

# 光学学报

## 基于光学相干层析的激光焊接熔深监测方法

谢冠明<sup>1,2</sup>, 王三宏<sup>3\*</sup>, 张跃强<sup>1,2</sup>, 彭和思<sup>4</sup>

<sup>1</sup>深圳大学智能光测研究院, 广东 深圳 518060;

<sup>2</sup>深圳大学物理与光电工程学院, 广东 深圳 518060;

<sup>3</sup>深圳市深视智能科技有限公司, 广东 深圳 518055;

<sup>4</sup>长沙天辰激光科技有限公司, 湖南 长沙 410100

**摘要** 针对熔深间接测量方法测量精度低的问题, 基于光学相干层析(OCT)的激光焊接熔深监测方法通过直接测量熔池小孔深度, 实现在线质量监测。该方法基于低相干干涉精密测距原理, 将测量光束与焊接光束同轴, 具有测量精度高、抗干扰能力强的优点。搭建了基于谱域 OCT(SD-OCT)的激光焊接熔深测量系统, 在深熔焊条件下测量了熔池小孔深度, 并应用百分位滤波算法从测量数据中提取出熔深曲线。针对百分位滤波算法的熔深提取精度受限于 OCT 测量数据噪声点和该算法需要根据焊接工况来调整滤波参数等问题, 提出了一种基于局部离群因子(LOF)和最大值滤波的 OCT 熔深提取方法, 通过与焊缝纵切面的熔深曲线对比发现, 熔深提取精度最大提升了 32%。实验结果表明, 所提方法可有效提高熔深提取精度, 且不需要调整算法滤波参数, 适用性更强。

**关键词** 激光光学; 光学相干层析; 激光焊接; 熔深监测; 小孔深度; 百分位滤波; 局部离群因子

中图分类号 O439; TG441.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS222041

### 1 引言

随着新能源汽车行业的不断发展, 激光焊接凭借其焊接速度快、热影响区域小和自动化程度高等优点, 被广泛应用于新能源动力电池的生产过程中。焊缝质量直接影响动力电池的安全性和使用寿命, 而激光焊接属于激光与物质相互作用的过程, 涉及到的工艺参数和影响因子较多, 造成焊接过程中熔深波动, 容易导致焊缝的深度不够或焊穿等缺陷的出现<sup>[1]</sup>。为避免熔深波动导致的有焊接缺陷的电池流入市场, 有必要在激光焊接过程中实时测量熔深, 以实现在线质量监测。研究人员提出了基于焊接过程产生的不同信号来监测焊中熔深的方法, 如多波段光辐射强度<sup>[2]</sup>、光学图像<sup>[3]</sup>和声波<sup>[4]</sup>等信号, 由于这些信号会受到熔池小孔波动的影响, 因此通过采集这些信号对焊接区熔透状态进行监测可以间接反映熔深信息。然而, 这些方法并不是对熔深的直接测量, 容易受焊接过程因素影响, 在连续监测的情况下无法得到较高的熔深测量精度。因此, 研究直接测量熔深的方法对激光焊接在线质量监测显得尤为重要。

光学相干层析(OCT)技术是一种基于低相干干涉原理的深度成像技术, 具有快速、高分辨率和无损检

测等优点<sup>[5]</sup>。谱域 OCT(SD-OCT)采用宽谱光源和光谱仪的组合, 通过对光谱干涉信号进行傅里叶变换即可得到深度图像, 具有不需要扫描参考臂、成像速度快和系统信噪比高等优点<sup>[6-7]</sup>。OCT 不仅在眼科、心脏科和牙科等医学领域中<sup>[8-9]</sup>获得了广泛的应用, 在非医学领域中<sup>[10-11]</sup>的应用也在逐渐增加。近年来, 研究人员开始挖掘 OCT 技术在激光打孔<sup>[12]</sup>、激光烧蚀<sup>[13]</sup>、激光增材制造<sup>[14]</sup>和激光焊接<sup>[15]</sup>等领域中的应用潜力, 其在激光焊接质量监测领域具有广阔的应用前景。

当激光功率密度超过一定阈值时, 激光焊接会产生小孔效应, 形成深熔焊。Miyagi 等<sup>[16]</sup>通过对小孔进行 X 光成像, 发现小孔深度仅仅比焊缝熔深浅了 9  $\mu\text{m}$ , 证明两者存在很好的一致性。在激光焊接熔深在线监测领域中, 利用 OCT 测量光束与焊接光束同轴同时作用在工件上, 可以直接测量熔池小孔的深度, 进而实现激光焊接熔深在线监测的目标。该方法采用低相干干涉精密测距原理, 不受焊接过程小孔产生的电磁辐射干扰, 满足连续监测情况下的高测量精度要求, 实时获取到的测量结果可用于焊接功率的调整, 实现测量与焊接的闭环反馈控制。Webster 等<sup>[17-18]</sup>搭建了基于 SD-OCT 的激光焊接熔深在线监测系统, 通过对焊接过程的小孔深度进行实时监测, 熔深测量结果

收稿日期: 2022-11-23; 修回日期: 2022-12-07; 录用日期: 2023-02-09; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1511102)、国家自然科学基金(12002215)、中国博士后科学基金(2022T150437)

通信作者: \*wangsanhong@qq.com

与实际金相结果吻合,验证了该技术的可行性。Kogel-Hollacher 等<sup>[19]</sup>通过 SD-OCT 技术实现了激光焊接熔深的在线监测,同时将监测结果作为反馈信号来控制焊接功率,实现了从监测到控制的跃升。目前国内在激光焊接熔深监测方面的研究都集中在多波段光辐射强度<sup>[20]</sup>、光学图像<sup>[21]</sup>和声波<sup>[22]</sup>等方法,对基于 OCT 的熔深监测方法的研究还比较欠缺。

针对新能源动力电池领域对熔深在线监测技术日益增长的需求,本文研究了基于 OCT 的激光焊接熔深监测方法。利用 OCT 测量光束与焊接光束同轴,搭建了基于 SD-OCT 的激光焊接熔深测量系统,在深熔焊条件下实现了熔池小孔深度的测量。焊接过程中小孔的动态变化导致 OCT 熔深测量数据呈现散点分布,需要对测量数据进行相应处理才能提取出熔深曲线。目前,应用百分位滤波算法来提取 OCT 熔深曲线的可行性已被验证<sup>[23-24]</sup>。本文对百分位滤波算法的熔深提取精度进行了研究,发现 OCT 测量数据中存在着少量噪声点,限制了该算法的熔深提取精度。同时,该算法需要根据焊接工况来调整滤波参数,故难以标准化。针对以上问题,提出了一种基于局部离群因子(LOF)和最大值滤波的 OCT 熔深提取方法。该方法采用 LOF 算法检测噪声点,再对去除噪声点后的测量数据应用最大值滤波算法提取熔深曲线。在此基础上,将该方法与百分位滤波算法进行熔深提取精度对比,以验证所提方法的可行性和对熔深提取精度的提升能力。

## 2 原 理

### 2.1 OCT 熔深监测原理

根据不同的传热模式和是否产生小孔,激光焊接

可分为热导焊和深熔焊。热导焊仅在金属材料表层发生熔化,形成熔池。当激光功率密度达到一定阈值时,金属材料表层会发生气化,熔池在气化反冲压力的作用下向下凹陷形成深熔小孔,这种焊接模式被称为深熔焊,是激光焊接领域中主要采用的焊接模式。与热导焊相比,深熔焊能量利用率高,焊缝深宽比大。从热导焊转变为深熔焊的临界值有两种表征方式: $P/S$ (激光功率与光斑面积之比)和 $P/d$ (激光功率与光斑直径之比)。Zou 等<sup>[25]</sup>指出 $P/d$ 比 $P/S$ 更适合表征 $1\ \mu\text{m}$ 波段激光深熔焊临界值,并给出了钢的深熔焊临界值( $P/d=1.5\ \text{kW}/\text{mm}$ )。

OCT 熔深监测系统以 SD-OCT 为基础,通过将 OCT 样品光和激光焊接光路进行同轴耦合,根据宽谱光源的低相干性来获取小孔深度信息。OCT 熔深监测系统原理如图 1 所示,主要由 SD-OCT 系统和激光焊接系统两部分组成,其中 SD-OCT 包括超辐射发光二极管(SLD)、光纤耦合器、参考臂、样品臂和光谱仪等部分,其中参考臂主要由偏振控制器、光纤准直器、色散补偿片、反射镜等构成,而样品臂通过光纤准直器与激光焊接光路进行同轴耦合,使得样品光与加工激光中心对准,并在焊接过程中进入小孔底部。系统测量熔深的具体原理为:SLD 发出的宽谱光源经过光纤耦合器分束,一束进入参考臂,经反射镜反射后原路返回;另一束进入样品臂,经光纤准直器形成准直光后进入焊接头,经焊接头合束镜与加工激光合束,两束光经过焊接头聚焦镜同时聚焦于工件上,加工激光在工件上形成稳定的小孔,而样品光进入小孔底部形成散射光后原路返回。从样品臂和参考臂返回来的光经过光纤耦合器发生干涉,由光谱仪线阵相机拍摄得到原始光谱干涉条纹图像。

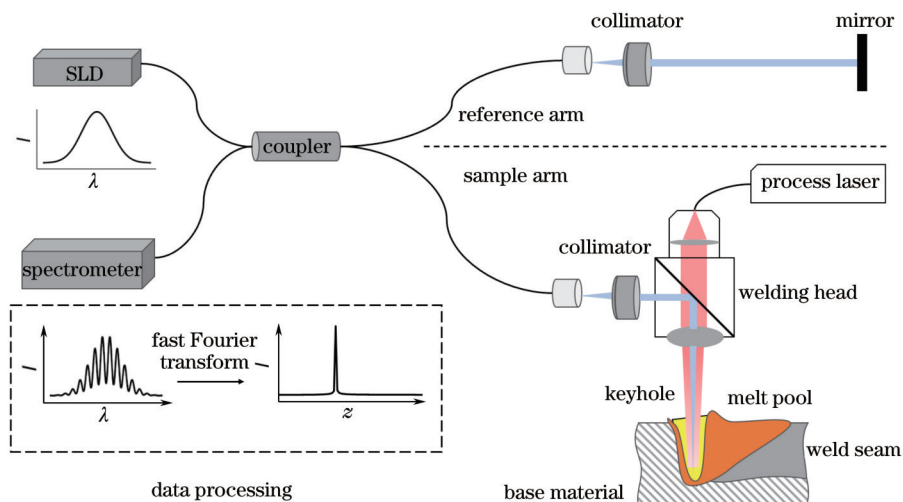


图 1 OCT 熔深监测系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of OCT welding depth monitoring system

在 SD-OCT 系统中,轴向分辨率与横向分辨率是相互独立的,横向分辨率由样品臂聚焦镜的聚焦光斑

大小决定,即

$$\Delta x = \frac{4\lambda}{\pi} \cdot \frac{f}{d}, \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为光源中心波长;  $f$  为聚焦镜的焦距;  $d$  为经样品臂准直器准直后的光斑直径。横向分辨率与聚焦镜的数值孔径成反比, 通过使用数值孔径大的聚焦镜使聚焦光斑直径变小, 可以提高横向分辨率。与此同时, 横向分辨率也会影响系统的景深, 景深为瑞利长度 ( $z_R$ ) 的两倍, 由横向分辨率决定, 即

$$b = 2z_R = \frac{\pi(\Delta x)^2}{\lambda}, \quad (2)$$

故提高横向分辨率会降低系统的景深。要实现熔深测量, 横向分辨率须小于加工激光的聚焦光斑直径, 使得样品光能进入小孔底部, 同时景深也要满足测量深度的要求。轴向分辨率指轴向能分辨的最小距离, 由光源的相干长度决定, 即

$$\Delta z = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda}, \quad (3)$$

式中:  $\Delta \lambda$  为光源光谱的半峰全宽 (FWHM)。

## 2.2 SD-OCT 数据处理

SD-OCT 采集到的原始光谱干涉条纹图像需要进行相应的数据处理操作才能获取样品深度信息, 其中主要包括去直流项、 $k$  空间插值、光谱整形和傅里叶变换等步骤。去直流项通过去除干涉信号的直流项和自相干项, 只留下干涉项, 来提高图像的信噪比。相机实际拍摄到的是  $\lambda$  空间均匀化 ( $k$  空间非均匀) 的干涉条纹, 通过  $k$  空间插值获得  $k$  空间均匀化的干涉信号, 可以提高图像的轴向分辨率。宽谱光源的光谱形状通常为非高斯型, 导致其相干函数存在较高的旁瓣, 采用光谱整形的方法可以抑制旁瓣, 从而提高图像对比度。采用 FFT 算法对光谱干涉条纹图像进行傅里叶变换, 得到样品深度信息, 又称为 A 扫描 (A-scan)。

在 OCT 熔深测量方面, 通过寻找 A-scan 的峰值并提取其对应的横坐标, 即可得到熔深信息。由于熔池小孔具有高温、熔融的特性, 并不是所有 A-scan 都包含了有效的熔深信息, 存在着大量的噪声信号, 因此需要根据不同的焊接工况设定阈值, 滤除噪声信号, 得到原始熔深测量结果。另外, 由于工装平台不平整, 故在每一次焊接实验前需要先对工件表面进行测量, 将原始熔深测量结果与工件表面测量结果相减即可得到 OCT 熔深测量结果。

## 2.3 基于 LOF 和最大值滤波的 OCT 熔深提取

由于焊接过程中熔池小孔形状的动态变化, OCT 熔深测量数据呈现散点分布, 因此需要采用相应的方法从测量数据中提取出熔深曲线。百分位滤波又称为排序滤波, 是一种基于排序理论的非线性平滑滤波技术<sup>[26]</sup>。它需要两个输入参数, 即百分位  $p$  和窗口长度  $L$ , 其中中值滤波是一种特殊的百分位滤波, 百分位为  $p=50$ 。由于 OCT 熔深测量结果并非等间隔采样, 因此窗口长度  $L$  定义为有效采样点的个数。基于百分位滤波的 OCT 熔深提取方法首先对窗口长度  $L$  内的测量值进行排序, 计算该范围内  $p\%$  处的提取值  $D_p(t)$ ,

即  $p\%$  个测量值小于  $D_p(t)$ , 最后采用移动窗口方法提取出熔深曲线。

OCT 熔深测量数据中存在着少量噪声点, 这些噪声点来自于小孔壁和孔内多次反射的测量, 并限制了百分位滤波算法的熔深提取精度。此外, 在不同焊接工况下, 测量数据的噪声点密度不尽相同, 需要调整百分位滤波算法的滤波参数才能获得较好的熔深提取精度。针对以上问题, 提出了一种基于 LOF 和最大值滤波的 OCT 熔深提取方法, 即先采用 LOF 算法检测噪声点, 再对去除噪声点后的测量数据应用最大值滤波算法提取熔深曲线。LOF 算法是一种基于密度的离群点检测算法<sup>[27]</sup>, 通过给数据集中的每个点计算一个离群因子  $f_{\text{lof}}$ , 判断  $f_{\text{lof}}$  是否接近 1 来判定该点是否是离群点: 若  $f_{\text{lof}}$  远大于 1, 则认为该点是离群点; 若  $f_{\text{lof}}$  接近于 1, 则认为该点是正常点。由于 OCT 熔深测量数据中的噪声点分布较稀疏, 而信号点密度较大, 因此采用 LOF 算法能够有效检测数据中的噪声点。在去除噪声点后, 对测量数据应用最大值滤波, 即在移动窗口下选取窗口长度内的最大值, 从而提取出熔深曲线。

## 3 实验

为实现激光焊接熔深在线监测, 搭建了基于 SD-OCT 的熔深测量系统, 在深熔焊条件下测量熔池小孔深度, 获取了 OCT 熔深测量结果。应用百分位滤波算法提取熔深曲线, 并与从焊缝纵切面提取出的实际熔深进行了对比, 以验证该算法的熔深提取精度。应用所提的基于 LOF 和最大值滤波的熔深提取方法提取熔深曲线, 并与百分位滤波算法进行熔深提取精度对比, 通过多次重复实验, 以验证所提方法的可行性和对熔深提取精度的提升能力。

### 3.1 OCT 熔深测量系统

OCT 熔深测量系统的实验装置如图 2 所示, 主要由激光焊接系统和 SD-OCT 系统两部分组成。激光焊接系统的实验装置如图 2(a) 所示。采用武汉锐科光纤激光技术股份有限公司生产的多模光纤激光器, 其最大输出功率为 6000 W, 波长为 1.08  $\mu\text{m}$ 。采用上海嘉强自动化技术有限公司生产的激光焊接头, 并将其装配于上海新时达机器人有限公司生产的焊接机器人上, 聚焦光斑直径为 400  $\mu\text{m}$ 。在实验中, 设置激光器起弧时间为 5 ms, 加工激光垂直作用于工件表面, 且工件静止, 激光焊接头随焊接机器人移动。SD-OCT 系统的实验装置如图 2(b) 所示, 采用 SLD 光源, 中心波长为 850 nm, 光谱的 FWHM 为 45 nm。光谱仪成像速率为 80 kHz, 采样率为 2048 个像素。光谱仪线阵相机拍摄到的光谱干涉条纹图像通过图像采集卡采集并传入计算机中进行数据处理。经计算得到, SD-OCT 系统理论的轴向分辨率约为 7  $\mu\text{m}$ , 横向分辨率约为 54  $\mu\text{m}$ , 景深约为 10.8 mm, 满足熔深测量要求。

使用低碳钢作为样品进行原理验证实验, 对采集

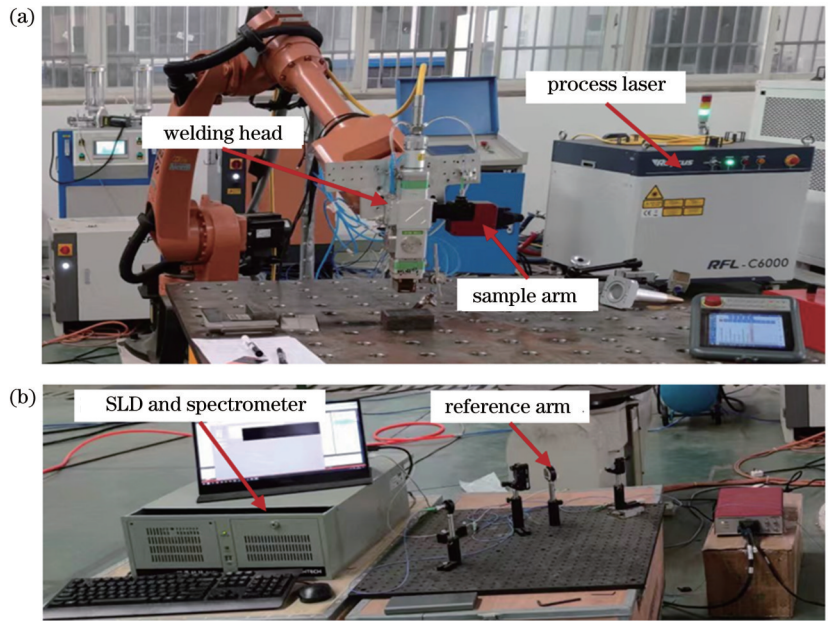


图 2 实验装置图。(a)激光焊接系统;(b)SD-OCT系统  
Fig. 2 Experimental setup. (a) Laser welding system; (b) SD-OCT system

到的原始光谱干涉条纹图像进行去直流项、 $k$ 空间插值和光谱整形等处理后,输出信号如图 3(a)所示。接着,对输出信号进行傅里叶变换,得到样品的轴向深度信号,其结果如图 3(b)所示。通过测量轴向深度信号

的 FWHM,实际轴向分辨率约为  $17\ \mu\text{m}$ ,该实际值大于理论值的主要原因在于样品臂焊接光路与参考光路仍然存在部分色散失配,后续将考虑对色散进行算法补偿。

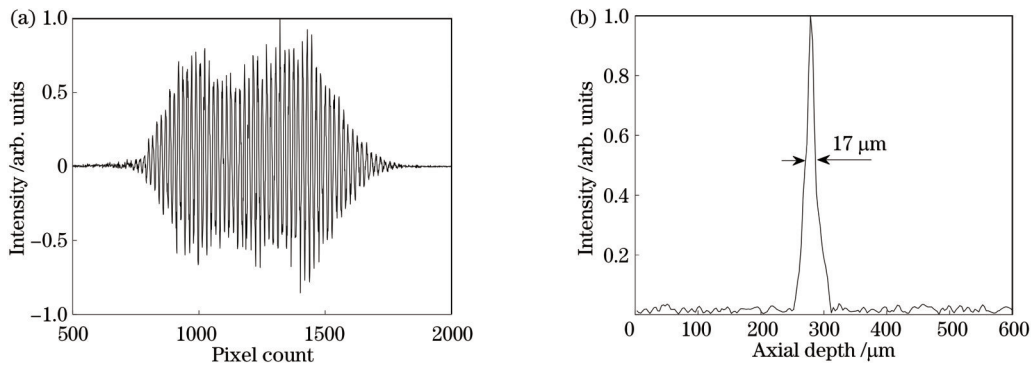


图 3 光谱干涉图及其轴向深度图。(a)光谱干涉图;(b)轴向深度图  
Fig. 3 Spectral interferogram and axial depth diagram. (a) Spectral interferogram; (b) axial depth diagram

### 3.2 OCT 熔深测量结果

焊接实验采用工艺参数为低碳钢、离焦量为 0、加工速度为  $30\ \text{mm/s}$  和  $P/d = 2\ \text{kW/mm}$ ,满足深熔焊临界值要求。OCT 熔深测量结果如图 4 所示,其中每一个黑色点代表某一时刻的深度测量。焊接激光是在开始测量后的  $0.03\ \text{s}$  时打开的,前  $0.03\ \text{s}$  的测量结果为  $0\ \text{mm}$ ,属于工件表面测量。由于焊接激光的起弧时间为  $0.05\ \text{s}$ ,因此  $0.03\sim 0.08\ \text{s}$  的测量结果反映了从热导焊转变为深熔焊的过程。在  $0.08\ \text{s}$  处形成稳定的小孔后,测量结果属于小孔测量。经过一段焊接时间后,在  $0.66\ \text{s}$  处关闭激光,  $0.66\ \text{s}$  后的测量结果属于工件表面测量。

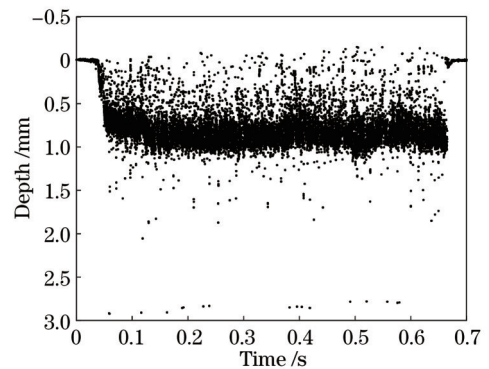


图 4 OCT 熔深测量结果  
Fig. 4 OCT welding depth measurement result

图 5 为显微镜拍摄到的焊缝显微图。焊缝上表面

如图 5(a)所示。采用线切割方法沿着焊缝中心切开,并进行金相试样,得到的焊缝纵切面如图 5(b)所示。

采用图像边缘检测方法从焊缝纵切面提取出实际熔深曲线,如图 5(c)所示。

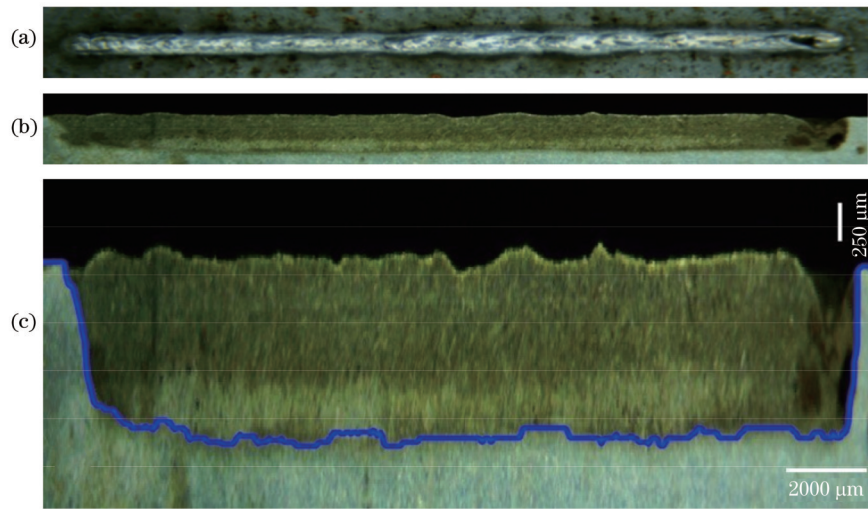


图 5 焊缝显微图。(a)上表面;(b)纵切面;(c)实际熔深曲线

Fig. 5 Micrograph of weld seam. (a) Top surface; (b) longitudinal section; (c) actual welding depth curve

OCT 熔深测量结果与焊缝纵切面的对比如图 6 所示,图中曲线是从焊缝纵切面提取出来的实际熔深曲线。可以看到,OCT 能够准确测量焊前和焊后的工件表面,但焊中测量点呈现散点分布,并不能直接反映实际熔深。位于实际熔深曲线之上最密集处的测量点属于小孔深度测量,表明 OCT 测量光正好入射到小孔底部的中心位置,如图 7(a)所示。根据图中测量点最密集处的顶部和底部位置,OCT 小孔深度测量存在约 0.25 mm 的波动幅度。文献[28]通过 X 光成像表明小孔深度在数百微秒时间间隔内存在一定的波动,可见 OCT 测量结果反映了小孔深度波动的幅度大小。位于实际熔深曲线之上比较稀疏的测量点属于小孔壁测量,表明 OCT 测量光入射到小孔壁上后会被反射回来,如图 7(c)所示。存在极少数测量点位于实际熔深曲线之下,由于小孔深度是不可能大于焊缝熔深的,故出现这些测量点主要是因为 OCT 测量光在小孔内部

发生多次反射,属于小孔内多次反射测量,如图 7(b)所示。

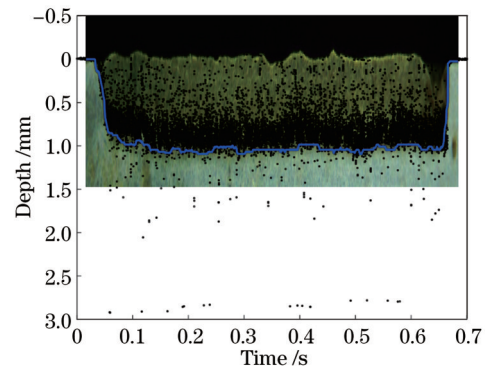


图 6 OCT 熔深测量结果与焊缝纵切面的对比

Fig. 6 Comparison of OCT welding depth measurement result with longitudinal cross section

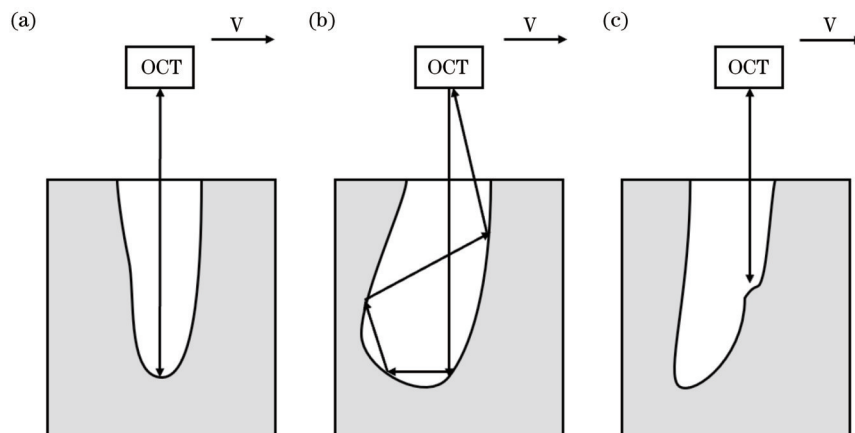


图 7 OCT 测量光与小孔的相互作用<sup>[29]</sup>。(a)小孔底部;(b)小孔内多次反射;(c)小孔壁

Fig. 7 Interaction of OCT measuring beam with keyhole<sup>[29]</sup>. (a) Keyhole bottom; (b) multi-reflection inside keyhole; (c) keyhole wall

进行了多次实验以验证 OCT 熔深监测方法的重复测量精度,图 8 是其中两组实验的测量结果,工艺参

数为低碳钢、离焦量为 0、加工速度为 30 mm/s 和  $P/d=2$  kW/mm。

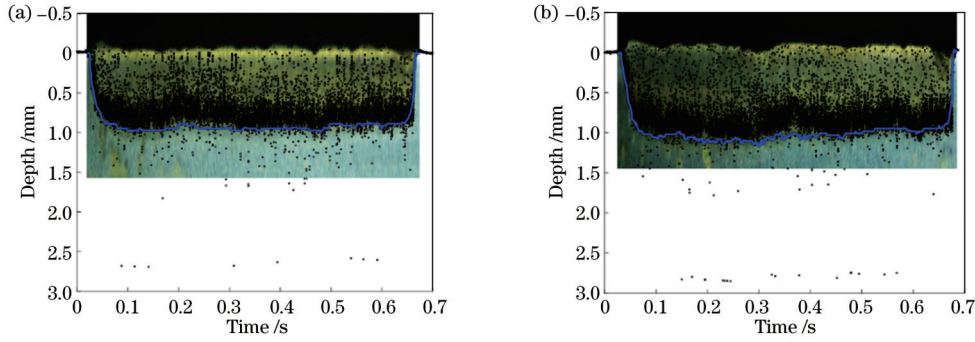


图 8 两组实验的测量结果。(a)第一组;(b)第二组

Fig. 8 Measurement results of two groups of experiments. (a) Group 1; (b) group 2

### 3.3 基于百分位滤波的 OCT 熔深提取

为了从 OCT 测量数据中提取出与实际熔深一致的熔深曲线,应用百分位滤波算法进行熔深提取。当窗口长度  $L$  为 200 时,百分位  $p$  为 50、75、96 提取出的熔深曲线与实际熔深的局部对比如图 9 所示,其中  $p=96$  时的熔深曲线与实际熔深最接近。实验结果表明,在合适的滤波参数下,百分位滤波算法能够提取出与实际熔深一致的熔深曲线。

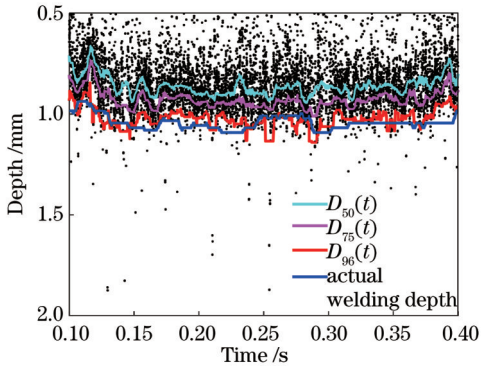


图 9 不同  $p$  下熔深曲线与实际熔深的局部对比

Fig. 9 Local comparison between welding depth extracted by percentile filter and actual welding depth under different  $p$

百分位为  $p=96$  时的熔深曲线与实际熔深的全局对比如图 10 所示。可以看到,极少数位于实际熔深曲线之下的测量点会对百分位滤波算法的熔深提取精度产生影响。

为验证百分位滤波算法的熔深提取精度,考虑提取熔深曲线与实际熔深曲线的偏差  $\Delta d$ ,并引入平均误差  $E$  对算法的提取精度进行量化<sup>[30]</sup>,则

$$E = \frac{\sum_{i=0}^n |\Delta d_i|}{n \cdot \bar{D}}, \quad (4)$$

式中: $\Delta d_i$  为每一个测量时间内测量熔深曲线与实际熔深曲线的偏差; $n$  为用于计算的测量点数; $\bar{D}$  为平均实际熔深,计算时仅考虑焊中不为 0 的熔深值。平均

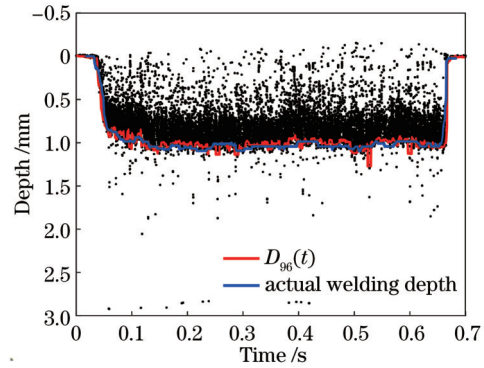


图 10  $p=96$  时熔深曲线与实际熔深的全局对比

Fig. 10 Global comparison of welding depth extracted by percentile filter and actual welding depth at  $p=96$

误差反映了测量熔深相对于实际熔深的平均偏差,适用于评价百分位滤波算法的熔深提取效果。

当窗口长度  $L$  为 200 时,平均误差与百分位  $p$  的关系如图 11(a) 所示。可以发现:当  $p < 96$  时,平均误差随着的  $p$  增大而减小;当  $p=96$  时,平均误差最小 (4.4%);由于极少数测量点的熔深值大于实际熔深值,当  $p > 96$  时,平均误差逐渐增大。当  $p=96$  时,平均误差与窗口长度  $L$  的关系如图 11(b) 所示。可以发现, $L$  越大,平均误差越小,同时也增加了数据处理时间。图 11(c) 为平均误差与两者的关系。可以发现,当  $92 \leq p \leq 98$  和  $L \geq 200$  时,平均误差在 5% 以内。

### 3.4 基于 LOF 和最大值滤波的 OCT 熔深提取

为进一步提高熔深提取精度,应用所提的基于 LOF 和最大值滤波方法提取熔深。首先,采用 LOF 算法检测 OCT 测量数据中的噪声点,实验中设定阈值为 1.2,即将  $f_{lof} \geq 1.2$  的测量点视为噪声点,将  $f_{lof} < 1.2$  的测量点视为信号点。LOF 算法检测到的噪声点如图 12(a) 所示,其中红色点为 LOF 算法检测到的噪声点。接着,对去除噪声点后的测量数据应用最大值滤波算法提取熔深曲线,提取结果如图 12(b) 所示。

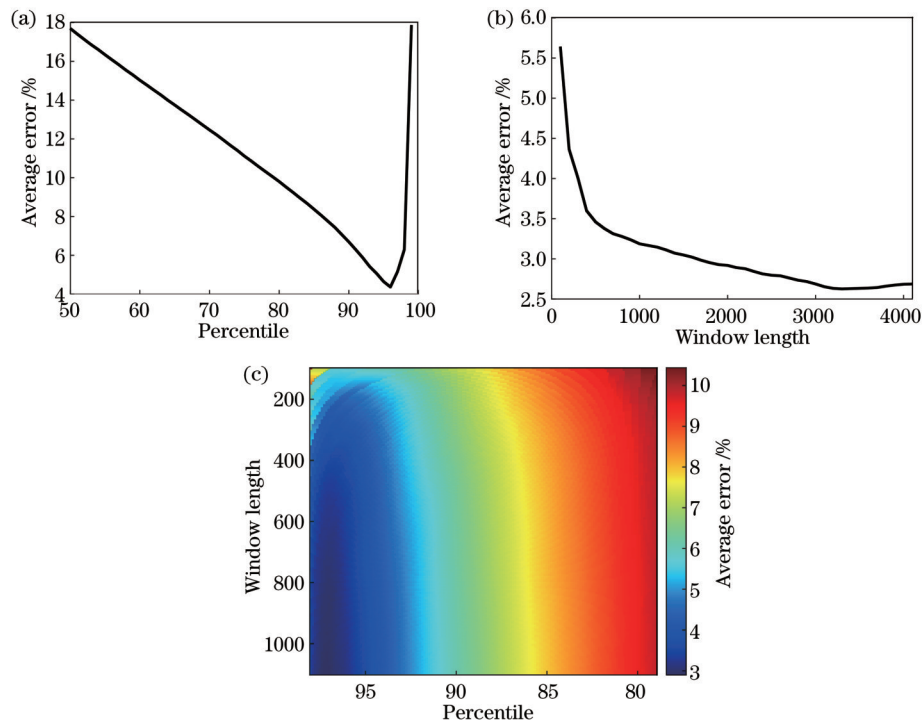


图 11 平均误差的影响因素。(a)平均误差与百分位的关系;(b)平均误差与窗口长度的关系;(c)平均误差与百分位和窗口长度的关系

Fig. 11 Influencing factors of average error. (a) Relationship between average error and percentile; (b) relationship between average error and window length; (c) relationship among average error, percentile and window length

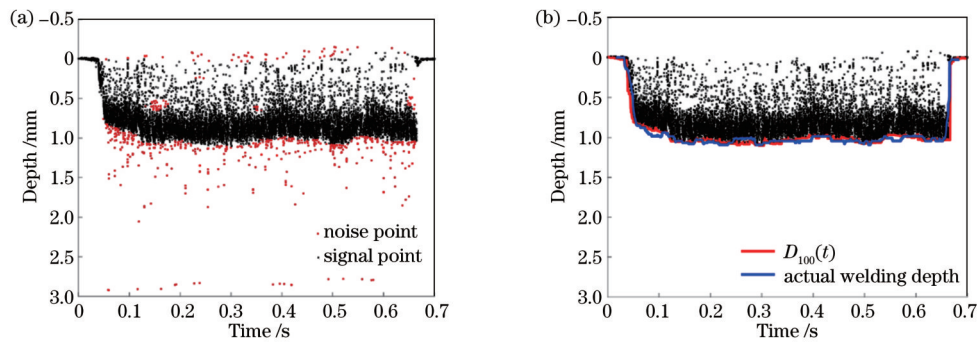


图 12 基于 LOF 和最大值滤波的熔深提取结果。(a)检测结果;(b)提取结果

Fig. 12 Weld depth extraction result based on LOF and maximum filter. (a) Detection result; (B) extraction result

为验证所提方法的优势,将该方法与百分位滤波进行平均误差对比,结果如图 13 所示。可以发现,百分位滤波的平均误差为 4.4%,而基于 LOF 和最大值

滤波的熔深提取方法的平均误差为 3.0%,熔深提取精度提升了 32%。

表 1 三组实验的平均误差

Table 1 Average errors of three groups of experiments

unit: %

Experimental group	Percentile filter	LOF+Maximum filter	Accuracy improvement
Example	4.4	3.0	32
Group 1	4.9	3.8	22
Group 2	4.5	3.4	24

对图 8 所示的两组重复实验应用所提方法,并与百分位滤波进行平均误差对比。其中,第一组实验的检测、提取和平均误差对比结果分别如图 14(a)~(c)

所示,第二组实验的检测、提取和平均误差对比结果分别如图 14(d)~(f)所示。结合示例实验,三组实验的平均误差如表 1 所示。所提方法的平均误差分别为

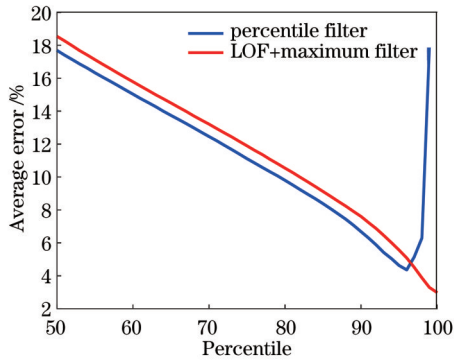


图 13 基于 LOF 和最大值滤波的方法与百分位滤波算法的平均误差对比

Fig. 13 Average error comparison of method based on LOF and maximum filter with percentile filter algorithm

3.0%、3.8%、3.4%，与百分位滤波相比，熔深提取精度分别提升了 32%、22%、24%。实验结果表明，所提

方法的平均误差在 4% 以内，与百分位滤波相比，熔深提取精度最大提升了 32%。

## 4 结 论

提出了一种基于 LOF 和最大值滤波的 OCT 熔深提取方法，实现了激光焊接熔深的高精度测量。该方法采用 LOF 算法检测噪声点，再对去除噪声点后的测量数据应用最大值滤波算法来提取熔深曲线。通过与焊缝纵切面的熔深曲线对比发现，所提方法的平均误差在 4% 以内，与已有的基于百分位滤波的熔深提取方法相比，熔深提取精度最大提升了 32%。所提方法可有效提高熔深提取精度，熔深测量更准确，适用性更强。

基于 OCT 的激光焊接熔深监测方法在连续监测的情况下具有较高的熔深测量精度，解决了熔深间接测量方法测量精度低的问题，有助于在工业生产中提

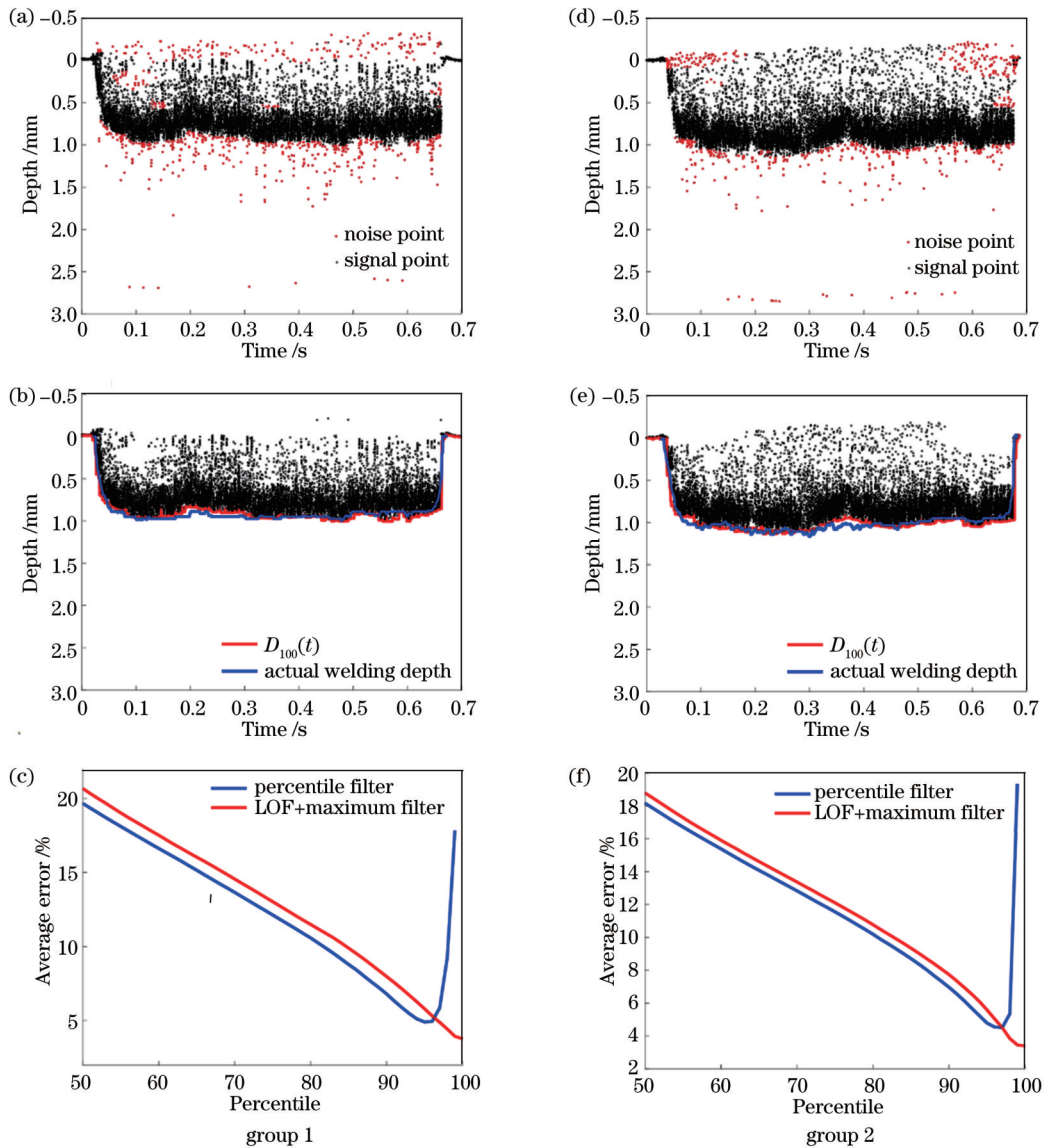


图 14 检测、提取和平均误差对比结果。(a)(d)检测结果；(b)(e)提取结果；(c)(f)平均误差

Fig. 14 Detection, extraction and average error comparison results. (a)(d) Detection result; (b)(e) extraction result; (c)(f) average error



供品质保证。由于监测系统还无法实时输出监测结果,故未来考虑采用并行计算方法来提高处理速度,进而实现从监测到控制的目标。

## 参 考 文 献

- [1] Brand M J, Schmidt P A, Zaeh M F, et al. Welding techniques for battery cells and resulting electrical contact resistances[J]. *Journal of Energy Storage*, 2015, 1: 7-14.
- [2] Park Y W, Park H, Rhee S, et al. Real time estimation of CO<sub>2</sub> laser weld quality for automotive industry[J]. *Optics & Laser Technology*, 2002, 34(2): 135-142.
- [3] Kim C H, Ahn D C. Coaxial monitoring of keyhole during Yb: YAG laser welding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(6): 1874-1880.
- [4] Gu H P, Duley W W. A statistical approach to acoustic monitoring of laser welding[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1996, 29(3): 556-560.
- [5] Huang D, Swanson E A, Lin C P, et al. Optical coherence tomography[J]. *Science*, 1991, 254(5035): 1178-1181.
- [6] Fercher A F, Hitzinger C K, Kamp G, et al. Measurement of intraocular distances by backscattering spectral interferometry[J]. *Optics Communications*, 1995, 117(1/2): 43-48.
- [7] de Boer J F, Cense B, Park B H, et al. Improved signal-to-noise ratio in spectral-domain compared with time-domain optical coherence tomography[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(21): 2067-2069.
- [8] 张子艺, 俞晨阳, 乔依琳, 等. 显微集成术中光学相干断层血流造影术[J]. *中国激光*, 2022, 49(15): 1507301.
- [9] Zhang Z Y, Yu C Y, Qiao Y L, et al. Intraoperative optical coherence tomography angiography with micro integration[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(15): 1507301.
- [9] 胡慕芸, 杨迪, 杨子哈, 等. 基于偏振敏感光学相干层析术的口腔鳞状细胞癌组织成像[J]. *光学学报*, 2022, 42(10): 1017002.
- [9] Hu M Y, Yang D, Yang Z H, et al. Polarization-sensitive optical coherence tomography for oral squamous cell carcinoma tissue imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(10): 1017002.
- [10] Markl D, Hanneschläger G, Sacher S, et al. Optical coherence tomography as a novel tool for in-line monitoring of a pharmaceutical film-coating process[J]. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2014, 55: 58-67.
- [11] 蒋鹏, 吴迪, 谢菲, 等. 光学相干层析技术在打印文书朱墨时序判别中的实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(10): 1011005.
- [11] Jiang P, Wu D, Xie F, et al. Experiment of optical coherence tomography in determining the sequence of intersecting lines of printed documents[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(10): 1011005.
- [12] Webster P J L, Yu J X Z, Leung B Y C, et al. *In situ* 24 kHz coherent imaging of morphology change in laser percussion drilling[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(5): 646-648.
- [13] Leung B Y C, Webster P J L, Fraser J M, et al. Real-time guidance of thermal and ultrashort pulsed laser ablation in hard tissue using inline coherent imaging[J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2012, 44(3): 249-256.
- [14] Kanko J A, Sibley A P, Fraser J M. *In situ* morphology-based defect detection of selective laser melting through inline coherent imaging[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 231: 488-500.
- [15] Bautze T, Kogel-Hollacher M. Keyhole depth is just a distance: the IDM sensor improves laser welding processes[J]. *Laser Technik Journal*, 2014, 11(4): 39-43.
- [16] Miyagi M, Kawahito Y, Kawakami H, et al. Dynamics of solid-liquid interface and porosity formation determined through X-ray phase-contrast in laser welding of pure Al[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 250: 9-15.
- [17] Webster P J L, Wright L G, Ji Y, et al. Automatic laser welding and milling with *in situ* inline coherent imaging[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(21): 6217-6220.
- [18] Blecher J J, Galbraith C M, Van Vlack C, et al. Real time monitoring of laser beam welding keyhole depth by laser interferometry[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2014, 19(7): 560-564.
- [19] Kogel-Hollacher M, Schoenleber M, Bautze T, et al. Measurement and closed-loop control of the penetration depth in laser materials processing[C]//9th International Conference on Photonic Technologies LANE, September 19-22, 2016, Fürth, Germany. Erlangen: Bayerisches Laserzentrum GmbH, 2016.
- [20] 王春明, 余福林, 段爱琴, 等. 非穿透激光深熔焊熔深与等离子体光信号的关系[J]. *焊接学报*, 2002, 23(5): 45-48, 56.
- [20] Wang C M, Yu F L, Duan A Q, et al. Relationship between penetration depth and plasma optic signal during partial-penetration laser welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2002, 23(5): 45-48, 56.
- [21] 秦国梁, 林尚扬. 基于同轴视觉监测的激光深熔焊缝熔深监测[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(8): 229-233.
- [21] Qin G L, Lin S Y. Weld penetration monitoring in Nd: YAG laser deep penetration welding based on coaxial visual sensing technology[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(8): 229-233.
- [22] 刘京雷, 陈彦宾, 徐庆鸿. 激光焊接声信号与熔深的相关性[J]. *焊接学报*, 2006, 27(1): 72-75, 80, 116.
- [22] Liu J L, Chen Y B, Xu Q H. Correlation of acoustic signals and weld depth in laser welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, 27(1): 72-75, 80, 116.
- [23] Fetzer F, Boley M, Weber R, et al. Comprehensive analysis of the capillary depth in deep penetration laser welding[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10097: 1009709.
- [24] Mittelstädt C, Mattulat T, Seefeld T, et al. Novel approach for weld depth determination using optical coherence tomography measurement in laser deep penetration welding of aluminum and steel[J]. *Journal of Laser Applications*, 2019, 31(2): 022007.
- [25] Zou J L, He Y, Wu S K, et al. Experimental and theoretical characterization of deep penetration welding threshold induced by 1- $\mu$ m laser[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 357: 1522-1527.
- [26] Duin R P W, Haringa H, Zeelen R. Fast percentile filtering[J]. *Pattern Recognition Letters*, 1986, 4(4): 269-272.
- [27] Breunig M M, Kriegel H P, Ng R T, et al. LOF: identifying density-based local outliers[C]//Proceedings of the 2000 ACM SIGMOD international conference on Management of data, May 15-18, 2000, Dallas, Texas, USA. New York: ACM Press, 2000: 93-104.
- [28] Miyagi M, Wang J Y. Keyhole dynamics and morphology visualized by *in situ* X-ray imaging in laser melting of austenitic stainless steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 282: 116673.
- [29] Boley M, Webster P, Heider A, et al. Investigating the keyhole behavior by using X-ray and optical depth measurement techniques[C]//International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, October 19-23, 2014, San Diego, California, USA. California: Laser Institute of America, 2014: 426-430.
- [30] Boley M, Fetzer F, Weber R, et al. Statistical evaluation method to determine the laser welding depth by optical coherence tomography[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 119: 56-64.

# Laser Welding Depth Monitoring Method Based on Optical Coherence Tomography

Xie Guanming<sup>1,2</sup>, Wang Sanhong<sup>3\*</sup>, Zhang Yueqiang<sup>1,2</sup>, Peng Hesi<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Intelligent Optical Measurement and Detection, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China;*

<sup>2</sup>*College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China;*

<sup>3</sup>*Shenzhen Sincevision Technology Co., Ltd., Shenzhen 518055, Guangdong, China;*

<sup>4</sup>*Changsha Tianchen Laser Technology Co., Ltd., Changsha 410100, Hunan, China*

## Abstract

**Objective** With the development of the new energy vehicle industry, laser welding has been widely used in the manufacturing of power batteries for its fast welding speed, small heat-affected zones, and high degree of automation. During laser welding, the welding depth fluctuates because of the involved process parameters and impact factors, which produce defects such as insufficient welding depth and burn through. In order to avoid these defects, online monitoring of the laser welding depth is necessary to achieve quality monitoring. The indirect methods based on the various signals such as optical radiation, visual image, and acoustic wave in the process zone are easily affected by the welding process and cannot ensure high accuracy of the welding depth measurement. A laser welding depth monitoring method based on optical coherence tomography (OCT) directly measures the depth of the keyhole in the molten pool under deep-penetration welding conditions. This method is based on low coherence interferometry and aligns the measuring beam with the processing beam, which has the advantages of high measurement accuracy and strong anti-interference ability. The dynamic changes in the keyhole lead to the scattered distribution of the raw OCT data, and the post-processing of the raw OCT data is required to reveal the welding depth. The percentile filter is confirmed to be viable to process the raw OCT data. The accuracy of the welding depth extraction by using this method is easily affected by the noise of raw OCT data, and filter parameters are needed to adapt to different welding conditions. In order to solve the aforementioned problems, an OCT welding depth extraction method based on local outlier factor (LOF) and maximum filter is proposed in this paper. This is done by first detecting the noise points of raw OCT data using LOF and then applying the maximum filter to the cleaned OCT data.

**Methods** Firstly, this paper builds a laser welding depth measurement system based on SD-OCT and measures the keyhole depth under deep-penetration welding conditions. A longitudinal cross section of the weld seam is obtained to extract the actual welding depth. Then, the percentile filter is applied to the raw OCT data to extract the welding depth. In order to evaluate the accuracy of the welding depth extraction, the average error is introduced by considering the difference between the welding depth extracted from OCT data and the actual weld depth extracted from the longitudinal cross section. Next, the proposed method is applied to the raw OCT data to extract the welding depth. The noise points of the raw OCT data are first detected by LOF and removed from the raw OCT data. The welding depth is then extracted by the maximum filter. The proposed method is compared with the percentile filter in terms of the average error. Finally, in order to verify the repeatability of the proposed method, multiple welds with the same process parameters are performed.

**Results and Discussions** A laser welding depth measurement system based on SD-OCT is established, and during the welding process, the raw OCT data are obtained (Fig. 4). Firstly, the percentile filter is applied to the raw OCT data to extract the welding depth. An average error of less than 5% can be achieved with a percentile between 92 and 98 and a window length greater than 200. Next, in order to further improve the accuracy of welding depth extraction, the proposed method is applied to the raw OCT data to extract the welding depth. The noise points of the raw OCT data are first detected by LOF, and the maximum filter is then used to extract the welding depth (Fig. 12). Furthermore, the comparison in average error between the proposed method and the percentile filter is conducted. The average error is 3.0% in the proposed method and 4.4% in the percentile filter (Fig. 13). Finally, multiple welds with the same process parameters are performed, and the proposed method is applied to extract the welding depth. The average errors are 3.0%, 3.8%, and 3.4%, respectively. Compared with the percentile filter, the accuracy of the welding depth extraction is improved by 32%, 22%, and 24%, respectively (Table 1). Therefore, it can be concluded that an average error of less than 4% can be achieved by the proposed method, and the accuracy of the welding depth extraction improves by up to 32% compared with the percentile filter.

**Conclusions** In this paper, an OCT welding depth extraction method based on LOF and maximum filter is proposed. This is done by first detecting the noise points of the raw OCT data using LOF and then applying the maximum filter to the cleaned OCT data to extract the welding depth. By comparing the welding depth extracted from OCT data with the actual welding depth extracted from the longitudinal cross section, the average error of the proposed method is less than 4%, and the accuracy of the welding depth extraction improves by up to 32% compared with the percentile filter. The proposed method can well improve the accuracy of the welding depth extraction and is more applicable. The laser welding depth monitoring method based on OCT can achieve high measurement accuracy in continuous monitoring and provide quality assurance in industrial production. Further, it will be developed to realize the welding depth control for laser welding.

**Key words** laser optics; optical coherence tomography; laser welding; welding depth monitoring; keyhole depth; percentile filter; local outlier factor