

基于偏振 OCT 的激光焊接匙孔深度测量方法

李召阳^{1,2}, 李中梁^{2,3*}, 南楠^{2**}, 刘腾^{2,3}, 杨晨铭^{2,3}, 万新军¹, 张以恒^{2,3}, 王向朝^{2,3}¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;²中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800;³中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 激光焊接的熔融深度即匙孔深度能够表征焊缝的结合强度, 反映焊接质量。光学相干层析成像技术(OCT)能够在焊接过程中无损测量匙孔深度。但是 OCT 探测光束在匙孔内的多重反射会导致测量结果不能准确反映待测深度。针对该问题, 采用基于偏振 OCT 的匙孔深度测量方法, 消除多重反射光的影响, 提高测量的准确性。将圆偏振光入射至待测匙孔得到 OCT 信号, 计算出带有匙孔深度信息的附加相位差图像, 利用附加相位差对信号进行筛选, 去除多重反射导致的错误深度, 得到待测匙孔的真实深度。使用所提方法对铝制匙孔样品进行测量, 得到的匙孔深度测量误差为 1.6%, 而常用的百分位滤波方法的测量误差为 23%。实验结果证明了所提方法的有效性。

关键词 激光技术; 激光焊接; 光学相干层析成像; 匙孔深度; 偏振

中图分类号 TN247

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230449

1 引言

现代激光焊接技术具有焊接速度快、焊缝强度高优点, 在焊接领域得到了快速的发展和广泛的应用^[1]。然而, 激光焊接深度不足常导致焊接强度下降, 影响焊接构件的连接质量。因此, 焊接过程中焊接深度检测对于提高激光焊接质量具有重要意义。激光光束作用于被焊材料或焊缝表面, 使材料熔化后形成一个焊接熔池, 此熔池被称为匙孔^[2]。匙孔深度可以表征焊接过程中加工光束的穿透深度, 进而反映出焊接过程的稳定性, 是评估焊接质量的关键因素^[3]。准确测量匙孔深度可以及时干预焊接过程, 预防潜在的焊接缺陷, 提高激光焊接质量。

传统的匙孔深度测量方法主要是基于 X 射线、超声波、红外辐射等^[4-6]。这类方法具有无损检测且能够实时显示的优点, 但是仍然存在一些问题。首先, 这类方法需要了解光束-材料的相互作用, 才能将探测信号与焊接质量联系起来, 并且检测分辨率较低, 如 X 射线匙孔深度检测的分辨率仅为 0.5 mm, 而超声波的检测分辨率约为 0.1 mm, 都难以实现对匙孔深度的准确测量。其次, 这类方法基于过程辐射和焊接结果之间的相关性来评估激光焊接质量, 提供的是匙孔深度的估计值, 而非实际的测量值, 导致这些测量方法只能实现简单的焊接质量评估。

光学相干层析成像(OCT)是一种高分辨率的断

层成像技术, 通过探测背向散射光的强度和um时间延迟来获得待测样品的断层图像^[7]。OCT 已被证实能够非破坏性地测量匙孔深度^[8]。OCT 的测量光束可以与加工激光同轴, 提高了测量结果的准确性, 且 OCT 具有微米级的横向和纵向分辨率^[9], 可以实现对匙孔深度的高精度测量。但是, OCT 探测光束在金属匙孔内的多重反射^[10]会导致 OCT 测量得到的深度信息不能准确地反映匙孔的真实深度^[11-12]。

如何提高 OCT 测量匙孔深度的准确性受到了研究人员的广泛关注, 常用的方法是对得到的深度信号进行滤波处理。Boley 等^[13]提出采用百分位滤波方法可以提高深度测量的准确性。Fetzer 等^[14]在此基础上使用了在线 X 射线方法对百分位滤波方法获得的匙孔深度进行校准。Mittelstädt 等^[15]在考虑 OCT 数据频率分布的基础上, 利用百分位滤波方法进一步提高了匙孔深度测量的准确性。虽然百分位滤波方法可以提高深度测量的准确性, 但难以准确地匹配金相数据。这主要是因为百分位滤波方法只适用于均匀分布的信号, 而 OCT 在激光焊接测量中得到的信号波动较大; 另外, 百分位滤波的结果受激光参数、焊接速度、焊接材料等工艺参数的影响, 每次测量结果均存在差别, 且拟合匙孔深度使用的百分位数值由人为判断, 易受主观因素影响。

本文提出了一种利用偏振 OCT(PS-OCT)进行激光焊接匙孔深度测量的方法。该方法利用 PS-OCT

收稿日期: 2023-01-09; 修回日期: 2023-02-20; 录用日期: 2023-04-04; 网络首发日期: 2023-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(61971406, 81927801)、中国科学院青年创新促进会资助项目

通信作者: *lizhongliang@siom.ac.cn; **nan8219@126.com

系统对匙孔进行成像,通过分析各反射信号的附加相位差,区分匙孔的单次反射光信号和多重反射光信号,再利用筛选出的单次反射光信号计算匙孔深度。仿真分析证明了本方法的可行性,利用搭建的PS-OCT实验系统对匙孔样品进行测量,验证了本方法可以有效提高匙孔深度测量的准确性。

2 原理

2.1 多重反射噪声对 OCT 信号的影响

对激光焊接匙孔深度进行测量时,OCT 系统光源发出的光被分光镜分为两束,一束作为探测光与加工激光同轴照射到被焊材料上,另一束光作为参考光进入参考臂。探测光的光斑直径远小于加工激光,使得探测光可以直接入射至熔池底部^[16]。熔池内的背向散射光与参考臂返回的参考光发生干涉后被光谱仪接收。由于金属具有较高的反射率,光被匙孔壁多重反射后可能仍具有较高的光功率。多重反射光被 OCT 系统收集将形成 OCT 图像中的多重反射伪影。另外,激光焊接时金属等离子体、飞溅等也可能造成光散射并被 OCT 系统探测到,形成干扰信号。

在匙孔深度测量过程中,OCT 光束在匙孔内的反射情况如图 1 所示。为了测量匙孔内 A 点的深度,将 OCT 光束入射至 A 点。对于光束①:一部分光束在 A 点反射并被 OCT 系统接收,如反射光束 I 所示,此路径的光程反映了 A 点的实际深度;一部分光束在匙孔内以其他角度反射,形成光束②。光束②在金属匙孔的另一位置 B 点再次反射,有一部分光束也会反射回 OCT 系统,如光束 II 所示,此时 OCT 探测到的信号受到光束②光程的影响,对应的深度超出了 A 点的实际深度。若光束②在 B 点反射后光强足够强,反射后形成的光束③继续在 C 点发生反射,反射后被 OCT 系统

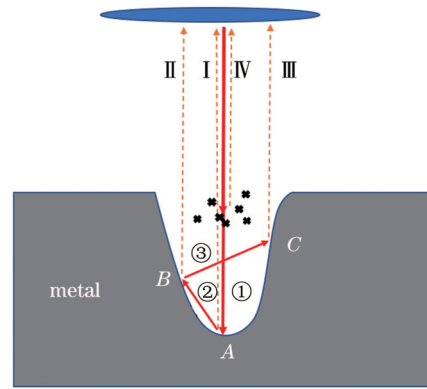


图 1 OCT 探测光在匙孔内的反射
Fig. 1 Reflection of OCT detection beam in keyhole

接收的光束如 III 所示,此时得到的 OCT 信号对应的深度同样超出了 A 点的实际深度。B 点和 C 点的反射光束 II 和 III 将在 OCT 信号中形成多重反射伪影。此外,在焊接过程中还会产生大量的等离子体和飞溅,有一部分光束还未到达测量位置便被飞溅等反射回 OCT 系统,如反射光束 IV 所示,此时得到的信号对应的深度值小于 A 点的实际深度,这不会影响匙孔深度测量。因此,最终 OCT 信号将包含 A 点的单次反射、多重反射及飞溅反射等信号。

利用 OCT 系统测量匙孔深度,得到的 B-scan 图像如图 2 所示,其中横向为焊接位置,纵向为焊接深度,虚线为焊接后用金相法得到的匙孔深度。与图 1 分析结果相同,B-scan 图像包含了匙孔底部单次反射光的信号图像、多重反射光的信号图像、匙孔侧壁反射光的信号图像等。一般而言,匙孔底部单次反射光的信号应该是深度最大的信号,然而从图 2 可以看出,受多重反射光信号的影响,匙孔底部单次反射光的信号并不是深度最大的信号。因此,从图 2 无法准确得到匙孔

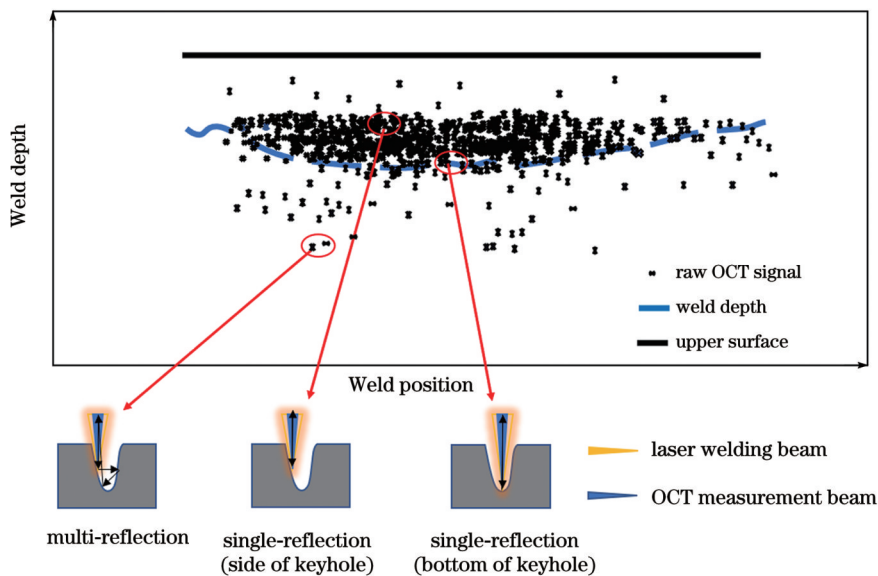


图 2 OCT 扫描焊缝的 B-scan 图像
Fig. 2 B-scan images of OCT scanning weld

的实际深度。如何去除多重反射光信号的影响将是本文研究的重点内容。

2.2 基于 PS-OCT 的匙孔深度测量原理

光束在金属表面的反射遵循菲涅耳反射定律^[17]。由于金属电导率不为零,使用复折射率(\tilde{n})代替实折射率(n),相应的折射角也表示成复数形式,即

$$\sin \tilde{\theta}_2 = \frac{1}{\tilde{n}} \sin \theta_1, \quad (1)$$

式中: θ_1 为入射角; $\tilde{\theta}_2$ 为光束的折射角。

对于不同的偏振光,s波的振幅反射系数(\tilde{r}_s)和p波的振幅反射系数(\tilde{r}_p)分别为

$$\tilde{r}_s = -\frac{\sin(\theta_1 - \tilde{\theta}_2)}{\sin(\theta_1 + \tilde{\theta}_2)} = |\tilde{r}_s| e^{i\delta_s}, \quad (2)$$

$$\tilde{r}_p = -\frac{\tan(\theta_1 - \tilde{\theta}_2)}{\tan(\theta_1 + \tilde{\theta}_2)} = |\tilde{r}_p| e^{i\delta_p}, \quad (3)$$

式中: δ_s 为s波的相位变化; δ_p 为p波的相位变化。

由于 $\tilde{\theta}_2$ 是复数, \tilde{r}_s 和 \tilde{r}_p 也是复数,相应的s波的相位变化 δ_s 和p波的相位变化 δ_p 一般不为0。这就意味着,相对于入射光,反射光的s波和p波都发生了相位变化,且随着入射角的变化,反射光的s波和p波相位的变化量在 $0 \sim \pi$ 区间。如果光束的入射角是0或者 $\pi/2$,反射光的s波与p波的相位变化量为0或者 π ;如果光束的入射角不是0或者 $\pi/2$,由于式(2)与式(3)中 \tilde{r}_s 和 \tilde{r}_p 不同,反射的s波和p波之间会出现附加的相位差。光束以不同角度入射至铁、铜和铝三种金属表面,反射光的s波和p波之间的附加相位差如图3所示。可以看出,当入射角相同时,铝表面反射光中s波和p波之间的附加相位差最大。当一束圆偏振光垂直入射至金属匙孔时,由于入射角为0,匙孔的背向反射光仍为圆偏振光,s波与p波之间不存在附加相位差。若圆偏振光在金属匙孔中发生多重反射,则多重反射光的入射角不为0或 $\pi/2$,即多重反射光的s波和p波之间存在附加相位差,反射光不再是圆偏振光。因此,通过

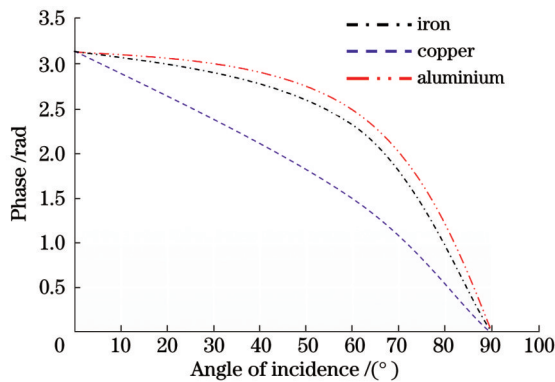


图3 不同金属表面反射光s波与p波间的附加相位差随入射角的变化

Fig. 3 Additional phase differences between s- and p-wave of reflected light from different metal surfaces versus angle of incidence

测量金属匙孔反射光s波和p波之间的附加相位差,即可区分匙孔的单次与多重反射光。

PS-OCT 不仅能获得样品的结构信息,还能同时获得反映样品双折射特性的相位延迟信息。在 PS-OCT 系统中,采用圆偏振光照射样品,样品反射回的光束与参考光发生干涉,被偏振分束器分为水平(H)和垂直(V)两路偏振信号后由光谱仪探测。假设光束在匙孔内第 n 次反射的快轴方向为 θ_n ,金属反射引入的附加相位差为 δ_n ,高斯型光源的功率谱密度函数为 $S(k)$,则两路干涉信号的光强 I_H 和 I_V 分别为

$$I_H(k) = I_{HO}(k) + \sum_n \frac{1}{\sqrt{2}} S(k) \sqrt{R_r R_{sn}} \cos \delta_n \cdot \cos(2k\Delta Z_{sn}), \quad (4)$$

$$I_V(k) = I_{VO}(k) + \sum_n \frac{1}{\sqrt{2}} S(k) \sqrt{R_r R_{sn}} \sin \delta_n \cdot \cos(2k\Delta Z_{sn} - 2\theta_n), \quad (5)$$

式中: I_{HO} 和 I_{VO} 是直流项; R_{sn} 是光束第 n 次反射的反射率; R_r 是参考镜的反射率; k 是波数; ΔZ_{sn} 是参考光与样品第 n 次反射光之间的光程差。光谱仪探测到的是干涉谱信号,对其进行傅里叶逆变换可以获得两路干涉信号(A-line信号)空间分布的复数形式^[18]:

$$\Gamma_H(z) = A_H(z) \exp[i\Phi_H(z)], \quad (6)$$

$$\Gamma_V(z) = A_V(z) \exp[i\Phi_V(z)], \quad (7)$$

式中: $A_H(z)$ 和 $A_V(z)$ 是幅度; $\Phi_H(z)$ 和 $\Phi_V(z)$ 是相位; z 是样品深度。通过去掉直流项,可计算出金属反射引入的附加相位差 $[\delta(z)]$:

$$\delta(z) = \arctan \left[\frac{A_V(z)}{A_H(z)} \right]. \quad (8)$$

圆偏振光垂直入射至匙孔底部,匙孔底部的单次反射光仍为圆偏振光,附加相位差为0;而对于多重反射光,两个正交方向的复反射系数不同,附加相位差不为0。对PS-OCT测量匙孔得到的附加相位差 $\delta(z)$ 进行筛选,附加相位差为0时对应的PS-OCT信号标记为有效信号,附加相位差不为0时对应的PS-OCT信号标记为多重反射产生的无效信号。利用PS-OCT的有效信号计算匙孔深度,可以避免多重反射导致的OCT测量深度大于真实深度的问题,提高匙孔深度测量的准确性。

2.3 仿真实验

根据以上理论,使用光线追迹法对本文方法进行仿真分析^[19]。仿真是将PS-OCT的单个A-line光束离散为1000条子光线并追踪每条子光线,得到每条子光线在匙孔中的反射、偏振等信息。通过计算每条子光线从入射到被透镜接收的光程,可以模拟OCT系统获得的匙孔反射光与参考光的光程差所对应的深度图像,再分别利用百分比滤波方法和本文方法计算匙孔深度。依据实际常用的焊接材料,将仿真中的匙孔材料分别设定为铜和铝。根据X射线匙孔图像和现有金

属匙孔仿真数学模型^[19-21]设定两种材料的匙孔形状, 仿真采用的具体参数如表 1 所示。

表 1 仿真所用参数

Table 1 Parameters used in simulation

Parameter	Value	
	Al	Cu
Refractive index	1.83+6.97i	1.09+13.43i
Keyhole depth /mm	1.650	1.700
Keyhole width /mm	2	2
Spot diameter /m	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴
Number of reflections	6	6
Number of lights	1000	1000
Roughness /m	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵
Lens diameter /mm	2	2
Lens numerical aperture angle /(^o)	85-95	85-95

PS-OCT 探测光束在铜和铝匙孔中的光线追迹过程和子光线光程差对应的深度如图 4 所示。图 4(a1)、(a2)展示了每条子光线在金属铜和铝匙孔内的追迹情况。不同颜色和线型表示不同子光线的追迹结果, 其中实线为入射光束, 点划线为单次反射光, 虚线为多次反射光。图 4(a1)、(a2)中的一个子光线对应一个匙孔反射信号, 计算出每个子光线的光程, 即可得到不同位置反射面的深度。图 4(b1)、(b2)中的黑色点状图像为计算得到的子光线光程差。每 100 个子光线为一组, 分为 10 组, 按照各子光束光程差的大小进行绘图。可以看出, 匙孔反射信号的光程差分布在较宽的范围内。在铜匙孔子光线光程差图中, 第 7 组和第 8 组均出现偏差较大的光程差数据; 在铝匙孔子光线光程差图中, 第 1 组也出现偏差较大的光程差数据。铜和铝匙孔的最大光程差分别为 5.356 mm 和 6.452 mm, 计算得到对应的匙孔深度分别为 1.928 mm 和 2.476 mm, 与设定值 1.700 mm 和 1.650 mm 相比, 误差分别为 16.8% 和 45.6%。该误差水平与文献[12, 15]中提到的现有 OCT 匙孔深度测量误差水平(15%~50%)吻合。

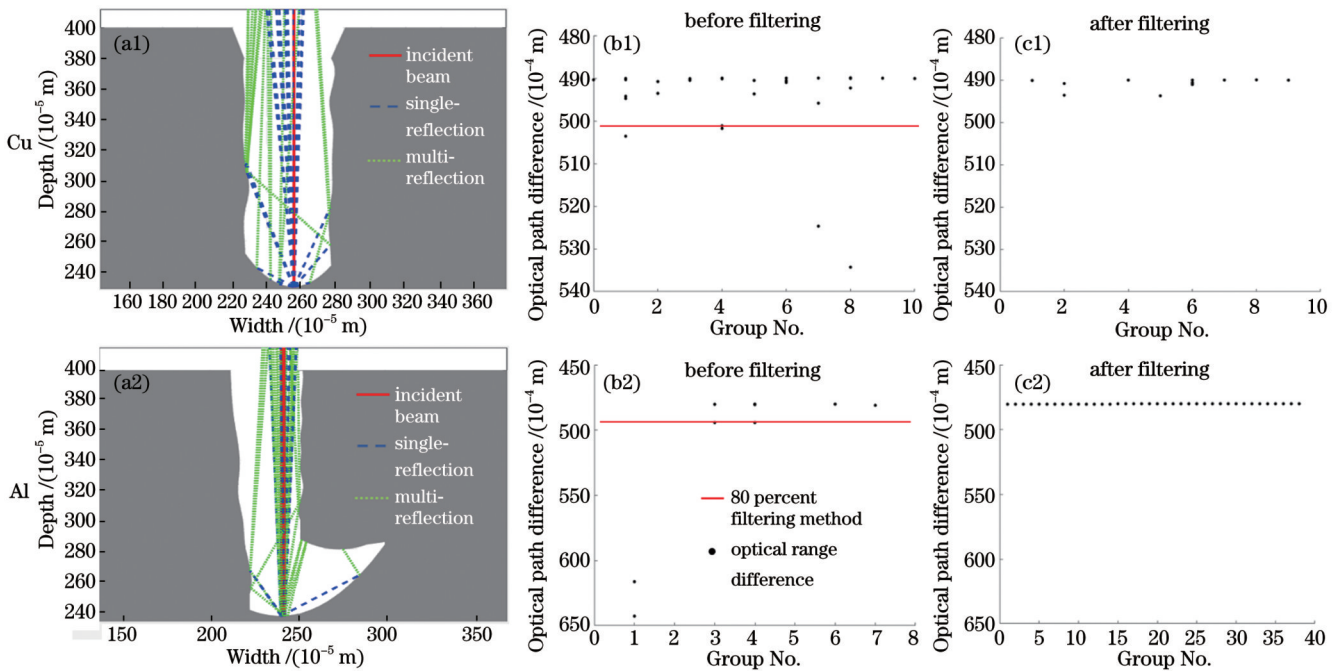


图 4 匙孔仿真示意图及仿真结果。(a1)(a2)PS-OCT 探测匙孔深度的光线追迹图;(b1)(b2)未经处理的子光线光程差图;(c1)(c2)经过本文方法处理后的子光线光程差图

Fig. 4 Schematics of keyhole simulation and simulation results. (a1)(a2) Light tracing for keyhole depth detection by PS-OCT; (b1)(b2) optical path difference of sub-rays before processing; (c1)(c2) optical path difference of sub-rays after processing

如前文所述,为了提高匙孔深度测量的准确性,常用的方法是对得到的 A-line 信号进行百分位滤波,其中 80 百分位滤波(以 OCT 探测信号深度的 80% 作为滤波后的信号深度)与金相数据吻合较好^[15]。图 4(b1)、(b2)中横线为 80 百分位滤波方法处理后对应的光程差,铜和铝的光程差分别为 4.908 mm 和 5.011 mm,对应的匙孔深度分别为 1.704 mm 和 1.756 mm,误差分别

为 3.27% 和 6.42%。该误差水平与 Mittelstädt 等^[15]使用百分位滤波方法得到的误差基本相同。此外,测量铝制匙孔深度时误差相对较大,这是因为铝的反射率更高且形成的匙孔为锥形。这个现象与文献[12]中的现象一致。

图 4(c1)、(c2)为利用本文提出的基于 PS-OCT 的匙孔深度测量方法筛选后得到的子光线光程差图

像。可以看出,铜和铝对应的子光线光程差图像中的光程差分布较为集中,没有偏差较大的信号。在铜匙孔图像中,最大光程差为 4.937 mm,对应的深度值为 1.718 mm,匙孔深度计算误差为 1.05%。在铝匙孔图像中,最大光程差为 4.803 mm,对应的深度值为 1.652 mm,匙孔深度计算误差为 0.12%。由此可见,对于铜或铝制匙孔,利用本文提出的方法可以显著提高匙孔深度计算的准确性,结果明显优于百分位滤波方法。

3 实验

3.1 实验系统

搭建的 PS-OCT 实验系统如图 5 所示。光源为超辐射发光二极管 (SLD) 宽带光源,中心波长为 840 nm,半峰全宽为 50 nm,最大输出光功率为 15 mW。光源

发出的光经准直后通过起偏器,成为垂直方向的线偏振光,该光束通过分光比为 50:50 的非偏振分束器 (NPBS) 后分别进入样品臂和参考臂。在参考臂光路中,线偏振光经过一快轴方向与垂直方向夹角为 22.5° 的四分之一波片后入射到参考镜上,被参考镜反射后,再次经过四分之一波片并返回到非偏振分束器中。在样品臂光路中,线偏振光经过快轴方向与垂直方向夹角为 45° 的四分之一波片后变为圆偏振光,圆偏振光被样品反射,返回的光束携带着样品信息再次经过四分之一波片并到达非偏振分束器中。参考臂和样品臂两路反射光在非偏振分束器中发生干涉,经过偏振分束器后分为相互垂直的两路偏振光并分别被光谱仪探测到。根据光谱仪探测到的两路垂直偏振信号可以得到样品的 B-scan 图,利用琼斯矩阵可以得到反射光的附加相位差图像。

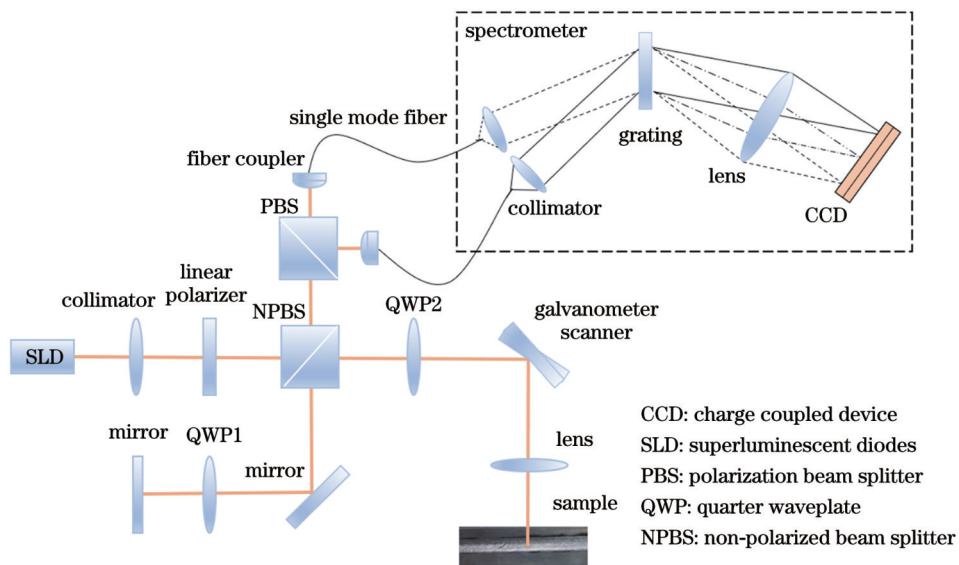


图 5 PS-OCT 系统示意图
Fig. 5 Schematic of PS-OCT system

3.2 匙孔样品深度测量

设计图 6(a) 所示的匙孔样品。匙孔为锥形,上表面圆

直径为 3 mm,下底面圆直径为 1 mm,锥形孔高度为 3 mm,粗糙度小于 3.2×10^{-6} ,与实际焊接匙孔情况相吻合。

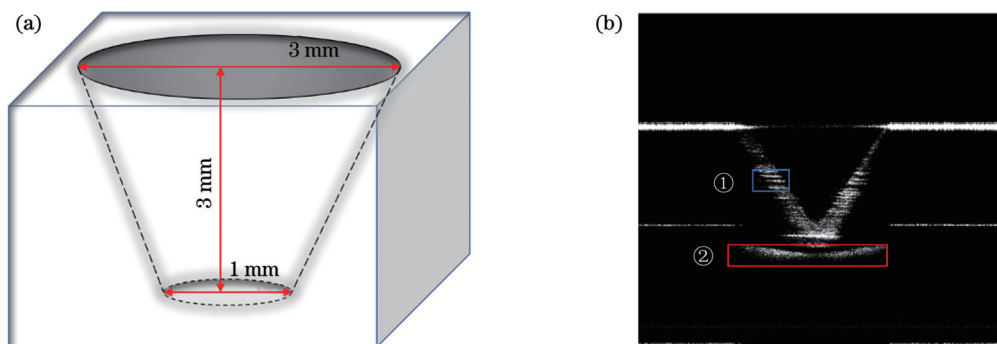


图 6 匙孔样品及测量图像。(a) 匙孔样品示意图; (b) 匙孔 B-scan 图像

Fig. 6 Keyhole sample and measured image. (a) Schematic of keyhole sample; (b) B-scan image of keyhole

为了对多重反射伪影现象进行说明,首先利用普通 OCT 系统 (非 PS-OCT 系统) 对匙孔进行扫描

成像,得到图 6(b) 所示的匙孔 B-scan 图像,其中白色亮线为焊件表面。方框 ① 所示的“V”字形结构为

匙孔内壁的反射信号,方框②内的信号对应的深度大于匙孔的实际深度,是光束经匙孔侧壁或底面反射后又到达匙孔的其他位置,然后被系统探测到的信号,即上文提到的影响实际深度的多重反射伪影。该多重反射伪影与文献[22]中得到的结果相同。

为了验证本文方法在不同入射方向上去除多重反

射伪影的效果,利用搭建的 PS-OCT 系统对匙孔样品的不同位置进行成像,结果如图 7 所示。此时 PS-OCT 探测光束未进行横向扫描,得到随时间变化的 M-scan 图。图 7 第一列为探测光束位置与角度示意图,第二列为原始 M-scan 图像,第三列为 PS-OCT 得到的附加相位差图像,第四列为经过本文方法筛选后的 M-scan 图像。

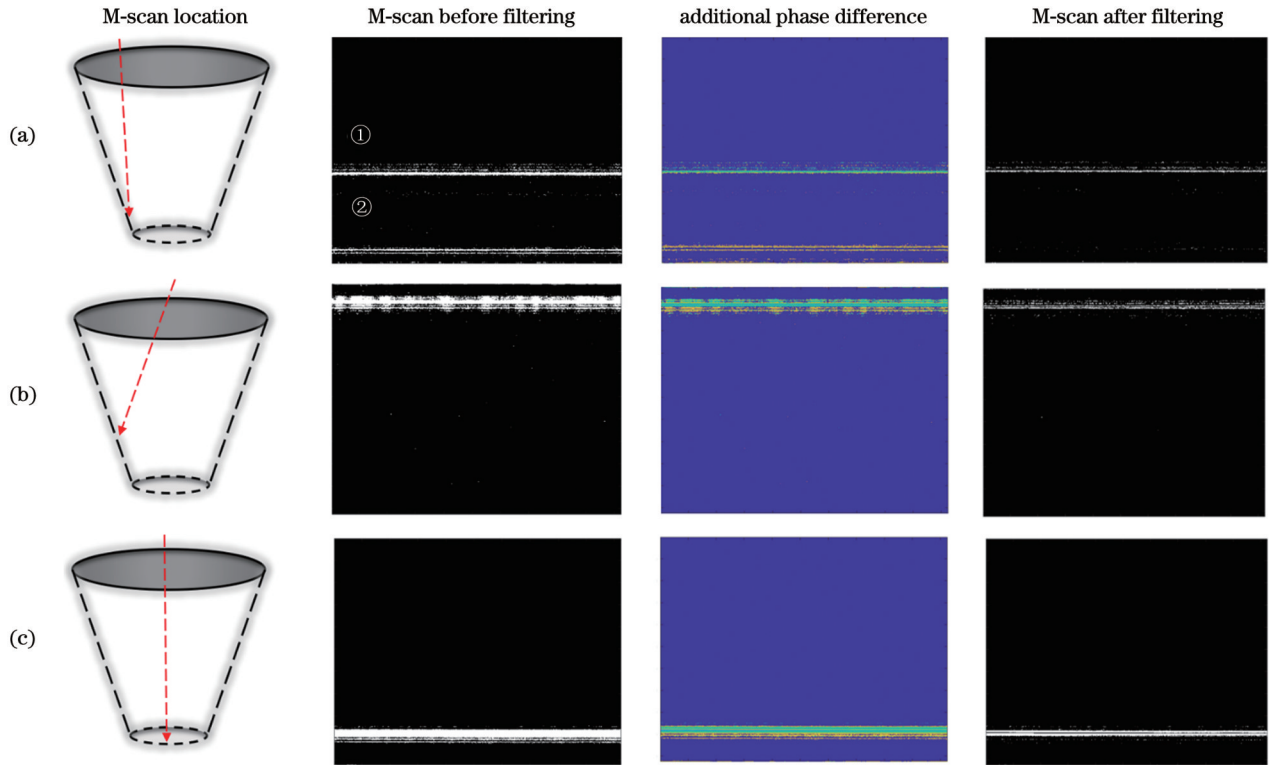


图 7 不同入射条件下的 M-scan 图和附加相位差图。(a) 距离底部较近的侧壁垂直入射; (b) 以 30° 角度入射侧壁; (c) 在匙孔底部垂直入射

Fig. 7 M-scan images and additional phase difference images under different incidence conditions. (a) Vertical incidence on sidewall near bottom; (b) incidence on sidewall at 30° angle; (c) vertical incidence at bottom of keyhole

PS-OCT 光束的入射角度如图 7 第一列箭头所示。在图 7(a) 所示的原始 M-scan 图像中,不仅存在反映光束入射点深度的单次反射信号①,还有多重反射伪影信号②,无法区分二者哪个是实际深度。在图 7 第三列的附加相位差图像中,两个信号的附加相位差有明显区别,单次反射信号的附加相位差为 0,由此可以得到信号①为单次反射信号。利用附加相位差图像,对原始 PS-OCT 图像进行筛选,得到图 7 第四列所示的图像。筛选后的图像仅保留单次反射信号,深度位置更加准确。图 7 第四列 PS-OCT 图像的信号强度低于第二列 PS-OCT 图像,这是由于去掉了多重反射信号,仅保留了单次反射信号,因此图像中的信号减弱。从图 7 第三列附加相位差图像可以看出,无论光线从哪个角度入射,都存在多重反射造成的伪影。无论何种情况,利用本文提出的方法均能将多重反射伪影去掉。

利用搭建的 PS-OCT 系统对匙孔样品进行扫描

成像,结果如图 8 所示。扫描长度为 2 mm,每个 B-scan 包含 512 个 A-line,每个 A-line 包含 512 个采样点。图 8 第一列为扫描位置示意图,扫描位置由虚线标出。图 8 第二列为原始 B-scan 图像,第三列为对应的附加相位差图像,第四列为经过本文方法筛选后的 B-scan 图像。

利用 PS-OCT 分别对距离匙孔底部较近的侧壁进行扫描成像[图 8(a)],对匙孔侧壁和底部边缘位置进行扫描成像[图 8(b)],以及在匙孔底部中间位置进行扫描成像[图 8(c)]。在图 8(a) 的原始 B-scan 图像中可以看到两个反射面的信号,而在附加相位差图像中可以区分侧壁的单次反射信号(上面的信号)和多重反射伪影信号(下面的信号)。利用本文提出的方法对原始 B-scan 图像进行筛选后消除了多重反射伪影,仅留下侧壁单次反射信号对应的真实图像。在图 8(b) 中,扫描位置包含了匙孔侧壁和底部,利用本文提出的方法同样消除了多重反射伪影,得到了匙孔侧壁和底

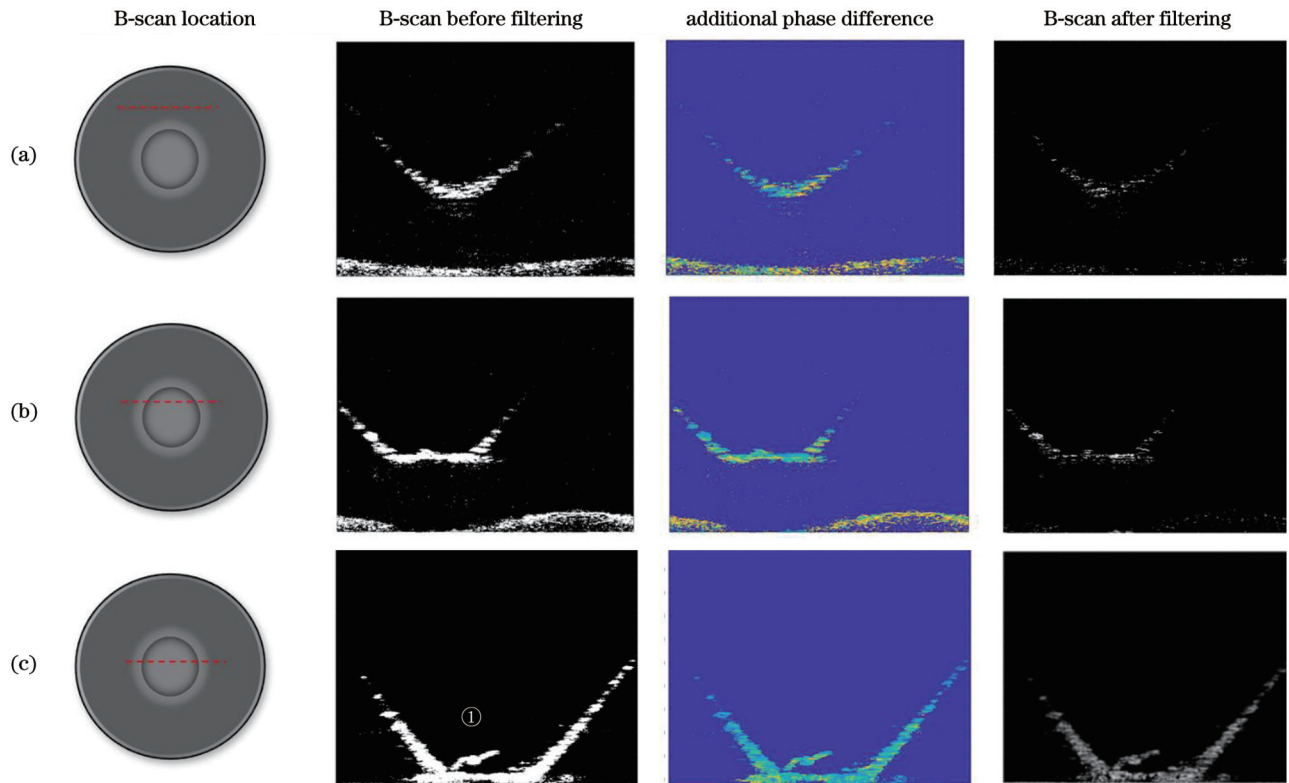


图8 匙孔不同位置的B-scan图及附加相位差图。(a)距离底部较近的侧壁;(b)匙孔底部边缘位置;(c)匙孔底部中间位置
Fig. 8 B-scan images and additional phase difference images at different positions of keyhole. (a) Sidewalls near bottom; (b) edge position of keyhole bottom; (c) middle position of keyhole bottom

部的真实图像。利用原始B-scan图像结合百分位滤波(取80%深度)得到的匙孔深度是3.70 mm,测量误差为23%。利用本文方法筛选后的图像,测量得到的匙孔深度是3.05 mm,测量误差为1.6%,显著优于百分比滤波方法得到的匙孔深度测量误差。

匙孔样品底部的中间位置存在一个小凸起。在图8(c)中对匙孔底部中间进行成像时,可以观察到一个凸出来的反射面,如图8(c)中①所示。在附加相位差图像中可以看出,凸出位置和底部位置的颜色相同,代表两位置的附加相位差相同,即图8(c)中①是单次反射信号对应的真实存在的样品结构,筛选后的图像可以反映样品的真实结构。此外,由于图8(c)的样品成像深度较深,因此样品的多重反射伪影位置已超出PS-OCT系统的成像深度范围,因此没有在图像中显示。

4 结 论

针对OCT测量匙孔深度易受多重反射噪声影响的问题,提出了一种基于偏振OCT的匙孔深度测量方法。该方法基于光在金属表面反射时两正交方向的不同复反射率会引入附加相位差的原理,利用偏振OCT得到反射光两正交方向的附加相位差,区分出匙孔内的单次反射光 and 多重反射光,再利用单次反射光准确计算匙孔深度。主要结论如下:

1) 基于光线追迹法对铜和铝两种材料匙孔的深

度测量进行了仿真,结果表明,普通OCT的匙孔深度测量误差分别为16.8%和45.6%,对其进行百分位滤波后,测量误差分别降为3.27%和6.24%,所提方法的测量误差分别为1.05%和0.12%。

2) 利用所提方法对铝制匙孔样品的深度进行了测量,得到的匙孔深度测量误差为1.6%,与常用的百分位滤波方法的测量误差(23%)相比,所提方法显著提高了匙孔深度测量的准确性。

参 考 文 献

- [1] Acherjee B. Hybrid laser arc welding: state-of-art review[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 99: 60-71.
- [2] 李林贺, 邓适. 动力电池壳体激光焊接工艺[J]. 焊接技术, 2013, 42(7): 30-32.
Li L H, Deng S. Laser welding technology of power battery shell [J]. Welding Technology, 2013, 42(7): 30-32.
- [3] Bautze T, Kogel-Hollacher M. Keyhole Depth is just a Distance [J]. Laser Technik Journal, 2014, 11(4): 39-43.
- [4] Sreedhar U, Krishnamurthy C V, Balasubramaniam K, et al. Automatic defect identification using thermal image analysis for online weld quality monitoring[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(7): 1557-1566.
- [5] Stritt P, Weber R, Graf T, et al. Utilizing laser power modulation to investigate the transition from heat-conduction to deep-penetration welding[J]. Physics Procedia, 2011, 12(2): 224-231.
- [6] 魏明贤, 邹冠华, 王俊涛, 等. 激光焊缝无损检测技术研究现状 [J]. 无损探伤, 2022, 46(1): 25-30.
Wei M X, Wu G H, Wang J T, et al. Research status of laser weld nondestructive testing technology[J]. Nondestructive Testing Technology, 2022, 46(1): 25-30.

- [7] Deyneka Dupriez N, Denkl A. Advances of OCT Technology for Laser Beam Processing: precision and quality during laser welding [J]. *Laser Technik Journal*, 2017, 14(4): 34-38.
- [8] Stadter C, Schmoeller M, Zeitler M, et al. Process control and quality assurance in remote laser beam welding by optical coherence tomography[J]. *Journal of Laser Applications*, 2019, 31(2): 022408.
- [9] Hariri L P, Mino-Kenudson M, Mark E J, et al. *In vivo* optical coherence tomography: the role of the pathologist[J]. *Archives of Pathology & Laboratory Medicine*, 2012, 136(12): 1492-1501.
- [10] Cho J H, Na S J. Implementation of real-time multiple reflection and Fresnel absorption of laser beam in keyhole[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 39(24): 5372-5378.
- [11] Volpp J. Formation mechanisms of pores and spatters during laser deep penetration welding[J]. *Journal of Laser Applications*, 2018, 30(1): 012002.
- [12] Schmoeller M, Stadter C, Liebl S, et al. Inline weld depth measurement for high brilliance laser beam sources using optical coherence tomography[J]. *Journal of Laser Applications*, 2019, 31(2): 022409.
- [13] Boley M, Abt F, Weber R, et al. X-ray and optical videography for 3D Measurement of capillary and melt pool geometry in laser welding[J]. *Physics Procedia*, 2013, 41(4): 88-95.
- [14] Fetzer F, Boley M, 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.
- [15] 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.
- [16] 尹东星, 曹晓燕. 光学相干断层扫描技术在激光焊熔深在线检测中的应用[J]. *焊接技术*, 2018, 47(12): 87-89.
- Yin D X, Cao X Y. Application of optical coherence tomography in on-line detection of laser welding penetration[J]. *Welding Technology*, 2018, 47(12): 87-89.
- [17] 杨雨迎, 崔占忠, 王玲, 等. 金属目标表面的反射激光偏振特性[J]. *科技导报*, 2013, 31(11): 28-32.
- Yang Y Y, Cui Z Z, Wang L, et al. Reflective laser polarization characteristics of metal target surface in the short-range detection [J]. *Science & Technology Review*, 2013, 31(11): 28-32.
- [18] Walther J, Golde J, Kirsten L, et al. *In vivo* imaging of human oral hard and soft tissues by polarization-sensitive optical coherence tomography[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2017, 22(12): 121717.
- [19] Du J, Wei Z Y. Numerical investigation of thermocapillary-induced deposited shape in fused-coating additive manufacturing process of aluminum alloy[J]. *Journal of Physics Communications*, 2018, 2(11): 115013.
- [20] Schmoeller M, Neureiter M, Stadter C, et al. Numerical weld pool simulation for the accuracy improvement of inline weld depth measurement based on optical coherence tomography[J]. *Journal of Laser Applications*, 2020, 32(2): 022036.
- [21] Liu P, Huang L J, Gan L, et al. Effect of plate thickness on weld pool dynamics and keyhole-induced porosity formation in laser welding of Al alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 111(3): 735-747.
- [22] Sokolov M, Franciosa P, Al Botros R, et al. Keyhole mapping to enable closed-loop weld penetration depth control for remote laser welding of aluminum components using optical coherence tomography[J]. *Journal of Laser Applications*, 2020, 32(3): 032004.

Measurement Method of Keyhole Depth in Laser Welding Based on Polarization Sensitive OCT

Li Zhaoyang^{1,2}, Li Zhongliang^{2,3*}, Nan Nan^{2**}, Liu Teng^{2,3}, Yang Chenming^{2,3}, Wan Xinjun¹, Zhang Yiheng^{2,3}, Wang Xiangzhao^{2,3}

¹*School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;*

²*Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;*

³*Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract

Objective In the laser welding, the welding fusion depth can characterize the weld bonding strength and affect the welding quality. An accurate measurement of the keyhole depth can prevent potential welding defects and improve the laser welding quality. However, conventional welding monitoring methods cannot achieve accurate keyhole depth measurements. The measuring beam of the optical coherence tomography (OCT) can be coaxial with the machining laser and has horizontal and longitudinal resolutions at the micron level. It is a proven detection method that can measure the keyhole depth in a nondestructive manner during welding, thus achieving a high-precision measurement of the keyhole depth. However, the multiple reflections of the OCT detecting beams in the metal keyhole, as well as the welding splash during the measurement process and other factors, may lead to the measurement signals of OCT not only containing the signals reflected from the bottom or side wall of the keyhole but also containing the metal vapor and welding splash reflections as well as the signals reflected from the inner wall of the keyhole. Consequently, OCT cannot accurately measure the depth of the bottom of the keyhole. To solve this problem, a method of laser welding keyhole depth detection using polarimetric OCT is proposed in this study, which eliminates the influence of multiple reflected lights on the keyhole depth measurement and improves the measurement accuracy.

Methods Based on the principle that the phase retardation of light reflected on a metal surface varies with the incidence angle, the

polarization sensitive OCT (PS-OCT) system is used to image a laser-welded keyhole. Circularly polarized light is incident at the bottom of the vertical keyhole, and a phase retardation of $\pi/2$ is considered as the reference value. The phase retardation obtained from the keyhole measurements using PS-OCT is compared with the reference value. The PS-OCT signal corresponding to the phase retardation, which is the same as the reference value, is marked as the effective signal, and the remaining PS-OCT signal generated by multiple reflections is marked as an invalid signal. An effective PS-OCT signal is used to accurately calculate the keyhole depth. Two keyhole models of copper and aluminum are established, and a ray-tracing method is used to simulate the proposed method. Based on the simulation, a keyhole imitation sample is designed and the OCT is used to illustrate the multiple reflection artifacts of the sample. Subsequently, a PS-OCT experimental system is built, and M-scan- and B-scan measurements are performed at different positions of the samples using polarimetric OCT. The depth screened using the proposed method is compared with that using the commonly used 80-percentile filtering method.

Results and Discussions Simulation parameters are determined based on the X-ray images (Table 1), and a ray-tracing simulation analysis is performed using a software [Fig. 4(a)]. The results demonstrate that the proposed method can significantly improve the accuracy of the keyhole depth calculation by screening the PS-OCT signals [Fig. 4 (c)] and is better than the current commonly used 80-percentile filtering method [Fig. 4 (b)]. The keyhole sample is designed [Fig. 6 (a)], and multiple artifacts in the keyhole are first described based on the scanning sample of an ordinary OCT system [Fig. 6 (b)]. Based on the established PS-OCT experimental system, M-scan imaging (Fig. 7) and B-scan imaging (Fig. 8) are performed at different locations of the samples, and the original PS-OCT images, corresponding phase retardation images, and PS-OCT images screened in this study are obtained. It can distinguish between single reflected signals, multiple reflected signals, and stray light signals in the keyhole, which effectively improves the accuracy of the keyhole depth measurement.

Conclusions The existence of multiple-reflection artifacts is proven in the simulation, and the measurement errors of the OCT keyhole depth are 16.8% and 45.6% for copper and aluminum, respectively. The measurement errors of the keyhole depth are 3.27% and 6.42% for copper and aluminum, respectively, which are determined by using the 80-percentile filtering method. The errors in the keyhole depth measured by using this method are 1.05% for copper and 0.12% for aluminum. The designed keyhole samples are imaged using the established polarimetric OCT system. It is proven that multi-reflection artifacts are eliminated after screening by the proposed method, and a real image is obtained, which can reflect the real structure of the sample. The keyhole depth measurement error obtained using the original PS-OCT image combined with the 80-percentile filtering method is 23%, whereas that obtained using the proposed method is only 1.6%.

Key words laser technique; laser welding; optical coherence tomography; keyhole depth; polarization