

激光与光电子学进展

基于迈克耳孙干涉仪的表面焊接缺陷检测

吕思航¹, 丁红昌², 向阳^{1*}, 刘永坤¹

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

²长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 焊接表面缺陷是评价焊接质量的重要指标, 针对现有检测方法测量精度较低的问题, 设计了一种基于光学相干测距原理的焊接表面缺陷检测系统。首先, 基于迈克耳孙干涉仪的原理, 利用宽带激光扫描焊接表面的一点, 以采集参考臂和测量臂的干涉光强。然后, 通过采集的光强确定被扫描点对应的干涉光谱。最后, 计算该光谱对应的光程差, 从而确定被扫描点相对参考镜的轴向高度。实验结果表明, 该系统的轴向测量精度能达到 $10\ \mu\text{m}$, 横向分辨率能达到 $13\ \mu\text{m}$, 可以精确识别表面气孔、漏焊、错边等焊接缺陷, 准确测量焊缝的几何形状并判断焊缝的成形情况。

关键词 测量与计量; 无损检测; 干涉测量; 金属焊接; 焊接缺陷

中图分类号 O474 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1912005

Surface Welding Defect Detection Based on Michelson Interferometer

Lü Sihang¹, Ding Hongchang², Xiang Yang^{1*}, Liu Yongkun¹

¹College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

²College of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract The welding surface defect is an important index for evaluating welding quality. This paper designs a welding surface defect detection system based on the principle of optical coherent ranging to solve the problem of low measurement accuracy of the existing detection methods. First, based on the principle of the Michelson interferometer, a broadband laser is used to scan a point on the welding surface to collect the interference light intensity of the reference and measurement arms. Second, the interference spectrum corresponding to the scanned point is determined using the collected light intensity. Finally, the optical path difference corresponding to the spectrum is calculated to determine the axial height of the scanned point relative to the reference mirror. The experimental results show that the axial measurement accuracy and the lateral resolution of the system can reach $10\ \mu\text{m}$ and $13\ \mu\text{m}$, respectively. Moreover, it can accurately identify surface pores, lack of welds, welding seam misalignment, and other welding defects and accurately measure the geometry and determine the shape of the weld.

Key words measurement and metrology; nondestructive testing; interferometry; metal welding; welding defects

OCIS codes 120.4290; 120.3180; 300.6170

收稿日期: 2020-11-30; 修回日期: 2020-12-18; 录用日期: 2020-12-27

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0105304)、吉林省科技发展计划重点研发项目(20200401117GX)

通信作者: *952858529@qq.com

1 引言

先进制造技术是提高工业实力的关键,焊接技术则是促进制造技术快速发展的核心动力。工业生产中,受各类因素的影响,成形的焊缝中往往存在各类焊接缺陷。因此,焊接完成后需要对焊缝的缺陷进行检测,其中,焊缝表面的缺陷是判断焊接质量的重要指标^[1-8]。传统的焊缝表面缺陷检测通常由技术人员利用检测尺完成,检测精度受技术人员经验和主观判断的影响,无法保证测量精度和测量稳定性。目前,人们已经将机器视觉技术应用于表面缺陷的检测中。机器视觉大多采用图像分析技术,先将焊缝缺陷与背景分离,然后通过数学方法提取表面缺陷信息^[9-12]。但机器视觉技术只能测量物体表面信息,无法获取物体的平面度、高度等空间坐标信息,对于光照、灰度等变化敏感,且图像处理的效果会直接影响检测结果,因此,常被作为缺陷检测的辅助手段。激光位移传感器具有非接触测量、抗干扰性好等优点^[13-14],被广泛应用于焊缝表面的缺陷检测中。杨鹏程^[15]研发了基于点激光位移传感器的表面缺陷激光位移三维重构测量方法,该激光位移传感器的精度受限于待测物表面的光泽和粗糙度,只有在表面粗糙度为 0.4~3 μm 时的测量精度较高^[16]。雷正龙等^[17]研发了一种基于结构光扫描的视觉传感系统,可实现对焊缝表面缺陷的识别检测,且检测精度较高,但高精度结构

光测量系统使用前需要对相机或投影仪进行标定,标定成本和操作繁琐,不适合工业生产,目前工业中常用的结构光检测系统精度约为 0.075 mm。

已有研究大多基于迈克耳孙干涉仪的测距原理检测缺陷,最典型的代表是光学相干层析(OCT)技术。OCT作为一种成熟的无损、非接触、高分辨三维成像技术,在多个应用领域中得到了广泛应用。孙占^[18]利用OCT技术成功实现了对指纹的采集和识别,但相关研究仍然在人体组织的检查范围内。针对上述问题,本文将光学相干测距技术应用到金属的激光焊接领域,实现了对激光焊缝几何形状的测量和表面缺陷的识别。本方法对于待测物表面粗糙度和环境的要求较低,且设计的系统调试工作比较简单。

2 表面缺陷检测系统的工作原理及结构

2.1 表面缺陷检测系统的硬件构成

图 1 为表面缺陷检测系统的原理图,基于迈克耳孙干涉仪原理,采用超辐射发光二极管(SLD)宽带光源照明,激光器发出的光经过 50:50 的光纤耦合器分光后分别进入参考臂和测量臂,两束光分别经过参考镜和样品表面后原路返回。经过两臂反射的光在光纤耦合器中发生干涉,干涉光经过透镜聚焦到光谱仪上,将各个光谱信号分散到空间上,由线阵 CCD 相机并行记录,然后通过傅里叶变换重构出深度分辨的干涉包络信号。

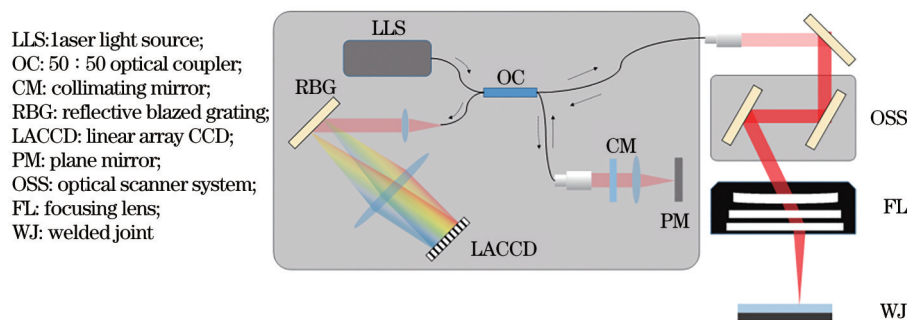


图 1 表面缺陷检测系统的原理

Fig. 1 Principle of the surface defect detection system

定义激光器出射光的电场分量为 E_0 ,参考臂反射光的电场分量为 E_R ,参考臂反射镜的反射率为 R_R ,样品臂的电场分量为 E_S ,样品臂待测物表面的反射率为 R_n ,波数为 k ,光程为 z ,参考臂光束和测量光束的光程差为 Δz ,将待测物沿轴向分成 N 层, n, i, j 为不同层的编号,则单一波长返回分光器处的电

场强度可表示为

$$E_R = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{R_R} E_0(k) \exp(ikz), \quad (1)$$

$$E_S = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0(k) \sum_{n=1}^N \sqrt{R_n} \exp[ik(z + \Delta z)], \quad (2)$$

线阵 CCD 接收到的光强可表示为

$$I(k) = [E_R(k) + E_S(k)] \cdot [E_R(k) + E_S(k)]^* = E_S(k)E_R(k)^* + E_R(k)E_S(k)^* + 2\text{Re}[E_R(k)E_S(k)^*], \quad (3)$$

$$E_S(k)E_R(k) = \frac{1}{2}|E_0(k)|^2 \left[\sum_{i=1}^N R_i + 2 \sum_{i=1, j=1, i \neq j}^N \sqrt{R_i R_j} \cos(2k\Delta z_{ij}) \right], \quad (4)$$

$$E_R(k)E_R(k)^* = \frac{1}{2}R_R|E_0(k)|^2, \quad (5)$$

$$E_S(k)E_R(k)^* = \frac{1}{2}|E_0(k)|^2 \sum_n \sqrt{R_i} \cos[2kz_n], \quad (6)$$

式中, z_n 为样品臂不同散射中心的光程, Δz_{ij} 为第 i 层和第 j 层的光程差, R_i 和 R_j 分别为第 i 层和第 j 层的反

射率。待测物两臂光束的干涉呈现出光谱调制现象, 对其进行傅里叶变换后得到的深度信息可表示为

$$|f[I(k)]|^2 = \Gamma^2(z) \otimes \left\{ \delta(0) + \sum_{n=1}^N \alpha_n^2 (z - z_n) + \sum_{n=1}^N \alpha_n^2 \delta(z + z_n) + X_{AC}[\delta(z)] \right\}, \quad (7)$$

$$\alpha_n = \sqrt{R_S R_n}, \quad (8)$$

式中, $\Gamma(z)$ 为光源功率谱密度函数的逆傅里叶变换, $\delta(z - z_n)$ 和 $\delta(z + z_n)$ 为实数信号傅里叶变换产生的共轭镜像, 关于零光程位置对称, $X_{AC}[\delta(z)]$ 为待测物不同深度信息的自相干项, 可以通过减平均方法去除, $\delta(0)$ 为参考镜自相关的直流噪声, z 为光沿 Z 轴方向 (待测物深度方向) 的光程。假设 $\sum_n \alpha_n^2 \delta(z - z_n)$ 包含所需的深度信息, 则通过去噪处理可减小其他噪声干扰项对信号的影响, 可表示为

$$I(z) = \Gamma^2(z) \otimes \sum_{n=1}^N \alpha_n^2 \delta(z + z_n) = \sum_n \alpha_n^2 S(z + z_n), \quad (9)$$

式中, $S(z + z_n)$ 为光源功率谱密度。图 2 为对一个贴满胶带的贴片进行扫描成像时 CCD 采集的干涉信号图。理想状态下, 采集的光谱信号应该是延 Z 轴方向排列的 N 个高斯峰, 高斯峰的宽度即为该系统的轴向分辨率。每个高斯峰都对应不同深度待测物分层上的一个点, 利用扫描振镜控制扫描镜头沿 X 方向移动就能得到表面轮廓的二维剖面信

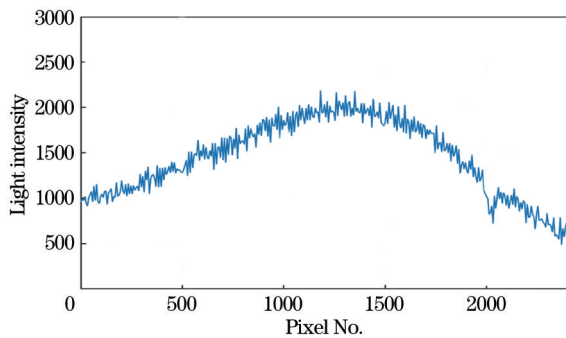


图 2 干涉信号图

Fig. 2 Interference signal diagram

息, 再进行 Y 方向的移动, 即可得到待测物的三维轮廓信息。

2.2 实验装置

本方案中搭建的系统原型为 SD-OCT (Spectral domain OCT) 系统, 该系统的激光光源是中心波长为 850 nm 的宽带光源, 波长半宽度为 50 nm, 宽带激光器的输出光束通过 50:50 的光纤耦合器分光进入样品臂和参考臂。参考臂由准直镜头和镀有金属膜的高精度平面反射镜组成。样品臂由准直镜头、振镜扫描仪 (用于控制横向扫描, 扫描长度为 5 mm) 和聚焦透镜 (用于准直透镜聚焦) 组成。参考臂和样品臂的反射光在光纤耦合器处会聚发生干涉, 干涉光经光纤进入光谱仪, 光谱仪由准直透镜、闪耀光栅 (工作波长为 850 nm, 光栅常数为 1200 lp/mm, 衍射角为 30.3°) 和聚焦透镜组成, 干涉光经过光谱仪分光后被线性 CCD 接收并存储到电脑上。该系统的轴向分辨率为 10 μm , 横向分辨率为 13 μm , 信噪比为 100 dB, 测量深度为 5 mm 且能通过更换激光光源和线阵 CCD 型号提高, 一般在空气中的成像深度可达到 7 mm, 扫描透镜的视场范围为 16 mm \times 16 mm。该系统的扫描速率主要由高速线阵扫描相机和数据处理速度决定, 采集速度为 15 kHz。

3 实验结果和分析

3.1 实验结果

利用该检测系统对焊接缝表面进行检测, 从而测量焊接缝的尺寸, 并以此判断焊接质量和焊接工艺是否合格。图 3 为焊透的对接焊缝, 焊接板材为两块钢板。

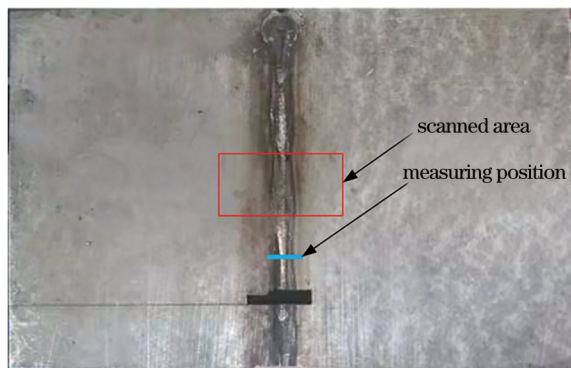


图 3 焊缝图片

Fig. 3 Picture of the weld

对图 3 中的方框区域进行扫描,将得到的 200 张二维轮廓图片进行纵向排列,得到焊缝的焊接轨迹图像。图 4 为焊缝的扫描结果,图 4(a) 为 6 张焊缝的二维轮廓图,其中,白线向下凹陷的部分为焊接缝的表面轮廓,平直部分的白线为焊接板材未参与焊接的表面轮廓。图 4(b) 是将 200 张二维轮廓进行拼接得到的焊缝焊接轨迹图像,黑色与灰白部分的交界面为焊接边界,可以发现,焊接轨迹清晰可辨,这表明该检测系统可实现稳定的形状检测,同时能有效监控激光焊接的轨迹。

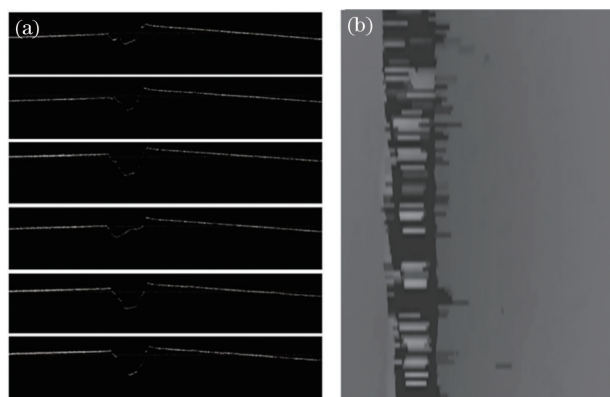


图 4 本系统的扫描结果。(a)二维轮廓图;(b)焊接轨迹图
Fig. 4 Scanning results of our system. (a) Two-dimensional contour map; (b) welding track map

为验证焊缝检测系统的测量准确性,对图 3 中焊缝的标注位置进行反复测量,并记录数据。在机器测量完成后通过人工对同一位置的焊缝高度进行测量,9 次测量的数据如表 1 和图 5 所示。对比发现,该检测系统测量的数值接近人工测量数值,验证了该系统的测量准确性。还可以发现,该检测系统的测量变化量较小,平均值为 3.147 mm,均方根误差为 0.0157 mm,测量精度也远高于人工测量精度,且在实际测量中的测量效率较高。

表 1 焊接深度的测量

Table 1 Measurement of the welding depth unit: mm

Number of measurements	Systematic measurement	Manual measurement
1	3.125	3.260
2	3.145	3.210
3	3.154	3.150
4	3.161	3.120
5	3.137	3.020
6	3.149	3.120
7	3.174	3.300
8	3.158	3.210
9	3.124	3.150

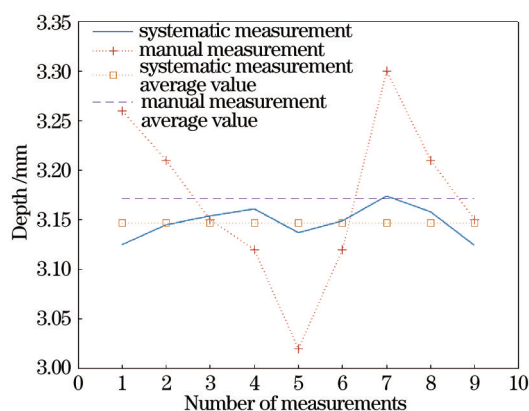


图 5 焊缝表面缺陷的检测结果

Fig. 5 Inspection results of welding surface defects

3.2 焊接缺陷检测

焊接缺陷检测系统能以非接触方式准确检测出焊缝存在的气孔、漏焊、错边等焊接缺陷。气孔是焊接中常出现的缺陷,主要由熔池中的气体在金属凝固前未及时逸出导致。图 6 为 3 条焊缝的表面轮廓,方框区域为两个宽度为 0.45 mm 和 0.32 mm 的气孔,检测系统可以准确识别出宽度最小为 0.2 mm 的孔隙并给出具体数值。

相比自动焊接,手工焊接会存在一种重大的焊

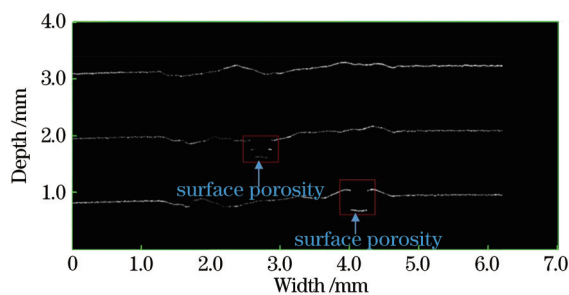


图 6 孔隙的检测结果

Fig. 6 Inspection result of the pores

接缺陷——漏焊,因此,实验中对一块手工焊接的接头进行扫描,并检测出漏焊的焊接缺陷。图 7 为焊接质量合格的接头表面轮廓,图 8 为出现漏焊焊缝的表面轮廓,图 9 为存在错边的焊接轮廓。可以发现,两块焊接板的母材在焊接过程中没有按中心线对齐,焊接完成后两块板材的中心线产生偏差。

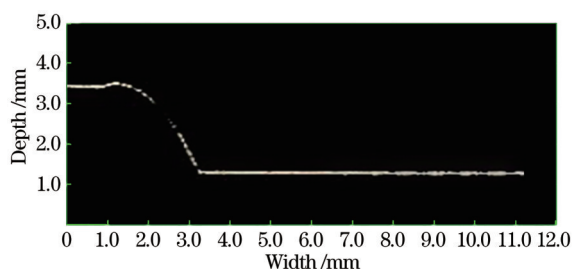


图 7 焊接质量合格的区域

Fig. 7 Areas with qualified welding quality

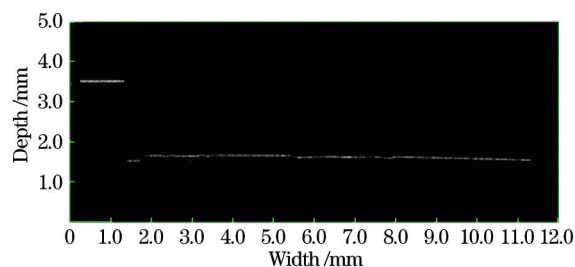


图 8 漏焊区域

Fig. 8 Missing solder area

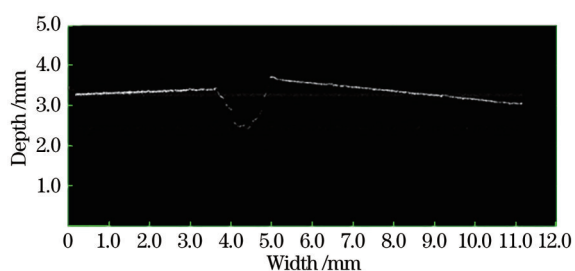


图 9 错边焊接

Fig. 9 Misalignment welding

4 结 论

将光学相干测距原理应用于焊接缝表面缺陷尺寸测量中,以光学相干测距为核心搭建了焊缝缺陷检测系统。通过扫描振镜控制扫描镜头在 X、Y 轴方向运动,采集焊接缺陷相对于参考镜的高度差(光程差),实现了焊接缝表面缺陷三维信息的采集。对采集的信息进行分析,可以实现对焊接缺陷(孔隙、漏焊、错边等)的定性和定量评价;对采集的二维层析图像进行计算分析,可得到缺陷精确的几

何形状尺寸,从而有效测出焊接缺陷,为焊接缝表面的缺陷检测提供了一种新方法。实验搭建的系统理论轴向测量精度为 $6.3 \mu\text{m}$,实际轴向测量精度受准直透镜等光学元件色散等因素的影响,约为 $10 \mu\text{m}$;横向分辨率为 $13 \mu\text{m}$ 。下一步还需对该系统进行测试改进,以减小色差对测量精度的影响,同时可通过改进信号处理方法,进一步提高测量精度。

参 考 文 献

- [1] Wang Y B. Research on the line laser detection technology for weld seam tracking[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
王研博. 面向焊缝跟踪的线激光检测技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [2] Chen Z Q. Top and bottom weldment surface synchronous detection for penetration status and weldment bottom surface weld forming prediction algorithm during high-power disc laser welding[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2017.
陈子琴. 大功率激光焊熔透正反同步检测及焊缝背面成形预测算法研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2017.
- [3] Sun J L, Sun G M, Ma P G, et al. Laser target localization based on symmetric wavelet denoising and asymmetric Gauss fitting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0604001.
孙俊灵, 孙光民, 马鹏阁, 等. 基于对称小波降噪及非对称高斯拟合的激光目标定位[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0604001.
- [4] Chu H H, Wang Z Y. Study on dimension measurement and defect detection of weld based on active vision[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(21): 206-209.
褚慧慧, 王宗义. 基于主动视觉的焊缝成形尺寸测量和缺陷识别研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(21): 206-209.
- [5] Li M. A study on visual judgment method of weld morphology[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.
李明. 一种焊缝成形形貌的视觉评判方法研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
- [6] Liu S X. Welding engineering quality assessment method and detection technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
刘胜新. 焊接工程质量评定方法及检测技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [7] Gao S Y, Wu R M, Chen W D, et al. Development status of laser welding process monitor and seam

- quality detection[J]. *World Iron & Steel*, 2010, 10(3): 51-54, 63.
- 高世一, 吴瑞珉, 陈卫东, 等. 激光焊接过程监测及焊缝质量检测技术研究现状[J]. *世界钢铁*, 2010, 10(3): 51-54, 63.
- [8] Fang J M, Wang K H, Huang Y. Weld pool image quality evaluation of gas metal arc additive manufacturing based on infrared visual sensing[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2018, 39(12): 89-94, 132-133.
- 方吉米, 王克鸿, 黄勇. 基于透红外视觉传感的 GMA-AM 熔池图像质量评价[J]. *焊接学报*, 2018, 39(12): 89-94, 132-133.
- [9] Shen X H, Li Z H, Li M, et al. Aluminum surface-defect detection based on multi-task deep learning[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(10): 101501.
- 沈晓海, 栗泽昊, 李敏, 等. 基于多任务深度学习的铝材表面缺陷检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(10): 101501.
- [10] Gong J F, Li H Z, Li L Q, et al. Laser welding process quality monitoring technology based on coaxial image sensor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019: 20-41.
- 宫建锋, 李慧知, 李俐群, 等. 基于同轴图像传感的激光焊接过程质量监测技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 20-41.
- [11] Ao S S. Theory and method of quality detection based on microphone array in laser welding processing[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- 敖三三. 基于传声器阵列的激光焊接过程质量检测理论与方法[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [12] Jiao J. The analysis of laser welding process based on plasma electrical signal[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- 焦娇. 基于等离子体电信号的激光焊过程分析[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [13] Dong Z X, Sun X W, Liu W J, et al. Precision measurement method of free-form curved surfaces based on laser displacement sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(12): 30-38.
- 董祉序, 孙兴伟, 刘伟军, 等. 基于激光位移传感器的自由曲面精密测量方法[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(12): 30-38.
- [14] Shi T Y, Zhou L Z, Wang C M, et al. Machine vision-based real-time monitor system for laser cleaning aluminum alloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(4): 0402007.
- 史天意, 周龙早, 王春明, 等. 基于机器视觉的铝合金激光清洗实时检测系统[J]. *中国激光*, 2019, 46(4): 0402007.
- [15] Yang P C. Research on laser displacement 3D reconstruction measurement method for weld surface defects[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018.
- 杨鹏程. 焊件表面缺陷激光位移三维重构测量方法研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
- [16] Lu M T, Su X Y. Vertical measurement method for structured light three-dimensional profilometry based on phase-shifting and modulation ratio[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0704003.
- 卢明腾, 苏显渝. 基于相移与调制度比的结构光三维面垂直测量方法[J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0704003.
- [17] Lei Z L, Lü T, Chen Y B, et al. Features extraction for weld image of scanning laser sensing[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 34(5): 54-58, 115-116.
- 雷正龙, 吕涛, 陈彦宾, 等. 基于扫描激光视觉传感的焊缝图像特征信息识别[J]. *焊接学报*, 2013, 34(5): 54-58, 115-116.
- [18] Sun Z. High speed optical coherence tomography system and imaging of fingerprints[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018: 11-20.
- 孙占. 高速光学相干层析成像系统搭建与手部指纹采集[D]. 北京: 清华大学, 2018: 11-20.