方式:当相机置于熔池侧面,可采集熔池的高度和冷却路径信息(图1)<sup>[7]</sup>;当相机置于熔池上方时,相机可采集熔池形状和大小信息。CMOS相机具有体积小、重量轻、功耗低、集成度高等优点<sup>[8]</sup>。根据所拍图片发现:在恒定的功率和速度下,熔池的长度随堆积层数的增加而增加。

光纤+外置 CCD 相机法采用数字 CCD 相机和 CMOS 相机同时监测熔池。相较于 CMOS 相机,CCD 相机有空间分辨率高、读出噪声低、光电灵敏度高等特点。二者相结合对成形过程进行监测,可以更好地拍摄熔池形态<sup>[9]</sup>。两台相机置于真空室外,光学成像器与针孔摄像头置于真空室内,如图2<sup>[7]</sup>所示。CMOS 相机可以较高的帧速率运行,用于实时监测。CCD 相机以较慢的帧速率运行,具有高空间分辨率,用于检测送丝位置。但是由于电子束枪在真空室移动,光纤束进光端和出光端易损坏,相机无法永久集成在电子束设备上。

与前两种监测熔池形态不同,该方法监测背散射电子,因为增材制造过程中会产生大量的初级电子、次级电子、X 射线、中性粒子、离子和背散射电子。背散射探测器通过采集增材制造过程中的背散射电子获得图像,监测电子束熔丝沉积的高度和丝材相对电子束的位置。背散射探测器(BSES)安装于大型电子束增材制造真空室中,但是背散射探测器易受到金属蒸汽污染,成本较高,设备较笨重。

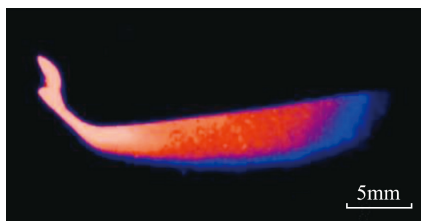


图1 CMOS相机置于熔池侧面所拍摄图像  
Fig.1 Image taken by CMOS camera on the side of molten pool

内置 CCD 相机法将 CCD 相机置于可滑动的支架上,实时监测制造过程中熔池的形态,为闭环控制系统提供重要数据,如图3<sup>[7]</sup>所示。该方法与标准值相比较,提取图像中的温度信息。在不同温度下,利用标定的黑体辐射源对近红外相机进行辐射特性表征,然后利用线性插值将辐射转换为温度。

内置短波红外相机法采用 SWIR 相机。NASA 开发潜望镜式摄像机组件实现小空间内对熔池成像。电子束枪的机械手有4个自由度,SWIR 相机垂直地连接到机器人手臂的前侧,两面镜子将图像指向相机,装置如图4<sup>[7]</sup>所示。由于空间的限制,系统的送丝位置大约在离45°机器人手臂的另一边<sup>[7]</sup>。Seufzer等<sup>[10]</sup>于2015年申请了电子束熔丝增材制

造过程中高度测量与控制的专利,提出了利用摄像机拍摄制造过程图片来测量电子束枪距离熔池表面的高度,通过闭环控制,实时调整,确保二者距离合适。同时也可以测量成形过程中凝固的熔积体高度。进行单点高度测量或多点测量绘制二维/三维表面的高度信息。在商用领域,Sciaky公司与NASA合作,推出电子束增材制造 EBAM 110 系统。采用 IRISS (Interlayer Realtime Imaging & Sensing System) 层间实时成像和感应闭环控制系统,实时调整金属沉积量,实现高精度和重复性,保证多个零件的形状、性能和金属组织一致,提高成品质量和产量。

张秉刚等<sup>[11]</sup>基于视觉传感法建立了熔池视觉传感系统(见图5,该系统包括 CCD 工业摄像机、工业变

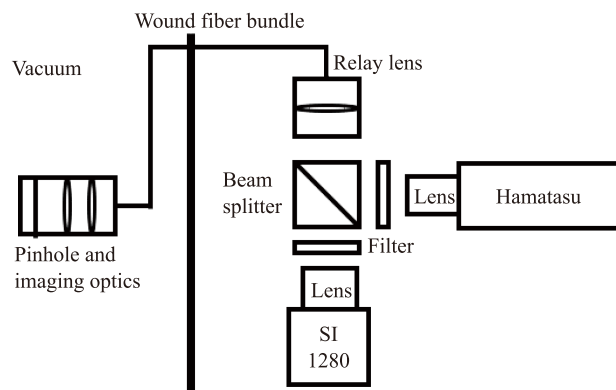


图2 光纤+外置CCD相机法装置示意图

Fig.2 Device schematic diagram of optical fiber+external CCD camera method

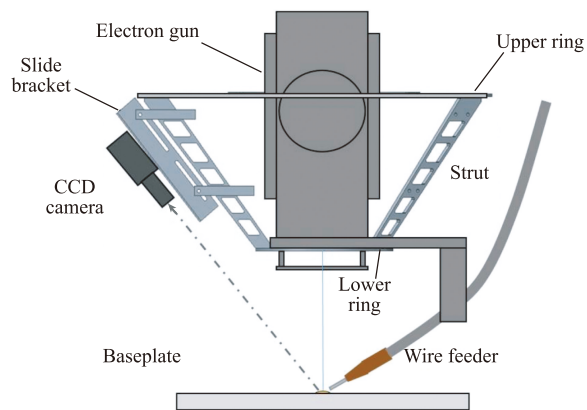


图3 内置CCD相机法装置示意图

Fig.3 Device schematic diagram of built-in CCD camera method

倍缩镜头、普通台式计算机、由防护片和窄带滤光片组成的复合滤光系统、摄像机防护罩等),采集钛合金电子束焊接熔池图像;采用二值形态学处理算法分析熔池图像,提取熔宽,揭示熔宽波动与成形表面之间的关系。赵健<sup>[12]</sup>基于CCD视觉传感系统监测熔池熔化过渡行为,系统地总结了“工艺—焊丝熔化过渡行为—成形”之间的关系。有国外学者采用CCD相机观察熔池、小孔、金属蒸汽和焊接试样表面的等离子体,使用光电二极管检测焊接试样的次级发射电子束(图6<sup>[13]</sup>);试验表明焊接热源的性质是非平稳的,熔池和小孔处于动态变化;在电子束焊接过程中,金属液的周期性流动、熔池和等离子体的动态过程对焊缝的形成起着主导作用<sup>[13-14]</sup>。

## 2 成形过程温度场监测

成形过程中温度分布不均匀是产生热应力、出现残余应力和残余变形的直接因素。严重情况下可能会开裂导致零件报废。通过对增材制造温度场在线监测并通过闭环控制,调整工艺参数可以有效减少因温度分布不均造成的制造缺陷。

NASA 兰利研究中心的 Zalameda 等<sup>[15-16]</sup>使用近红外(NIR)照相机对 EBF3 系统的熔池和凝固区域进行成像并测量其温度,如图7<sup>[15]</sup>所示。红外相机具有双重用途:根据温度与成形性能的关系,在制造过程中,检查、记录成形质量;作为闭环控制的反馈传感器。哈尔滨工业大学的树西<sup>[17]</sup>采用高速热电偶测温设备对电子束熔丝沉积过程部分点温度进行实时测量,验证了模拟结果的准确性。

樊志伟<sup>[18]</sup>、张朴等<sup>[19]</sup>基于几何光学、CCD 摄像机原理、辐射测温学与三基色原理,采用 CV-M77 摄像机机构构建焊接温度场实时测量系统如图8<sup>[19]</sup>所示。利用工件热辐射随温度变化单调上升的特性建立了电

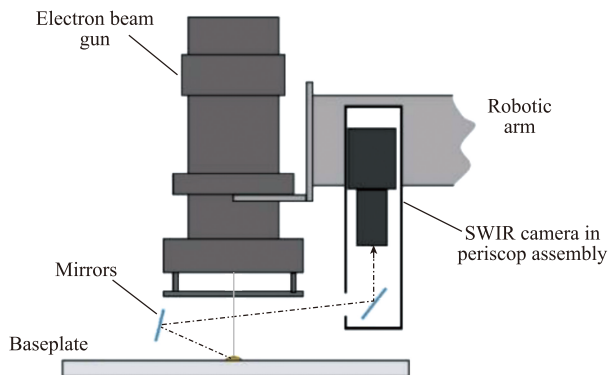


图4 便携式EBF3室中SWIR摄像机安装及光路原理图  
Fig.4 Schematic diagram of SWIR camera installation and optical path in portable EBF3 room

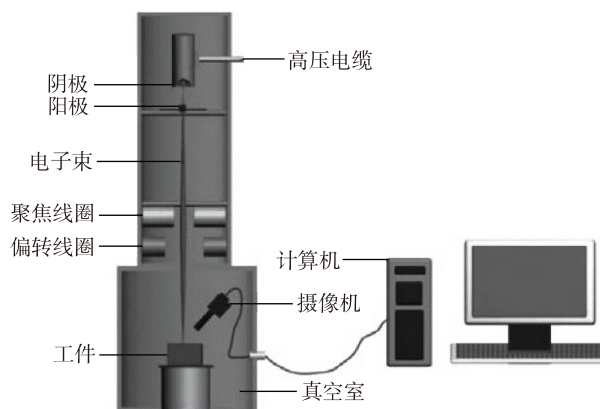


图5 熔池视觉传感系统

Fig.5 Molten pool vision sensing system

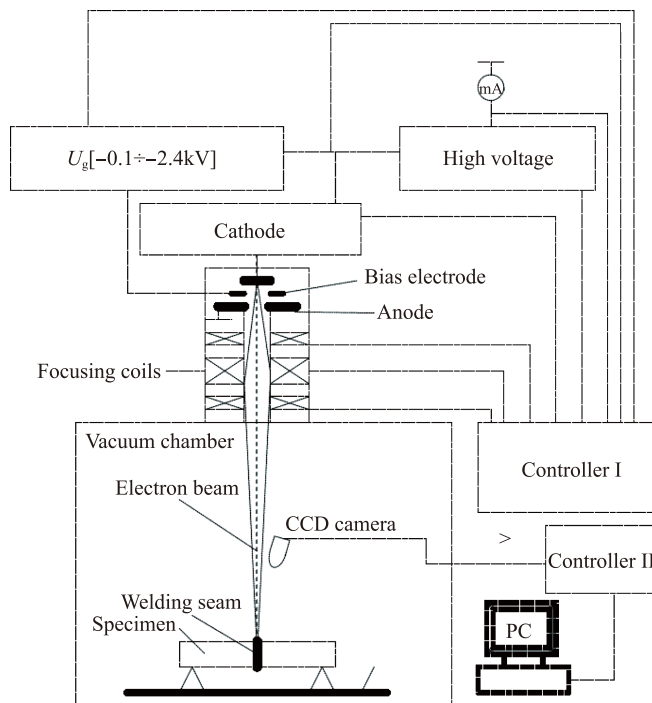


图6 试验设备连接图

Fig.6 Experimental equipment connection diagram

子束熔池温度场测量模型,可以根据所拍摄的图像采集熔池的温度信息。陈云霞等<sup>[20]</sup>通过温度采集装置实时得到被加工工件的温度信号,以自适应模糊PID控制器调节电子束流大小,实现对电子束快速成型温度的闭环控制。Gao等<sup>[21]</sup>采用Raytech MR1S双波长仪测量熔池中心的平均温度。Griffith等<sup>[22]</sup>使用数码相机和远镜头以及宽带滤波器捕捉熔池图像,其结果与热电偶和红外测量结果相似。

### 3 流动场监测

熔池的流动状态影响着成形过程中的传热、传质以及后续成形件的精度和质量,因此对于熔池流动状态进行实时监测可以为后续调整与控制成形过程提供重要参考<sup>[23]</sup>。

Arata等<sup>[24]</sup>采用X射线高速成像技术将图像转换器放在针孔后面,将X射线转换成可视图像,观察示踪元素钨在电子束熔池内的流动行为,研究表明熔池内不同位置钨元素的运动状态不同;随后又设计了一套高速X射线摄像装置,采用针孔照相机和高速胶片拍摄光束孔发出的X射线图像,实时观察电子束焊接过程的流动行为,图像采集装置如图9所示<sup>[25-26]</sup>;通过所拍摄的图像发现电子束并不总是与金属均匀地相互作用。Tsukamoto等<sup>[27]</sup>采用X射线和高速摄像分析熔池的流动状态,结果表明电子束焊接过程中钉尖缺陷的产生与焊接过程中周期性的熔化金属流动引起的小孔波动有关。周琦等<sup>[28]</sup>采用美国BIR公司生产的ACTIS 300工业CT检测系统研究电子束焊缝熔质密度分布和熔池流动行为。

### 电子束增材制造在线监测技术的发展方向

目前,对于电子束熔丝增材制造过程的监测研究尚处于发展阶段。而其他相关高能束加工技术的在线

监测已有较为深入的研究,这些研究可以为电子束熔丝增材制造的在线监测研究提供有益的参考和经验。

电子束熔丝增材制造的环境中存在金属蒸汽、噪声、电子、X射线、中性粒子、离子,可以为监测提供多种信号。除了采集成形过程的视觉和温度信号,还可以监测离子、二次电子等信号。Yuan等<sup>[29]</sup>采用离子收集器和X射线感应装置检测电子

束焊接过程中的电离电荷和X射线信号,利用主成分分析法(SVD)进行分析,将复杂的熔深判别问题转换成二维图谱的识别。Olszewska等<sup>[30]</sup>测量了焊接过程中主要存在的3种带电粒子(背散射电子、二次电子、离子),采用神经网络分析3种带电粒子的电流幅值,为电子束焊接的过程控制提供有用的信号参考。

现有的监测手段一般使用直接采集制造过程的信息并进行分析,未来可以采用引入信号并采集的方式进行监测。电磁超声监测技术由于具有非接触监测、可适用于超高温环境等特点,应用范围较广<sup>[31]</sup>。Dominguez等<sup>[32]</sup>采用相控阵超声技术,采集信号的最大振幅,判断制造缺陷。Crostack等<sup>[33]</sup>利用声发射技术对电子束焊接过程进行了检测,分析声发射信号可以检测出裂纹并确定其位置。本课题组将电磁振动技术应用于激光熔丝增材制造过程中丝材过渡状态,试验表明该监测方法可以区分液桥过渡和滴状过渡<sup>[34]</sup>。对于电子束熔丝增材制造可以尝试引入声、光、电、热等信号进行在线监测。

在增材制造过程中,堆积体每一层的成形质量会对下一层的成形产生重要影响,因此需要对制造后的堆积体进行及时监测,便于下一层成形过程中调整参数,达到较好的成形质量。陈念等<sup>[35]</sup>选用特定波长的滤光片和合适的取像时刻获得了清晰的熔池图像,将钨极偏离焊缝中心线的偏差量信号 $E$ 和方向信号 $D$ 作为反馈信号,进行反馈调节实现焊缝跟踪。瑞士SOU DRONIC公司将2台CCD相机分别置于焊缝的正面和背面,采集图像信息,通过分析图像实时获取焊缝高度尺寸、宽度和错边量等信息,作为反馈信号调节焊接参数。德国Pro-beam公司的电子束焊接设备会采集焊接过程中的二次反射电子,进行检测和跟踪焊缝。

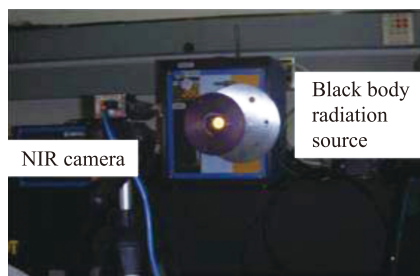


图7 近红外相机置于真空室内  
Fig.7 Near-infrared camera is placed in a vacuum chamber

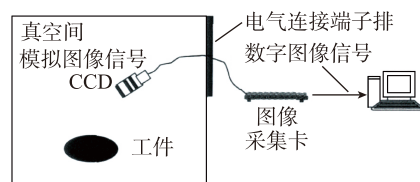


图8 真空电子束钎焊温度场测量系统结构图

Fig.8 Structure diagram of vacuum electron beam brazing temperature field measurement system

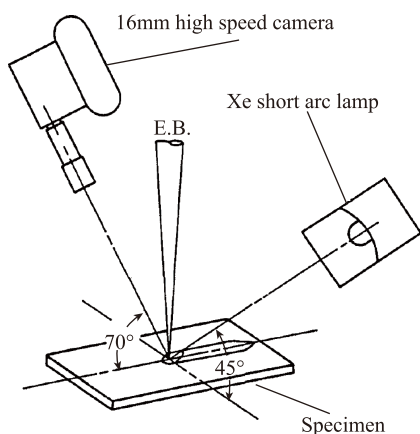


图9 高速摄像X射线装置示意图  
Fig.9 Schematic diagram of X-ray device for high speed camera

## 结论

在电子束熔丝增材制造过程中,通过监测成形过程,调节工艺参数,实现闭环控制,可以有效减少缺陷,提高成形精度和质量。电子束熔丝增材制造技术的研究及应用处于起步阶段,目前相关监测技术还不成熟。在未来,一些新的监测方式很可能用于电子束熔丝增材制造:(1)成形过程包含声音、光子、电子、X射线等,为监测提供了多种信号,在线监测制造过程中电子、离子等信号并找出信号与成形过程之间的联系,为控制成形过程提供参考;(2)引入新的信号进行在线监测;(3)对每一层堆积体的质量和层高进行实时跟踪;(4)多信号协同在线监测。这几种方式将为闭环控制系统提供准确的反馈信号及高精高效的控制成形过程,有利于电子束熔丝增材制造技术大范围推广应用。

## 参考文献

- [1] 关桥. 焊接/连接与增材制造(3D打印)[J]. 焊接, 2014(5): 1-8.
- GUAN Qiao. Welding/connection with additive manufacturing (3D printing)[J]. Welding & Joining, 2014(5): 1-8.
- [2] FRAZIER W E. Metal additive manufacturing: a review[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(6): 1917-1928.
- [3] 巩水利, 锁红波, 李怀学. 金属增材制造技术在航空领域的发展与应用[J]. 航空制造技术, 2013, 56(13): 66-71.
- GONG Shuili, SUO Hongbo, LI Huaixue. Development and application of metal additive manufacturing technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(13): 66-71.
- [4] 黄志涛, 锁红波, 杨光, 等. TC18钛合金电子束熔丝成形技术研究[J]. 航天制造技术, 2015(4): 14-17, 21.
- HUANG Zhitao, SUO Hongbo, YANG Guang. Study on TC18 titanium alloy by electron beam wire deposition[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2015(4): 14-17, 21.
- [5] KOLEVA E. Electron beam weld parameters and thermal efficiency improvement[J]. Vacuum, 2005, 77(4): 413-421.
- [6] TAMINGERK M, HAFLEYR A, et al. Electron beam freeform fabrication (EBF3) for cost effective near-net shape manufacturing: NASA/TM—2006—214284[R]. Washington: NASA, 2006.
- [7] TAMINGER K M, DOMACK C S, ZALAMEDA J N, et al. In-process thermal imaging of the electron beam freeform fabrication process[C]//SPIE Proceedings Vol. 9861: Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVIII. Palos Verdes: SPIE, 2016: 986102.
- [8] 程开富. CMOS图像传感器及应用[J]. 半导体光电, 2000, 21(S1): 25-28.
- CHENG Kaifu. CMOS image sensor and its applications[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2000, 21(S1): 25-28.
- [9] 王旭东, 叶玉堂. CMOS与CCD图像传感器的比较研究和趋势[J]. 电子设计工程, 2010, 18(11): 178-181.
- WANG Xudong, YE Yutang. Comparative research and future tendency between CMOS and CCD image sensor[J]. Electronic Design Engineering, 2010, 18(11): 178-181.
- [10] SEUFZER W J, HAFLEY R A. Height control and deposition measurement for the electron beam free form fabrication (EBF3) process: US9764415[P]. 2013-03-15.
- [11] 张秉刚, 石铭霄, 陈国庆, 等. 基于视觉传感的电子束深熔焊缝表面成形的预测[J]. 焊接学报, 2011, 32(12): 1-4, 36.
- ZHANG Binggang, SHI Mingxiao, CHEN Guoqing, et al. Prediction of weld appearance of electron beam deep penetration welding based on visual sensing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(12): 1-4, 36.
- [12] 赵健. 电子束填丝焊接熔化过渡行为及铜/钢焊接研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- ZHAO Jian. Study on behavior of melting wire transfer and copper/steel welding in electron beam welding with filler wire[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [13] PETROV P, PETROV G, PETROVA J, et al. Control of the weld pool formation during electron beam welding dissimilar materials[C]//International Conference of Advanced Manufacturing operation' 06. Sozopol, 2006: 201-205.
- [14] PETROV P, GEORGIEVA C, PETROV G. Experimental investigation of weld pool formation in electron beam welding[J]. Vacuum, 1998, 51(3): 339-343.
- [15] ZALAMEDA J N, BURKE E R, HAFLEY R A, et al. Thermal imaging for assessment of electron-beam freeform fabrication (EBF3) additive manufacturing deposits[C]//SPIE Proceedings Vol. 8705: Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXV. International Society for Optics and Photonics. Palos Verdes: SPIE, 2013.
- [16] TAMINGER K M, HAFLEY R A, MARTIN R E, et al. Closed-loop process control for electron beam freeform fabrication and deposition processes: US 8452073[P]. 2013-05-28.
- [17] 树西. 304不锈钢电子束熔丝沉积工艺及稳定性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- SHU Xi. Research on technology and stability of 304 stainless steel electron beam freeform fabrication[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [18] 樊志伟. 基于CCD的焊接温度场实时检测系统[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- FAN Zhiwei. Real-time measurement system of welding temperature field based on CCD[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [19] 张朴, 孔力, 刘文中, 等. 电子束焊接温度场实时监测系统[J]. 工业仪表与自动化装置, 2008(5): 20-22.
- ZHANG Pu, KONG Li, LIU Wenzhong, et al. A real-time temperature field monitoring system designed for electron beam welding[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2008(5): 20-22.
- [20] 陈云霞, 姚舜. 电子束快速成型温度自适应模糊PID控制系统[J]. 控制工程, 2009, 16(1): 56-58.
- CHEN Yunxia, YAO Shun. Electron beam rapid prototyping temperature adaptive fuzzy PID control system[J]. Control Engineering of China, 2009, 16(1): 56-58.
- [21] GAO Y Q, XING J, ZHANG J, et al. Research on measurement method of selective laser sintering (SLS) transient temperature[J]. Optik—International Journal for Light and Electron Optics, 2008, 119(13): 618-623.

- [22] GRIFFITH M L, SCHLIENGER M E, HARWELL L D, et al. Understanding thermal behavior in the LENS process[J]. *Materials & Design*, 1999, 20(2/3): 107–113.
- [23] 陈彬斌. 电子束熔丝沉积快速成形传热与流动行为研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- CHEN Binbin. An investigation of heat transfer and fluid flow behaviors in electron beam freeform fabrication[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [24] ARATA Y, FUJISAWA M, ABE E. A study on dynamic behaviours of electron beam welding (Report I): the observation by a fluoroscopic method[J]. *Transactions of JWRI*, 1976, 5(1): 1–9.
- [25] TOMIE M, ABE N, ARATA Y. Tandem electron beam welding (Report IX): high speed tandem electron beam welding (physics, process, instrument & measurement)[J]. *Transactions of JWRI*, 1989, 18(2): 175–180.
- [26] ARATA Y, ABE N, YAMAMOTO S. Tandem electron beam welding (Report III): analysis of front wall of beam hole by beam hole X-ray observation method (welding physics, processes & instruments)[J]. *Transactions of JWRI*, 1980, 9(1): 1–10.
- [27] TSUKAMOTO S, IRIE H. Melting process and spiking phenomenon in electron beam welding[J]. *Transactions of the Japan Welding Society*, 1993, 24: 18–23.
- [28] 周琦, 刘方军. 电子束深熔焊熔质密度分布与熔池流动行为[J]. *焊接学报*, 2001, 22(5): 17–20.
- ZHOU Qi, LIU Fangjun. Behaviors of element's density distribution and melting metal flow in electron beam deep penetration welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2001, 22(5): 17–20.
- [29] YUON C S, HYU B J. Analysis of ion and X-ray time series measurements of electron beam welding for development of online monitoring[C]//*Proceedings of 1999 IEEE/SICE/RSJ International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*. New York: IEEE, 1999: 221–225.
- [30] OLSZEWSKA K, FRIEDEL K. Control of the electron beam active zone position in electron beam welding processes[J]. *Vacuum*, 2004, 74(1): 29–43.
- [31] 杨平华, 高祥熙, 梁菁, 等. 金属增材制造技术发展动向及无损检测研究进展[J]. *材料工程*, 2017, 45(9): 13–21.
- YANG Pinghua, GAO Xiangxi, LIANG Jing, et al. Development trend and NDT progress of metal additive manufacture technique[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2017, 45(9): 13–21.
- [32] DOMINGUEZ N, FEUILLARD V, JENSON F, et al. Simulation assisted pod of a phased array ultrasonic inspection in manufacturing[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2012, 1430(1): 1765–1772.
- [33] CROSTACK H A, REUSS G, BACH F W, et al. Nondestructive control of the electron beam (EB) welding process by means of acoustic emission (AE)[C]//*Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No. 98CH36200)*. New York: IEEE, 1998: 2366–2370.
- [34] 黄安国, 刘博, 郑增超, 等. 激光熔丝增材制造丝材过渡状态的电磁振动监测方法[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(2): 34–40.
- HUANG Anguo, LIU Bo, ZHENG Zengchao, et al. Electromagnetic vibration monitoring method for liquid transfer mode in wire feeding based laser additive manufacturing (WFLAM)[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(2): 34–40.
- [35] 陈念, 孙振国, 陈强. 基于视觉图像传感的精密脉冲TIG焊焊缝跟踪[J]. *焊接学报*, 2001, 22(4): 17–20.
- CHEN Nian, SUN Zhenguo, CHEN Qiang. Seam tracking of precision pulsed TIG welding based on visual image sensing[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2001, 22(4): 17–20.

通讯作者: 庞盛永, 博士、副教授、博士生导师, 研究方向为材料成形模拟、材料激光加工、焊接工艺与装备, E-mail: spang@hust.edu.cn。

## Development Status of On-Line Monitoring Technology for Electron Beam Freeform Fabrication

GUO Jiaqi, HUANG Anguo, HUANG Kang, PANG Shengyong

(State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

**[ABSTRACT]** In this paper, the development status of on-line monitoring for the electron beam freeform fabrication are introduced, mainly focusing on the monitoring of the molten pool morphology, the temperature field of forming process and the flow field, with emphasis on the monitoring of the molten pool morphology during the manufacture. At the same time, the prospects of on-line monitoring for the electron beam freeform fabrication are presented, (1) online monitoring the signals of electronic and ion; (2) introduce new signals for online monitoring; (3) real-time tracking each layer's the quality and height of deposit body; (4) multi-signal collaborative online monitoring.

**Keywords:** Additive Manufacturing; Electron beam freeform fabrication; On-line monitoring; Molten pool morphology; Temperature field; Flow field

(责编 逸飞)