

激光视觉传感系统的电弧增材制造侧表面成形分析

马波, 高向东*, 黄怡洁, 张艳喜, 游德勇, 张南峰

广东工业大学广东省焊接工程技术研究中心, 广东 广州 510006

摘要 针对多层单道电弧增材制造侧表面成形检测问题,通过激光视觉传感三维重构系统获取不同焊接条件下焊缝侧表面轮廓深度点云信息,利用 RANSAC(Random Sample Consensus)和 KNN(K-Nearest Neighbors)点云处理算法提取堆积层侧表面的三维点云。分析多层单道焊缝堆积的层间分布情况,量化堆积层侧表面粗糙度,进而探索堆积过程中焊丝末端与板材间距对堆积层三维成形的影响。研究表明,激光视觉传感系统能够准确判断电弧增材侧表面成形情况,三维点云算法可用于电弧增材侧表面的三维重构和特征提取,能够直观地描述和量化堆积层的三维成形特征,为电弧增材制造表面成形检测和量化分析提供了一种新方法。

关键词 传感器; 激光视觉传感; 电弧增材; 三维特征; 表面粗糙度

中图分类号 TG455

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1102005

Side-Surface-Form Analysis of Arc Additive Manufacturing Based on Laser Vision Sensing System

Ma Bo, Gao Xiangdong*, Huang Yijie, Zhang Yanxi, You Deyong, Zhang Nanfeng
Guangdong Provincial Welding Engineering Technology Research Center, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China

Abstract A laser vision sensing three-dimensional (3D) reconstruction system has been designed to collect the surface-profile-depth point cloud information of the welded side surfaces under different welding conditions and to solve the problem of surface-form detection of the side surfaces obtained by using multi-layer single-channel arc additive manufacturing. Point cloud processing algorithms, such as RANSAC (Random Sample Consensus) and KNN (K-Nearest Neighbors), are used to extract the 3D point cloud of a deposition layer. We analyze the interlayer distribution of the multi-layer single-channel weld deposition, quantify a side-surface roughness of the deposition layer, and investigate the influence of the distance between the end of the welding wire and the plate on the 3D forming of the deposition layer. The results denote that the laser vision sensing system can accurately determine the surface-forming condition of the side surfaces obtained by using arc additive manufacturing. The 3D point cloud algorithm is used for 3D reconstruction and feature extraction of the side surfaces obtained by using arc additive manufacturing to visually describe and quantify the 3D forming features of the deposition layer, providing a novel method for performing surface-form inspection and quantitative analysis in case of arc additive manufacturing.

Key words sensing; laser vision sensing; arc additive; three-dimensional features; surface roughness

OCIS codes 280.3420; 100.2000; 150.6910

1 引 言

电弧增材技术具有低成本、高效率、高致密性等优点,在汽车、船舶、航空航天、军工等领域得到了广泛应用^[1]。电弧增材技术是一种以电弧为热源,焊丝为原材料,将焊丝快速熔化成高温液态金属,并以

熔滴过渡的方式层状堆积成形的技术^[2-4]。针对堆积过程中的热积累、散热条件差、熔池过热等问题,研究者在电弧增材过程中引入主动冷却技术来减少堆积层的热积累,提高堆积层的成形质量和效率^[5]。为研究不同焊接参数对多层单道薄壁件表面粗糙度的影响,设计研究方案,量化电弧增材制造的表面粗

收稿日期: 2019-05-28; 修回日期: 2019-06-18; 录用日期: 2019-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(51675104)、广东省教育厅创新团队项目(2017KCXTD010)

* E-mail: gaofd666@126.com

糙度^[6],对多层多道焊缝的成形过程进行数学建模,通过控制堆积层的成形尺寸获得最佳成形效果下的焊接参数^[7]。

利用视觉传感技术可检测焊接状态及焊缝成形质量^[8],而激光视觉传感技术是通过激光条纹的变形来获取焊缝形态信息的^[9],可有效保证接头质量^[10],实现焊接自动化。在电弧增材技术的发展过程中,研究者利用激光视觉传感技术,提出一种基于遗传算法的平面焊缝特征提取方法,该方法能够迭代地剔除噪声,快速获取激光条纹的准确位置和焊缝特征点坐标^[11]。针对坡口及焊缝表面提出一种基于激光视觉传感的三维轮廓测量方法,该方法可实现坡口及焊缝表面三维轮廓的实时测量,准确率较高^[12]。采用基于激光视觉传感的三维重建技术对焊缝增高和角变形等信息进行提取和质量评估,可实现对焊缝形状特征的定量(深度图和等高线图)和定性评价^[13]。

研究者大多利用图像处理技术提取焊缝堆积层的表面特征,或者使用激光视觉传感系统对焊缝进行三维重建,较少对提取后的三维点云进行相关数据处理。本文使用激光视觉传感系统对电弧增材制造堆积层的侧表面进行三维重建,重点研究堆积层侧表面三维形状的特征提取和表面粗糙度的量化方法。相较于焊缝轮廓的二维分析方法,三维点云处理方法能够更加直观、具体地对焊缝表面进行描述,为电弧增材制造表面成形检测和量化分析提供新方法。

2 电弧增材实验及成形测量

2.1 电弧增材实验

实验中采用熔化极气体保护焊接,装置如图 1 所示。实验材料为 Q235 板,尺寸为 300 mm ×

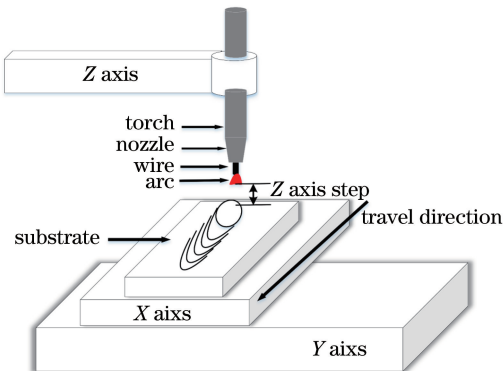


图 1 平板堆焊实验装置示意图

Fig. 1 Experimental device diagram of flat welding

100 mm × 5 mm,焊丝采用直径为 0.8 mm 的 ER50-6 碳钢类焊丝,保护气体采用体积分数为 98% 的 CO₂ 气体,气体流速为 10 L/min。焊接实验参数如表 1 所示,电弧增材过程中焊接电流和电压、送丝速度以及焊接速度保持不变,Z_{as} 为每堆积一层后 Z 轴方向焊丝末端到板材的距离,通过改变 Z_{as} 的大小调节电弧增材过程中的电流稳定性,从而改变堆积层侧表面的成形情况。

表 1 平板堆焊实验参数

Table 1 Experimental parameters of flat welding

Z _{as} /mm	Current /	Voltage /	Travel speed /	Deposition
	A	V	(mm·s ⁻¹)	layer
3	150	20	1.5	4
4	150	20	1.5	4
5	150	20	1.5	4
6	150	20	1.5	4
7	150	20	1.5	4
8	150	20	1.5	4

2.2 堆积层侧表面成形测量

堆积层侧表面成形检测装置如图 2 所示,测量装置主要由三自由度运动平台、激光视觉传感器、运动控制柜以及工控机组成。激光视觉传感装置如图 3 所示,主要由线激光发射器和以互补金属氧化物半导体(CMOS)为感光元件的相机组成,相机分辨率 1024 pixel × 768 pixel,采用焦距为 8 mm 的镜头,镜头外加波长为 625~665 nm 的窄带滤光片,线激光器发射波长为 650 nm,最小线宽为 0.8 mm。将工件侧放并固定于运动平台上,激光视觉传感器固定在工件上方,相机垂直于待测工件表面,通过工控机(IPC)控制运动平台沿 Y 轴方向扫描堆积层侧表面,同时激光视觉传感器采集扫描过程中的激光条纹图像并传递给工控机,通过图像处理算法获得侧表面轮廓的图像坐标,利用坐标转换公式得到堆积层的三维点云坐标。

2.3 测量系统标定实验

为实现堆积层侧表面的三维重建,必须对激光视觉传感器进行标定,建立图像坐标与世界坐标的转换关系,即图像像素偏差与实际空间位置偏差之间的关系。激光视觉传感器扫描过程中相机始终垂直于待测轮廓表面,在保证标定精度符合三维测量精度要求的前提下可以采用锯齿靶标线性标定法^[14]。如图 4 所示,锯齿间距为 10 mm,齿高为 5 mm,锯齿靶标整体长 45 mm,宽 60 mm。以 O 点为世界坐标系 O-X_wY_wZ_w 的原点。相机采集过程中图像的分辨率为 w × h,即在图像坐标系中 u 方

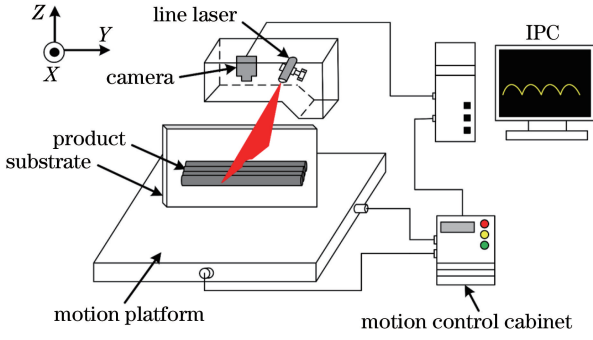


图 2 堆积层侧表面成形检测装置示意图

Fig. 2 Diagram of surface forming measurement device on the side of deposition layer

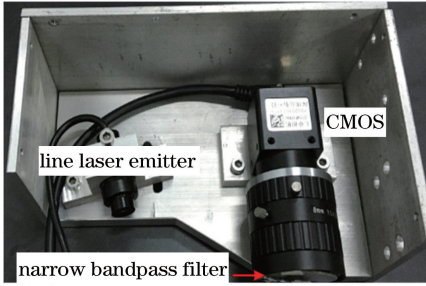
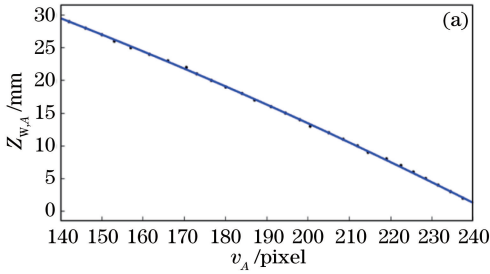


图 3 激光视觉传感装置实物图

Fig. 3 Physical diagram of laser vision sensing system

向的像素个数为 w , 世界坐标系中 X_w 方向的实际采集范围为 l 。若不考虑相机畸变, 理论上 X_w 方向的单位像素当量 $\rho_x = l/w$, 单位为 mm/pixel 。 Y_w 方向的进给当量与相机采集频率 f 、扫描速度



s 有关, 即 $\rho_y = s/f$, 单位为 $\text{mm}/(\text{frame} \cdot \text{s}^{-1})$ 。为了确定 X_w, Z_w 方向单位像素当量 ρ_x, ρ_z , 采用标准锯齿靶标进行标定。

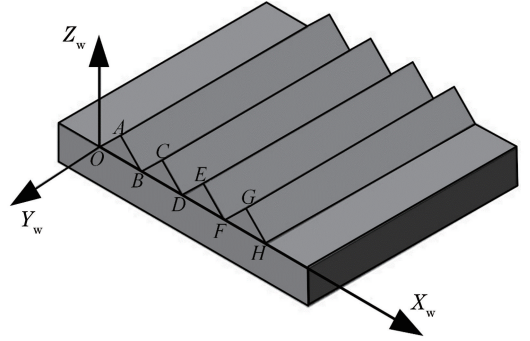


图 4 锯齿靶标示意图

Fig. 4 Diagram of sawtooth target

将锯齿靶标固定于运动平台上, X, Y 方向固定不动, 逐步调整 Z 轴的高度, 已知特征点 ($A \sim G$) 的世界坐标, 利用激光视觉传感系统采集并提取特征点的图像坐标。以特征起点 A 和终点 G 作为标定参考点, 已知 A 点的世界坐标为 $Z_{w,A}$, 两点间的实际距离为 d , 采用图像处理的方法计算出图像坐标系下 A 的像素坐标 (u_A, v_A) 以及 A, G 两个特征点的像素距离 Δ_u , 则 $\rho_x = \Delta_u/d$ 。 $Z_{w,A}$ 与 v_A, ρ_x 与 $Z_{w,A}$ 满足的关系如图 5 所示, 其相应的表达式为

$$Z_{w,A} = -0.0003613v_A^2 - 0.145v_A + 56.88, \quad (1)$$

$$\rho_x = -0.0006437Z_{w,A} + 0.1314. \quad (2)$$

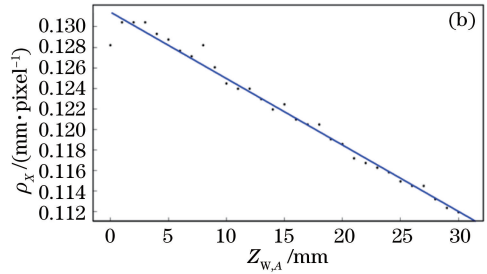


图 5 多项式拟合曲线。(a) $Z_{w,A}$ 与 v_A 二次拟合曲线; (b) ρ_x 与 $Z_{w,A}$ 线性拟合曲线

Fig. 5 Polynomial fitting curves. (a) Quadratic fitting curve of $Z_{w,A}$ and v_A

(b) linear fitting curve of ρ_z and $Z_{w,A}$

由于相机出现畸变, ρ_x 随着高度增加呈近似线性变化。假设激光视觉传感器采集的图像帧数序列为 n , 世界坐标系 $O-X_wY_wZ_w$ 与图像坐标系 $o-uv$ 的转换关系为

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_x \times u \\ \rho_y \times n \\ -0.0003613v^2 - 0.145v + 56.88 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

为获得激光视觉传感系统的测量精度, 对扫描后的标准锯齿靶标进行三维重建, 结果如图 6 所示。从锯齿靶标三维点云数据中随机抽取 5 组轮廓数据, 锯齿高和靶标宽度见表 2。锯齿高 4.85 mm, 平均误差为 0.15 mm。靶标宽 59.92 mm, 平均误差为 0.08 mm。此时锯齿靶标 Y_w 方向的进给当量 ρ_y 为 0.0307 $\text{mm}/(\text{frame} \cdot \text{s}^{-1})$, 共采集锯齿靶标轮廓 1460 frame, 所以锯齿长为 $0.0307 \times 1460 = 44.82$ mm, 误差为 0.18 mm。三维重建的整体误差

在 0.2 mm 以内,能够满足堆积层侧表面三维测量精度的要求。

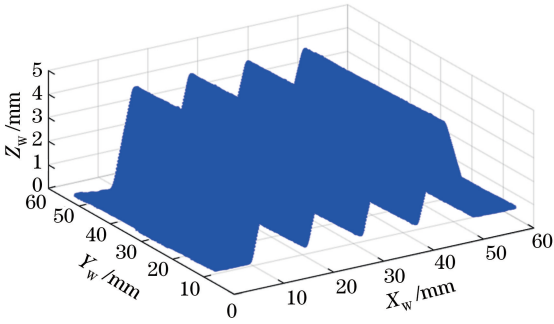


图 6 锯齿靶标三维重建图

Fig. 6 3D reconstruction of sawtooth target

表 2 锯齿靶标重复性测量结果

Table 2 Repeated temperature measurement of sawtooth target

Sequence number	1	2	3	4	5	Mean
Height of sawtooth (standard value of 5 mm) /mm	4.79	4.57	5.17	5.04	4.68	4.85
Width of sawtooth target (standard value of 60 mm) /mm	60.06	59.92	59.78	59.78	60.06	59.92

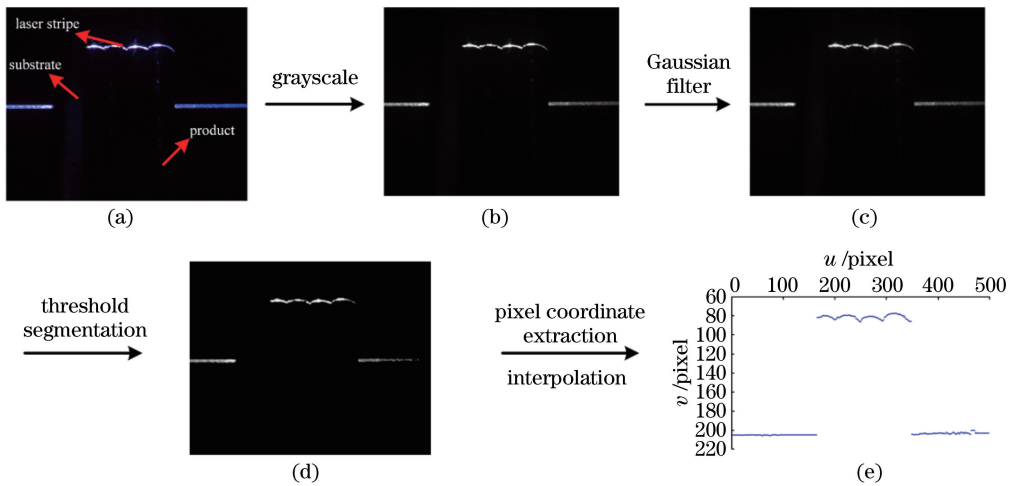


图 7 像素坐标提取流程图。(a)原始图像;(b)灰度图;(c)高斯滤波;(d)阈值分割;(e)像素坐标提取

Fig. 7 Flow chart of pixel coordinate extraction. (a) Original image; (b) grayscale image; (c) Gaussian filter; (d) threshold segmentation; (e) pixel coordinate extraction

1) 对预处理后的图像进行逐列扫描,寻找每一列中灰度值最大的像素点坐标,并将其设为 (x, y) , 其灰度值为 $p(x, y)$, 第 i 个相邻像素坐标为 $(x, y+i)$ 。

2) 利用灰度重心公式求得激光条纹中心线第 x 列的像素坐标 (u, v) 为

$$[u, v] = \left[x, \frac{\sum_{i=-3}^3 p(x, y+i) \times (y+i)}{\sum_{i=-3}^3 p(x, y+i)} \right] \quad (4)$$

3) 逐列扫描时,使用最近邻插值修复条纹断点,最终的提取结果如图 7(e)所示。

3 图像及三维数据处理

3.1 激光条纹图像像素坐标提取

激光条纹图像像素提取流程如图 7 所示。相机采集过程中的堆积层侧表面激光条纹图像如图 7(a)所示,对采集后的图像进行灰度化和高斯滤波处理后,图像仍然保留底板和堆积层的部分信息;从图 7(c)可以看出,激光条纹与底板、堆积层的灰度值差异明显;使用阈值分割方法提取激光条纹,结果如图 7(d)所示。此时提取的激光条纹图像每一列包含多个像素坐标,为了精确定位激光条纹像素坐标,使用基于极大值的灰度重心法提取激光条纹线的像素坐标。

3.2 堆积层侧表面三维信息处理

以 $Z_{as} = 6 \text{ mm}$ 为例,使用激光视觉传感系统对采集的堆积层侧表面图像进行像素坐标提取以及坐标转换,得到三维点云视图,如图 8(a)所示。使用 PCL(Point Cloud Library)点云库处理得到三维点云信息,原始点云数据为“PointXYZ”格式,此格式不含有深度颜色信息。使用 Cloud Compare^[15] 软件对三维点云进行可视化处理。为了突出焊缝侧面熔积层的成形特征,对原始点云视图进行深度渲染,结果如图 8(b)所示,生成具有颜色信息的“PointXYZRGB”格式的点云数据。

RANSAC(Random Sample Consensus)点云分

割算法可以有效分割出三维点云中的平面^[16],其基本思想是针对具体问题设计出一个判断准则(此处为平面模型),通过选取合适的距离阈值迭代剔除与平面模型参数不一致的点云。使用C++开发语言并结合PCL算法库,从原始的堆积层三维点云中分割底部平面。设置距离阈值为5 mm,最大迭代次数为10000次,剔除无效的的点云信息。迭代完成后提取出的点云平面如图8(c)所示,图8(d)所示为分离平面后得到的堆积层侧表面点云数据。采用点云分割算法得到的焊缝侧表面周围仍然存在一些稀疏

的离群点,利用KNN(K-Nearest Neighbors)算法计算出每个点的K领域均值,然后估计整个点云数据的均值和标准差,平均距离在标准范围(由全局距离和方差定义)之外的点被认为是从数据集中过滤掉的离群点。经KNN算法过滤后得到侧表面三维点云视图,如图8(e)所示。最后提取 Y_w 为50 mm处的轮廓曲线,得到此处堆积层侧表面的二维层间分布情况。

不同 Z_{as} 焊接条件下对应的堆积层侧表面实物如图9所示,堆积层侧表面三维信息的深度图及层

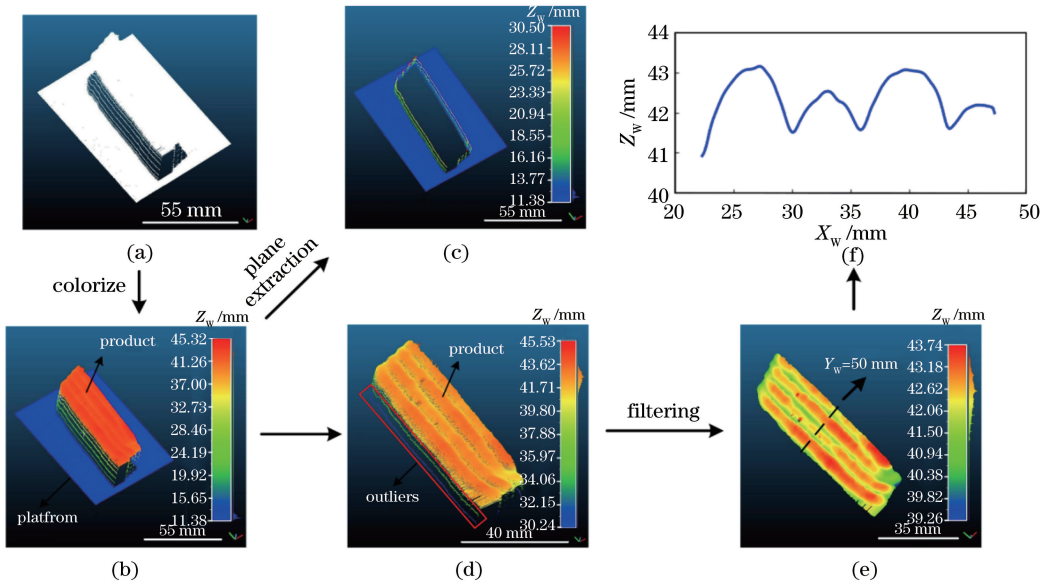


图8 $Z_{as}=6$ mm时焊缝侧表面三维数据处理流程图。(a)原始点云;(b)深度渲染;

(c)点云分割平面;(d)未去噪堆积层侧表面;(e)KNN滤波;(f) $Y_w=50$ mm处的横截面轮廓

Fig. 8 Flow chart of 3D data processing of weld side surface when $Z_{as} = 6$ mm. (a) Original point data; (b) deep rendering; (c) point cloud segmentation plane; (d) side surface of deposition layer with noise; (e) KNN filtering; (f) cross-sectional profile when $Y_w = 50$ mm

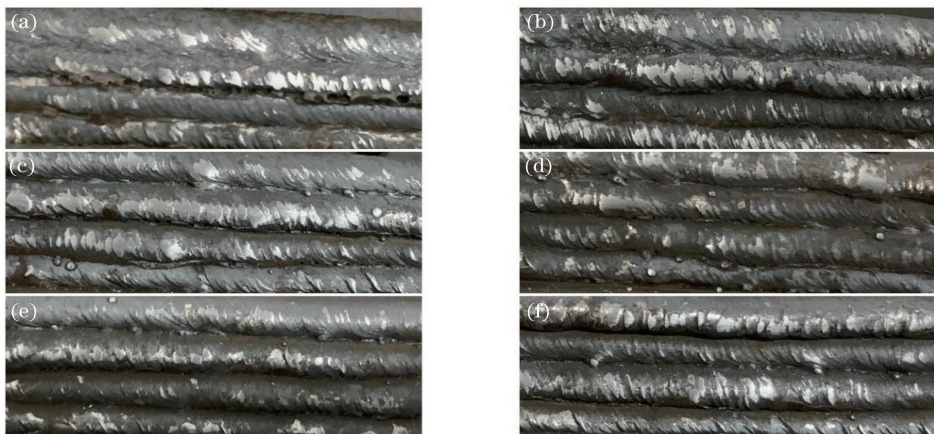


图9 不同焊接参数下堆积层侧表面实物图。(a) $Z_{as}=3$ mm;(b) $Z_{as}=4$ mm;
(c) $Z_{as}=5$ mm;(d) $Z_{as}=6$ mm;(e) $Z_{as}=7$ mm;(f) $Z_{as}=8$ mm

Fig. 9 Side surface physical maps of the deposition layers under different welding parameters. (a) $Z_{as}=3$ mm; (b) $Z_{as}=4$ mm; (c) $Z_{as}=5$ mm; (d) $Z_{as}=6$ mm; (e) $Z_{as}=7$ mm; (f) $Z_{as}=8$ mm

间分布如图 10 所示。在堆积过程中, Z_{as} 越大, 电流变化的稳定性越差, 金属飞溅和异常的熔滴过渡形式越明显, 从而带走更多的热量, 导致堆积层的层间

温度降低, 影响堆积层表面的成形情况。通过定性分析电弧增材堆积层侧表面层间分布情况, 可以判断堆积层侧表面的成形质量。

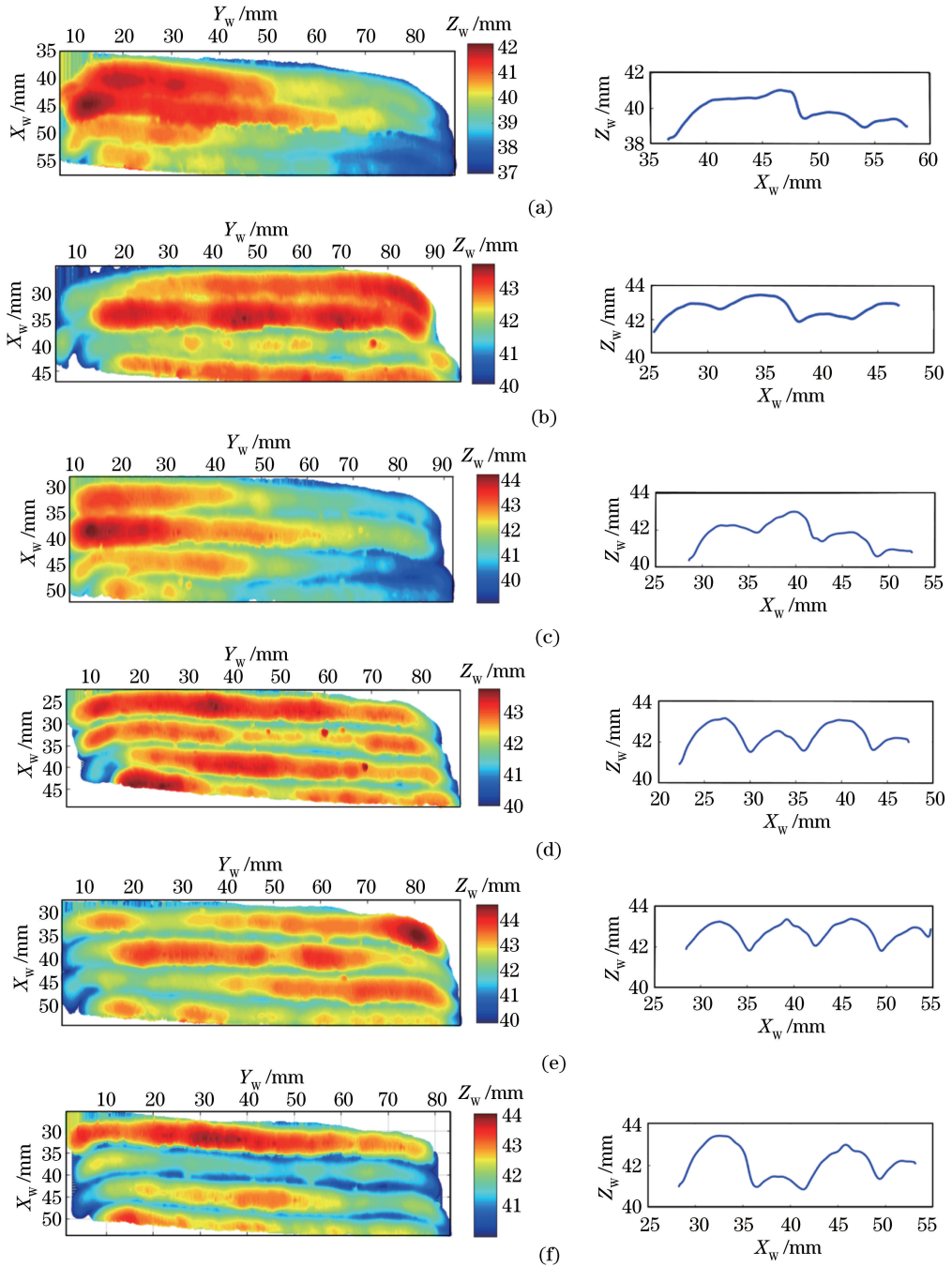


图 10 不同焊接参数下堆积层侧表面深度图。(a) $Z_{as}=3$ mm; (b) $Z_{as}=4$ mm; (c) $Z_{as}=5$ mm; (d) $Z_{as}=6$ mm; (e) $Z_{as}=7$ mm; (f) $Z_{as}=8$ mm

Fig. 10 Side surface depth maps of deposition layers under different welding parameters. (a) $Z_{as}=3$ mm; (b) $Z_{as}=4$ mm; (c) $Z_{as}=5$ mm; (d) $Z_{as}=6$ mm; (e) $Z_{as}=7$ mm; (f) $Z_{as}=8$ mm

当 $Z_{as}=3$ mm 时, 堆积层侧表面层间分布不均匀, 层与层之间没有明显的界限, 熔池流动导致熔覆层之间相互覆盖, 层间温度较高引起熔覆层之间连接紧密, 间隙较小。当 $Z_{as}=4$ mm 时, 堆积层侧表

面层间分布依然不均匀, 堆积层之间相互覆盖的情况有所减少, 损失热量增加, 导致层间温度下降。当 $Z_{as}=5$ mm 时, 堆积层侧表面开始出现分层, 层间覆盖现象消失, 堆积层表面开始出现少量的金属飞

溅,金属飞溅和熔滴过渡带走了一部分热量,导致层间温度进一步降低。当 $Z_{as}=6$ mm 时,堆积表面层的层间隙开始增大,层间分布变得更加明显,堆积层表面同时出现了金属飞溅,焊接电流的不稳定程度加剧。当 $Z_{as}=7$ mm 时,堆积层的层间隙进一步增加,侧表面也出现了金属飞溅。当 $Z_{as}=8$ mm 时,层间分布呈现高低起伏的情况,此时焊接状态极不稳定,导致热量流失严重,熔覆效果较差。综上所述,当 $Z_{as}<5$ mm 时,熔覆层之间粘附在一起,成形质量较差;当 $Z_{as}>5$ mm 时,熔覆层的层间距较大,导致熔覆效果较差,成形质量不佳;当 $Z_{as}=5$ mm 时,堆积层的层间分布没有出现上述的两种情况,成形质量较好。

3.3 堆积层侧表面粗糙度测量

堆积层侧表面的粗糙度可在一定程度上反映堆积层的表面成形质量,为堆积层质量评价提供了量化标准^[6]。粗糙度测量原理如图 11 所示,对提取后的堆积层三维点云使用随机抽样一致性算法拟合平面(平面方程 $ax+by+cz+d=0$,其中 $a^2+b^2+c^2=1$),假设三维坐标点的数量为 N ,堆积层侧表面上的点 $p_j(X_{w_j},Y_{w_j},Z_{w_j})$ 到拟合平面的距离为 d_j ,表面粗糙度 R 的定义为

$$R = \frac{\sum d_j}{N}, \quad (5)$$

$$\sum d_j = \sum_{j=1}^N \frac{|a \times X_{w_j} + b \times Y_{w_j} + c \times Z_{w_j} + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} = \sum_{j=1}^N |a \times X_{w_j} + b \times Y_{w_j} + c \times Z_{w_j} + d|。 \quad (6)$$

由于起弧和收弧时,电弧电流稳定性不是受 Z_{as} 大小的单一影响,因此分析堆积层侧表面粗糙度与 Z_{as} 大小的关系时,需去除两端的点云数据。表 3 为不同 Z_{as} 条件对应的三维点云数量以及平面拟合

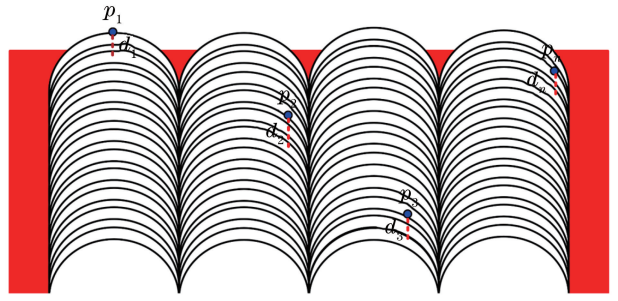


图 11 堆积层侧表面粗糙度测量原理图

Fig. 11 Measurement schematic of side surface roughness of deposition layer

方程,通过(5)式和(6)式求出相应的粗糙度大小,粗糙度变化曲线如图 12 所示。结合堆积层侧表面深度图可知:当 $Z_{as}<5$ mm 时,焊接电流相对稳定,堆积层侧表面的层间温度较高,从而导致层间分布不均匀,表面粗糙度增大,成形效果不佳;当 $Z_{as}=5$ mm 时,因电流不稳定而损失的热量恰好使得堆积层分布均匀,粗糙度减小,成形质量较好;但当 $Z_{as}>5$ mm 时,因电流不稳定程度加剧,大量的热被金属飞溅和异常的熔滴过渡带走,层间温度过低,不足以维持堆积层之间的紧密连接,导致堆积层间隙逐渐增大,表面粗糙度反而越来越大,成形质量越来越差。

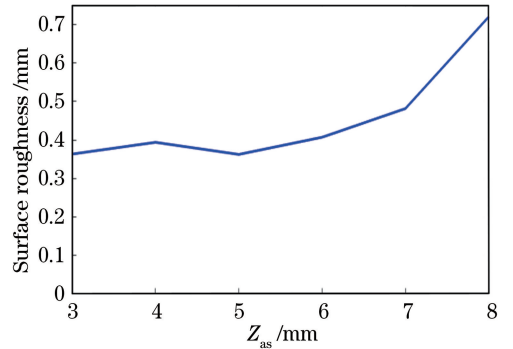


图 12 堆积层侧表面粗糙度变化曲线

Fig. 12 Roughness curve of deposition layer side surface

表 3 不同焊接条件下堆积层侧表面粗糙度

Table 3 Surface roughness of the deposition layer under different welding conditions

Z_{as}/mm	Points size N	Fitting plane	Surface roughness /mm
3	186337	$0.081932x + 0.0445412y + 0.995642z - 45.8944 = 0$	0.364
4	200810	$0.0472117x - 0.0109212y + 0.998825z - 43.6153 = 0$	0.394
5	182719	$0.114032x + 0.0397632y + 0.992681z - 47.0976 = 0$	0.363
6	211943	$-0.00289785x - 0.0063972y + 0.999975z - 41.9484 = 0$	0.407
7	239103	$0.0164343x - 0.0279159y + 0.999475z - 42.3533 = 0$	0.482
8	236507	$-0.0617732x + 0.0066661y + 0.998068z - 39.4754 = 0$	0.720

4 结 论

通过激光视觉传感系统对电弧增材侧表面进行

三维重建,使用锯齿靶标的线性标定方法将三维重建误差控制在 0.2 mm 以内,采用基于统计概率思维的三维点云处理算法提取并分析堆积层侧表面的

三维特征,通过堆积层侧表面的三维点云视图以及表面粗糙度定性和定量分析电弧增材侧表面的三维成形情况。改变焊丝末端与板材间距会引起电弧增材侧表面的三维成形及粗糙度变化,距离过大或者过小都会引起层间分布不均匀,表面粗糙度增加。

参 考 文 献

- [1] Zhou X M, Tian Q H, Du Y X, *et al.* Simulation of grain growth in single-pass two-layer deposition of arc welding based additive forming process[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(22): 86-94.
周祥曼, 田启华, 杜义贤, 等. 电弧增材成形单道两层熔积过程中的晶粒生长模拟[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(22): 86-94.
- [2] Feng Y, Zhang P X, Jia J L. Research progress of wire + arc additive manufacturing in past two years [J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(21): 23-26.
冯毅, 张鹏贤, 贾金龙. 近两年丝材+电弧增材制造研究进展[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(21): 23-26.
- [3] Xiong J, Xue Y G, Chen H, *et al.* Status and development prospects of forming control technology in arc-based additive manufacturing [J]. *Electric Welding Machine*, 2015, 45(9): 45-50.
熊俊, 薛永刚, 陈辉, 等. 电弧增材制造成形控制技术的研究现状与展望[J]. *电焊机*, 2015, 45(9): 45-50.
- [4] Yang H O, Wang J, Zhou Y H, *et al.* Wire and arc additive manufacturing technology and its application in TC4 titanium alloy: a review [J]. *Materials Review*, 2018, 32(11): 1884-1890.
杨海欧, 王健, 周颖惠, 等. 电弧增材制造技术及其在TC4钛合金中的应用研究进展[J]. *材料导报*, 2018, 32(11): 1884-1890.
- [5] Shi J B, Li F, Chen S J, *et al.* Effect of in-process active cooling on forming quality and efficiency of tandem GMAW-based additive manufacturing [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 101: 1349-1356.
- [6] Xiong J, Li Y J, Li R, *et al.* Influences of process parameters on surface roughness of multi-layer single-pass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 252: 128-136.
- [7] Li Y Z, Huang X, Horváth I, *et al.* GMAW-based additive manufacturing of inclined multi-layer multi-bead parts with flat-position deposition[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 262: 359-371.
- [8] Gao X D, Long G F, Wang R L, *et al.* Analysis of characteristics of spatters during high-power disk laser welding[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(9): 098103.
高向东, 龙观富, 汪润林, 等. 大功率盘形激光焊飞溅特征分析[J]. *物理学报*, 2012, 61(9): 098103.
- [9] Ding Y Y, Zhang X B, Kovacevic R. A laser-based machine vision measurement system for laser forming [J]. *Measurement*, 2016, 82: 345-354.
- [10] Huang Y J, Gao X D, Lin S D. Influences of laser welding parameters on mechanical properties of polymethyl methacrylate and stainless-steel joints[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(12): 1202006.
黄怡洁, 高向东, 林少锋. 激光焊接参数对有机玻璃与不锈钢接头力学性能的影响[J]. *中国激光*, 2017, 44(12): 1202006.
- [11] Zhang B, Chang S, Wang J, *et al.* Feature points extraction of laser vision weld seam based on genetic algorithm[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0102001.
张斌, 常森, 王桔, 等. 基于遗传算法的激光视觉焊缝特征点提取[J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0102001.
- [12] Zhang P X, Zhang G Q, Wei Z C, *et al.* Laser vision measurement for 3D surface outline of groove and weld [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38(12): 85-89.
张鹏贤, 张国强, 韦志成, 等. 坡口及焊缝表面三维轮廓的激光视觉测量[J]. *焊接学报*, 2017, 38(12): 85-89.
- [13] Rodríguez-Martín M, Rodríguez-González P, González-Aguilera D, *et al.* Feasibility study of a structured light system applied to welding inspection based on articulated coordinate measure machine data [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(13): 4217-4224.
- [14] Wang W C, Gao X D, Ding X D, *et al.* Detection of non-groove butt joint feature based on corner principle [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2018, 39(9): 61-64.
王文超, 高向东, 丁晓东, 等. 无坡口对接焊缝特征角点检测方法[J]. *焊接学报*, 2018, 39(9): 61-64.
- [15] Cloud Compare. 3D point cloud and mesh processing software open source project[Z/OL]. [2019-05-01]. <http://www.danielgm.net/>.
- [16] Huang K, Cheng X J, Jia D F, *et al.* An automatic segmentation algorithm for dense pipeline point cloud data[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(11): 1104004.
黄凯, 程效军, 贾东峰, 等. 一种密集管道点云数据自动分割算法[J]. *中国激光*, 2018, 45(11): 1104004.