DOI: 10.3901/JME.2019.15.017

交叉件 GTA 填丝增材制造弧压检测与成形控制*

朱贝贝 熊俊

(西南交通大学材料先进技术教育部重点实验室 成都 610036)

摘要: 基于电弧电压与弧长的关系特征, 提出 GTA 填丝增材制造弧压检测与成形质量控制方法, 以解决交叉结构件成形稳定性差和堆积路径交叉处产生严重凸起的难题。考虑到弧压干扰的影响, 采用基于小波包的防脉冲干扰滑动平均滤波方法, 有效滤除原始弧压波形中的杂波信号, 并保证波形的平滑性。针对复杂且时变的 GTA 填丝增材制造系统, 设计积分分离 PID 控制器并整定其参数, 对比研究恒规范和闭环控制试验下的交叉件成形质量。结果表明, 弧压实时检测与送丝速度闭环调控策略, 可有效增强交叉件 GTA 填丝增材制造稳定性并解决交叉点凸起难题, 弧压信号检测准确, 成形控制精度高。

关键词: 交叉件; GTA 填丝增材制造; 小波包; 防脉冲干扰滑动平均滤波; 积分分离 PID 控制器

中图分类号: TG156

Arc Voltage Detection and Forming Control for Crossing Parts in GTA Additive Manufacturing

ZHU Beibei XIONG Jun

(Key Laboratory of Advanced Technologies of Materials, Ministry of Education,
Southwest Jiaotong University, Chengdu 610036)

Abstract: Based on the correlation between arc voltage and arc length, a method for arc voltage detection and forming control in GTA additive manufacturing is proposed to solve the problems of process instability and serious protrusion at the crossover of depositing path for crossing parts. Considering the influence of interferences, the original voltage signal is filtered by a new de-noising method of anti-impulse interference moving average based on wavelet packet, which can effectively filter out the disturbances in the original signal and ensure the smoothness of the waveform. For a complex and time-variant GTA additive manufacturing system, an integral separation PID controller is designed and its parameters were adjusted. Depositions with constant wire feed speed and closed-loop control are compared to analyze the forming quality of crossing parts. The results show that arc voltage online detection and closed-loop adjustment of the wire feed speed can effectively increase the process stability and solve the problem of protrusion at the crossover on deposition path for crossing parts in GTA additive manufacturing, and accurate arc voltage detection as well as high control accuracy can be obtained.

Key words: crossing parts; GTA additive manufacturing; wavelet packet; anti-impulse interference moving average filter; integral separation PID controller

0 前言

金属构件增材制造基于离散-堆积原理成形三维实体, 具有生产周期短和材料利用率高的显著优点^[1]。其常用的热源有激光^[2]、电子束^[3]和电弧^[4]三种, 激光增材制造的能量利用率较低, 电子束增材制造需要高真空环境, 相比于前两者, 电弧增材制

造(Wire and arc additive manufacturing, WAAM)以高效率、低成本的特点, 在大尺寸金属构件制造上极具优势^[5-6]。钨极氩弧(Gas tungsten arc, GTA)填丝增材制造是 WAAM 的一种重要载能束形式, 其以 GTA 电弧作为热源熔化外加辅助丝材成形金属构件, 有着电弧稳定、堆积电流与送丝速度可独立调节、成形精度高、构件组织及力学性能优良等显著优点, 因而在复杂金属构件的高品质制造上应用前景诱人^[7-8]。

交叉件^[9]是复杂金属构件的一种典型结构形式, 即在同一层内堆积路径存在交叉的成形件, 其

* 国家自然科学基金(61573293, 51505394)和国家重点研发计划(2016YFB1100202)资助项目。20180826 收到修改稿, 20190316 收到修改稿

GTA 填丝增材过程中, 路径交叉点处会出现重复堆积, 致使该处产生凸起。特别是多层堆积后, 凸起严重增高, 造成导丝管与堆积层表面碰撞, 更严重的情况是钨极与熔池接触, 堆积过程将无法继续进行。另外, 根据增材制造的基本理念, 每堆积一层, GTA 枪会抬升一个分层切片高度, 但工艺参数波动、层间温度和基板状态等干扰会造成每一层的实际堆积高度与分层切片高度不符, 多层累积后, 交叉件成形过程极不稳定。为解决上述技术难题, 亟需开展交叉结构件成形过程控制研究。

从目前国内文献来看, 控制成形过程稳定性的手段主要包括工艺方法优化和成形过程检测与控制两大类。在工艺方法优化方面, KARUNAKARAN 等^[10]采用电弧填丝增材与数控铣削相结合的复合增材制造方法, 即每成形一层, 将层片表面铣削一定深度, 通过“增量”和“减量”工位频繁切换实现构件生长精度的控制, 考虑到成形过程的稳定性, 仅将铣削系统集成到 WAAM 中是不够的, 其控制过程比较被动, 且以牺牲成形效率和成本为代价来提高成形精度。MEHNEN 等^[11]分析了不同堆积路径下, 随堆积层增加, 交叉件产生凸起的大小, 提出可以通过路径优化方式解决交叉件堆积产生凸起的难题, 但成形件路径交叉处容易出现冶金结合问题。在成形过程检测与控制方面, 可利用各种传感器获得的检测信息进行成形过程控制, 过程检测手段众多, 例如红外传感^[12]、视觉传感^[13-14]和电参数传感^[15]等。YANG 等^[16]利用红外热像仪捕获了 GMA(gas metal arc)增材制造过程的堆积层表面温度, 进而通过调节冷却时间控制成形的稳定性, 然而红外传感设备昂贵且体积较大, 因而应用受限; 视觉传感检测方法信息量丰富, 可直接获得堆积层宽度、弧长或堆积层高度等特征参量, 不失为成形过程检测的一种有效手段, XIONG 等^[17]利用视觉传感检测 GMA 增材制造过程喷嘴到堆积层表面距离, 进而控制成形高度。但是在交叉结构件制造过程中, 因成形路径复杂, 视觉传感器易与堆积层发生碰撞, 且值得注意的是, 这种检测方法存在一定的滞后性, 因而成形控制精度难以得到提高。

考虑到电参数传感是一种虚拟检测方法, 检测过程不受复杂设备的限制, 检测信息位于电弧正下方, 故几乎不存在滞后。本文以十字交叉件为对象, 开展 GTA 填丝增材制造弧压检测与过程参数在线调节研究, 实时控制交叉件成形, 解决交叉件 GTA 填丝增材制造路径交叉处产生明显凸起的难题。

1 试验系统

1.1 硬件组成

如图 1 所示, GTA 填丝增材制造试验系统主要包括 Fronius MagicWave 3000 焊机、MOTOMAN 机器人和固定在其法兰盘末端的 GTA 枪、ROB5000 接口、USB5831 数据采集卡、工控机、KD4010 送丝机。焊机为增材制造系统提供熔丝能量, 机器人控制 GTA 枪的行走速度和行走路径, ROB5000 负责电参数的反馈与外控, 数据采集卡发出模拟电压经 ROB5000 接口实现焊机工艺参数的控制, 工控机负责增材制造过程数据显示与保存以及检测与控制过程的启停。

图 1 GTA 填丝增材制造试验系统示意图

1.2 软件组成

图 2 为自主设计的交叉件 GTA 填丝增材制造电弧电压实时检测与成形控制系统人机交互界面, 包括四个部分: 参数显示模块、参数设定模块、检测与控制模块、数据保存模块, 该界面基于 Microsoft Visual Studio 2010 软件平台开发。

图 2 弧压检测与成形控制系统的软件界面

1.3 试验材料与工艺

成形基板是尺寸为 200 mm×200 mm×5 mm 的 Q235B 低碳钢, 填充丝材是直径为 1.2 mm 的 JQ-MG70S-6 低碳合金钢焊丝。多层薄壁十字交叉件堆积的试验具体工艺参数如下: 采用前端送丝模式, 成形电流为直流 150 A, 初始送丝速度为 1.0 m/min, GTA 枪行走速度为 3.5 mm/s, 钨极尖端到基板表面的初始

距离是4 mm,保护气为纯氩,其气流量为9 L/min,若无特殊说明,以下试验的过程参数均如上所示。

2 电弧电压采集与滤波处理

采集到的原始电弧电压信号存在许多干扰,考虑到小波包分析可有效滤除尖峰信号,防脉冲干扰滑动平均滤波可保证波形的平滑性,本文采用一种新的基于小波包的防脉冲干扰滑动平均滤波算法,并分析其滤波处理效果。

2.1 电弧电压信号的采集

图3中虚线为利用电弧传感系统采集的弧长为

(a) 小波包分析

(b) 防脉冲平均滑动滤波

(c) 基于小波包的防脉冲干扰滑动平均滤波

图3 去噪处理算法对电压信号处理结果

4 mm的一段原始弧压信号,从图中可以看出,其基本围绕一条直线上下波动,且存在很多杂波干扰。杂波的产生与钨极尖端的燃烧、电弧稳定性、电弧负载自身的特点所产生的气流稳定性、基板表面状态有关^[18]。杂波的存在势必导致弧压检测不准确,只有得到能够真正反映弧长的弧压信号,才能对堆积高度进行精确控制。因此,需要对原始弧压信号进行滤波处理。

在滤波处理方面,根据信号特点的差异可采用不同的滤波方法。小波包分析可有效去除复杂信号的随机非平稳杂波^[19],但消噪结果不平滑,而防脉冲干扰滑动平均滤波方法可以保证信号的平滑性。为此,本文提出一种基于小波包的防脉冲干扰滑动平均滤波方法。

2.2 基于小波包的防脉冲干扰滑动平均滤波原理

在采集的电弧电压信号中,有变化平稳的信号,而尖峰信号通常为干扰信号,需要先进行小波包分析去除尖峰干扰,后进行防脉冲干扰滑动平均滤波处理保证波形的平滑性。选定一个小波包,确定其分解层次 l ,对信号进行小波包分解,软阈值量化所得小波包分解系数,重构量化后的小波包分解系数,得到去除干扰的弧压信号,进一步对其进行防脉冲干扰滑动平均滤波处理,得到无干扰的平滑的弧压信号。基于小波包的防脉冲干扰滑动平均滤波的具体原理如下^[20]。

定义子空间 U_j^n 为函数 $u_n(t)$ 的闭包空间,设 $g_j^n(t) \in U_j^n$, $g_j^n(t)$ 则可表示为

$$g_j^n(t) = \sum_l d_l^{j,n} u_n(2^j t - l) \quad (1)$$

式中, j 为尺度因子; n 为非负整数; l 为小波包分解层数; $d_l^{j,n}$ 为小波包系数。选择一个小波,进行离散序列的小波包分解,得到分解系数 $\{d_l^{j,2n}\}$ 和 $\{d_l^{j,2n+1}\}$ 。

$$\begin{cases} d_l^{j,2n} = \sum_k h_{k-2l} d_k^{j+1,n} \\ d_l^{j,2n+1} = \sum_k g_{k-2l} d_k^{j+1,n} \end{cases} \quad (2)$$

式中, h_{k-2l} 为尺度函数; g_{k-2l} 为小波函数。

选择合适的阈值 δ_1 和 δ_2 ,对小波分解系数 $\{d_l^{j,2n}\}$ 和 $\{d_l^{j,2n+1}\}$ 进行软阈值取舍

$$\{D_l^{j,2n}\} = \begin{cases} \text{sgn}(\{d_l^{j,2n}\}) (|\{d_l^{j,2n}\}| - \delta_1) & |\{d_l^{j,2n}\}| \geq \delta_1 \\ 0 & |\{d_l^{j,2n}\}| < \delta_1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\{D_l^{j,2n+1}\} = \begin{cases} \text{sgn}(\{d_l^{j,2n+1}\}) (|\{d_l^{j,2n+1}\}| - \delta_2) & |\{d_l^{j,2n+1}\}| \geq \delta_2 \\ 0 & |\{d_l^{j,2n+1}\}| < \delta_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\{D_l^{j,2n}\}$ 和 $\{D_l^{j,2n+1}\}$ 是软阈值取舍后的小波包分解系数。

随后, 需要对小波包分解系数进行重构, 公式如下

$$\{D_l^{j+1,n}\} = \sum_k [h_{l-2k} D_k^{j,2n} + g_{l-2k} D_k^{j,2n+1}] \quad (5)$$

进而获得小波包分析后滤除杂波干扰的电弧电压信号 $S'(N)$ 。从中选取前 P 个数据, 求其最大值和最小值 $S'(i)_{\max}$ 和 $S'(i)_{\min}$

$$S'(i)_{\max} = \max\{S'(1), S'(2), \dots, S'(P)\} \quad (6)$$

$$S'(i)_{\min} = \min\{S'(1), S'(2), \dots, S'(P)\} \quad (7)$$

去掉所选 P 个数据的最大值和最小值, 对剩下 $P-2$ 个数据取平均值, 作为第 i 个数据的消噪结果 $S''(i)$ 。

$$S''(i) = \left[\sum_{i=1}^N S'(i) - S'(i)_{\max} - S'(i)_{\min} \right] / (P-2) \quad (8)$$

将 P 个数据的首个数据移除, 选取 P 个数据后的首个数据作为下一次处理数据的最后一个值, 依次循环得到平滑无干扰的防脉冲干扰滑动平均消噪结果 $S''(N)$ 。

2.3 电弧电压信号的处理

图 3 为基于小波包的防脉冲干扰滑动平均滤波算法的处理结果, 虚线部分是原始弧压信号, 其存在许多尖峰信号的干扰, 严重影响检测信号的准确性, 并制约后闭环控制效果, 实线是滤波算法的处理结果, 可以看出, 小波包分析滤除了绝大部分的尖峰信号, 如图 3a 所示; 随后的防脉冲干扰滑动平均滤波很好保证了原始信号的锯齿形状, 如图 3b 所示; 图 3c 为两种算法相结合的滤波算法处理结果, 可以看出, 基于小波包的防脉冲干扰滑动平均滤波算法兼具图 3a、3b 两种滤波算法的优势, 不仅可以有效地滤除原始弧压信号中随机非平稳杂波, 还可以取得很好的滤波处理效果, 新弧压峰值谷值距离的一半约为 0.02 V, 故此, 所用滤波算法可以提高电弧电压检测的准确性。

3 交叉件成形控制对比试验

基于上述对采集信号的处理结果, 首先开展薄壁交叉件成形恒规范试验, 设计无超调且精度高的积分分离 PID 控制器, 以开展薄壁十字交叉件成形闭环控制试验, 对比研究交叉件成形控制系统以及控制器的控制效果。

本文恒规范和闭环控制试验所堆积的成形件均

如图 4 所示, 交叉件的两个成形道分别命名为 A 道和 B 道, 采用以下工艺参数: 起弧等待 1.5 s 以填补起弧端和熄弧端熔池流淌而造成的塌陷, 相邻层间采用交错式成形方式保证堆积道两端都能进行熔覆金属填补, A、B 道间等待 120 s, 每堆积完一层, GTA 枪自动抬高 0.7 mm。试验过程中, 电弧电压信号检测周期为 0.1 s, 并采用上述滤波算法滤除干扰信号, 滤波算法耗时不超过 45 ms, 控制系统的控制周期为 0.5 s。

图 4 十字交叉件形状

3.1 交叉件成形恒规范试验

首先进行了薄壁交叉件的恒定送丝速度 (1 m/min) 成形试验, 共堆积了 18 层, A 和 B 道的堆积长度分别为 160 mm。图 5 为堆积至 19 层时交叉件与 GTA 枪位置关系, 可以看出, 在堆积路径交叉处, 具有明显的凸起, 导丝管和堆积层表面碰撞, 薄壁交叉件堆积过程无法继续进行。

图 5 恒规范试验第 19 层交叉件与 GTA 枪位置关系

图 6 为恒规范试验堆积第 18 层 B 道时的弧压变化曲线, 从图中可以看出, 曲线两端的电弧电压

图 6 恒规范试验第 18 层 B 道的弧压变化

值明显高于正常堆积的弧压值 13 V, 原因是起弧和熄弧处会产生熔池的流淌, 导致交叉件端部弧长增大。当 GTA 枪行走至堆积路径的交叉处, 造成重复堆积, 而产生图 5 所示凸起, 因而图 6 中曲线中间位置的电弧电压值很低, 约为 9 V。

为解决上述交叉件恒规范成形产生凸起的难题, 需要设计一个闭环控制器, 对交叉件成形过程进行实时控制。

3.2 积分分离 PID 控制器设计

PID 是工业中被普遍应用的控制器, 其控制规律如下

$$u(t) = k_p \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + \frac{T_D}{dt} \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (9)$$

式中, $u(t)$ 为控制量; $e(t)$ 为被控量偏差; k_p 为比例系数; T_I 为积分时间常数; T_D 为微分时间常数。

为避免系统存在过大的超调, 本文选择了积分分离 PID 控制器, 在积分项前乘 β , 写成积分分离式

$$u(t) = k_p \left(e(t) + \beta \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + \frac{T_D}{dt} \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (10)$$

根据实验具体情况, 设定阈值 m_1 和 m_2 , 确定积分项系数 β , 具体设计如下

$$\begin{cases} |e(t)| < m_1 & \beta = 1 \\ m_1 \leq |e(t)| \leq m_2 & \beta = 0.6 \\ |e(t)| > m_2 & \beta = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中, $m_1=0.2$; $m_2=0.8$ 。以送丝速度为控制变量, 电弧电压为被控变量, 送丝速度增量 $\Delta v(t)$ 的表达式为

$$\begin{aligned} \Delta v(t) &= k_p e_p + \beta k_i e_i + k_d e_d \\ e_p &= e(t) - e(t-1) \\ e_i &= e(t) \\ e_d &= e(t) - 2e(t-1) + e(t-2) \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $e(t-1)$ 为 $t-1$ 时刻弧压偏差; $e(t-2)$ 为 $t-2$ 时刻的弧压偏差; k_p 是象征意义的比例系数, k_i 是象征意义的积分系数, k_d 是象征意义的微分系数。

3.3 交叉件成形闭环控制试验

为解决上述 GTA 填丝增材制造难题, 开展薄壁交叉结构件成形闭环控制试验, 共堆积了 28 层, A 和 B 道的堆积长度分别为 180 mm。十字交叉结构件成形过程中, 实时采集堆积过程中的电弧电压值, 并进行滤波处理, 以送丝速度为控制变量, 电弧电压为被控变量, 对堆积过程进行实时的积分分离

PID 控制。

图 7 为堆积第 18 层时检测的 A 道和 B 道的电弧电压以及送丝速度的曲线, 可以看出, 从图中开始闭环控制时刻起, 检测电弧电压一直围绕设定电弧电压 11.5 V 上下波动, 若检测电弧电压具有下降的趋势, 送丝速度立刻减少, 相反, 检测弧压较大时, 送丝机构会立刻响应, 增大送丝对弧压进行实时控制, 且电弧电压检测曲线均方差在 0.2 V 以内。图 8 为堆积 29 层时交叉件与 GTA 枪位置关系, 导丝管未与交叉件碰撞。

图 7 闭环控制第 18 层的电弧电压及送丝速度曲线

图 8 闭环控制第 29 层交叉件与 GTA 枪位置关系

图 9 为恒规范与闭环控制试验成形件的对比, 可见, 采用闭环控制策略后, 交叉点处无凸起, 起弧和熄弧点处塌陷减少, 成形件表面较为平整, 控

制效果较好。

(a) 恒规范试验 (b) 闭环控制试验
图 9 恒规范与闭环控制试验成形件对比

本文虽然很好地解决了交叉件增材制造产生凸起的难题，但采用的弧压传感方法难以精确地检测和表征堆积层高度。其次，本研究仅开展了一组成形电流下的交叉件成形试验，倘若需要研究不同成形电流对交叉件凸起点控制效果的影响，需要重新标定不同成形电流下的弧压与弧长关系式。

4 结论

(1) 设计了交叉件 GTA 填丝增材制造过程实时监测与成形控制的硬件系统与软件界面，实现了电弧电压的采集和在线实时滤波处理，以及工艺参数的外控。

(2) 开发了一种基于小波包的防脉冲干扰滑动平均滤波算法，并进行滤波效果分析。结果表明，该算法可以有效滤除绝大部分的尖峰信号，并避免滤波结果呈矩形方波状，提高了检测的准确性。

(3) 设计了一种积分分离 PID 控制器，并进行了恒规范和闭环控制对比试验。结果表明，控制系统与积分分离 PID 控制器可有效控制堆积过程电弧电压，解决增材制造交叉件产生凸起和成形稳定性差的难题，电弧电压曲线均方差在 0.2 V 以内，控制精度高。

参 考 文 献

[1] MUGHAL M P, FAWAD H, MUFTI R A. Three-dimensional finite-element modelling of deformation in weld-based rapid prototyping [J]. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2006, 220(6): 875-885.

[2] de LIMA M S F, SANKARE S. Microstructure and mechanical behavior of laser additive manufactured AISI 316 stainless steel stringers [J]. Materials and Design, 2014, 55: 526-32.

[3] TAMINGER K M B, HAFLEY R A. Characterization of 2219 aluminum alloy produced by electron beam freeform

fabrication [C]//Proceedings of 13th SFF Symposium, 2002: 482-489.

- [4] KAZANAS P, DEHERKAR P, ALMEIDA P, et al. Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 2012, 226(B6): 1042-1051.
- [5] 卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D 打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化, 2013(4): 1-4.
- LU Bingheng, LI Dichen. Development of the additive manufacturing (3D printing) technology [J]. Machine Building & Automation, 2013(4): 1-4.
- [6] 柏久阳, 王计辉, 林三宝, 等. 电弧增材制造厚壁结构焊道间距计算策略[J]. 机械工程学报, 2016, 52(10): 97-102.
- BAI Jiuyang, WANG Jihui, LIN Sanbao, et al. Model for multi-beads overlapping calculation in GTA-additive manufacturing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(10): 97-102.
- [7] DING D, PAN Z, CUIURI D, et al. Wire-feed additive manufacturing of metal components: Technologies, developments and future interests [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81: 465-481.
- [8] BONACCORSO F, CANTELLI L, MUSCATO G. An arc welding robot control for a shaped metal deposition plant: Modular software interface and sensors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(8): 3126-3132.
- [9] 马倩, 马树元, 刘长猛, 等. 典型 TC4 框类结构 TIG 电弧增材制造工艺研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(1): 189-194.
- MA Qian, MASHUYUAN, LIU Changmeng, et al. Study on TIG arc additive manufacturing process of typical TC4 frame structure[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(1): 189-194.
- [10] KARUNAKARAN K P, SURYAKUMAR S, PUSHPA V, et al. Low cost integration of additive and subtractive processes for hybrid layered manufacturing [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010, 26(5): 490-499.
- [11] MEHNEN J, DING J, LOCKETT H, et al. Design study for wire and arc additive manufacture [J]. International Journal of Product Development, 2014, 19(1/2/3), 2-20.
- [12] SPENCER J D, DICKENS P M, WYKES C M. Rapid prototyping of metal parts by three-dimensional welding [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 1998, 212(3): 175-182.

- [13] XIONG J, ZHANG G. Online measurement of bead geometry in GMAW-based additive manufacturing using passive vision[J]. *Measurement Science & Technology*, 2013, 24(11): 5103.
- [14] WANG H, JIANG W, OUYANG J, et al. Rapid prototyping of 4043 Al-alloy parts by VP-GTAW [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 148(1): 93-102.
- [15] XU Y, LV N, ZHONG J, et al. Research on the real-time tracking information of three-dimension welding seam in robotic GTAW process based on composite sensor technology[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2012, 68(2): 89-103.
- [16] YANG D, WANG G, ZHANG G. Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 244: 215-224.
- [17] XIONG J, ZHANG G. Adaptive control of deposited height in GMAW-based layer additive manufacturing [J]. *Journal of Materials Processing Tech.*, 2014, 214(4): 962-968.
- [18] 王其隆. 弧焊过程质量实时传感与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- WANG Qilong. Real-time sensing and control of arc welding process quality [M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [19] WALCZAK B, MASSART D L. Noise suppression and signal compression using the wavelet packet transform[J]. *Chemometrics & Intelligent Laboratory Systems*, 1997, 36(2): 81-94.
- [20] 程正兴. 小波分析算法与应用[M]. 西安: 西安交通大学, 2004.
- CHENG Zhengxing. Wavelet analysis algorithm and application[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2004.

作者简介: 朱贝贝, 女, 1996 年出生。主要研究方向为电弧增材制造成形过程检测与控制。

E-mail: Pigbeibei@126.com

熊俊(通信作者), 男, 1986 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为电弧增材制造, 焊接过程传感与控制, 发表论文 30 余篇。

E-mail: xiongjun@home.swjtu.edu.cn