

奥氏体不锈钢光纤激光同轴保护焊接的实时监测

任 勇, 武 强*, 邹江林, 陈 乐, 肖荣诗

北京工业大学激光工程研究院高功率及超快激光先进制造实验室, 北京 100124

摘要 采用光纤激光同轴保护焊接奥氏体不锈钢, 利用激光焊接监测系统同步采集焊接过程中的光信号数据, 并结合羽辉的形貌研究不同焊接条件对焊缝成形及光信号强度的影响规律。研究表明, 光信号强度随着激光功率的增加逐渐增大。当离焦量从 -6 mm 变化到 6 mm 时, 光信号强度先减小后增大。光信号变化可反映焊缝熔深的变化, 可用于检测搭接间隙和焊缝位置变化引起的焊缝缺陷。通过 P 信号数据可判断焊接质量异常区的准确位置, 焊接过程中光信号的强度同羽辉体积正相关。

关键词 激光技术; 光纤激光焊接; 光信号; 实时监测; 羽辉

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0502003

Real-Time Monitoring of Coaxial Protection Fiber Laser Welding of Austenitic Stainless Steels

Ren Yong, Wu Qiang, Zou Jianglin, Chen Le, Xiao Rongshi

*High-Power and Ultrafast Laser Manufacturing Laboratory, Institute of Laser Engineering,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

Abstract The austenitic stainless steel is welded with the fiber laser and coaxial protection method. The optical signals during the welding process are collected by the laser welding and synchronously monitoring system, which is combined with the shape of plume to study the influence laws of different welding conditions on the weld formation and optical signal intensity. The results show that the optical signal intensity gradually increases with the increase of laser power. When the defocusing amount changes from -6 mm to 6 mm , the optical signal intensity decreases first and then increases. The optical signal change can reflect the change of weld penetration, which can be used to detect the weld defects caused by the change of the lap gap and the weld position. The exact location of the area with the abnormal welding quality can be judged by analyzing P signal data. The optical signal intensity is positively related to the plume volume during the welding process.

Key words laser technique; fiber laser welding; optical signal; real-time monitoring; plume

OCIS codes 140.3460; 140.3380; 140.3390

1 引 言

奥氏体不锈钢具有韧性高、可塑性强、耐腐蚀性好、价格低廉等优点, 在多个领域得到广泛的应用。然而, 奥氏体不锈钢是一种导热系数小、线膨胀系数大的材料, 采用传统的焊接方法容易引起变形。光纤激光同轴焊接技术具有能量密度高、焊接热输入小、能量控制精确、运行成本低、加工柔性高等优点^[1-2], 有望实现

收稿日期: 2016-12-12; 收到修改稿日期: 2017-01-09

基金项目: 北京市教委科技发展计划(KM201510005014)

作者简介: 任 勇(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光焊接过程检测方面的研究。

E-mail: yongren@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 肖荣诗(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光先进制造技术方面的研究。

E-mail: rsxiao@bjut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: jlwuqiang@bjut.edu.cn

航天发动机主动冷却结构、轨道交通工具等关键构件的精密焊接制造。

激光焊接是一个远离平衡态的物理冶金过程,该过程中产生的光信号变化与焊接质量密切相关^[3-7]。在光纤激光焊接过程中,主要的光辐射包括紫外及可见光辐射和红外热辐射^[8]。利用光电传感器同轴检测焊接过程中金属蒸气、熔池等产生的光信号变化,可实现激光焊接过程的同步检测。近年来,国内外学者在光纤焊接过程中利用同轴光电传感器检测光信号强度,指出利用光信号强度变化可判断焊接熔透状态以及塌陷、弧坑、焊缝氧化、飞溅等缺陷^[9-10];焊接质量和焊缝熔深与光信号存在对应关系,且焊接质量异常位置对应的羽辉行为发生变化^[11-15]。Colombo等^[16-17]通过检测等离子体信号、激光反射信号和温度信号来区分不同的搭接间隙,并判断焊接质量。复杂内流道构件结构复杂,其冷却通道呈现密集、三维、多变的特点,对加工精度要求很高,而采用光纤激光同轴保护焊接过程同步检测及评估的研究鲜有报道。

本文利用激光焊接监测(LWM)系统,对不同焊接条件下焊接过程产生的红外光信号(T)、紫外及可见光信号(P)实施检测。通过光信号和焊缝宏观形貌的比对分析,获得了各光信号变化规律,及焊接质量与影响因素的映射关系。采用高速摄像机拍摄羽辉体积,对光信号变化的机理进行了分析。通过对光信号数据进行设定时间步长内的均值计算分析,可判断出焊接状态异常区域的准确位置。

2 同轴光信号检测系统和试验方法

同轴光信号检测系统试验装置如图1所示,激光器采用美国IPG公司的YLS-6000光纤激光器,最大输出功率为6 kW,波长为 $1.07\ \mu\text{m}$,光纤芯径为 $200\ \mu\text{m}$,准直镜焦距为150 mm,聚焦镜焦距为200 mm,光斑直径为0.26 mm。采用LWM作为光信号采集系统,采样频率设置为1 kHz。内径为6 mm的同轴喷嘴安装在德国Precitec公司的Welding head YW50焊接头末端,喷嘴末端距离工件表面为4 mm。利用YW50焊接头自身配置的传感器,可以检测波长为1100~1800 nm的T光信号和0~600 nm的P光信号。采用彩色高速摄像机观测焊接过程羽辉行为,拍摄频率为2000 frame/s。焊接过程中的光信号经透镜进入分光镜后,分别传输到P和T光电传感器中,经过处理单元变换后的信号输入到计算机,生成光信号测试数据。

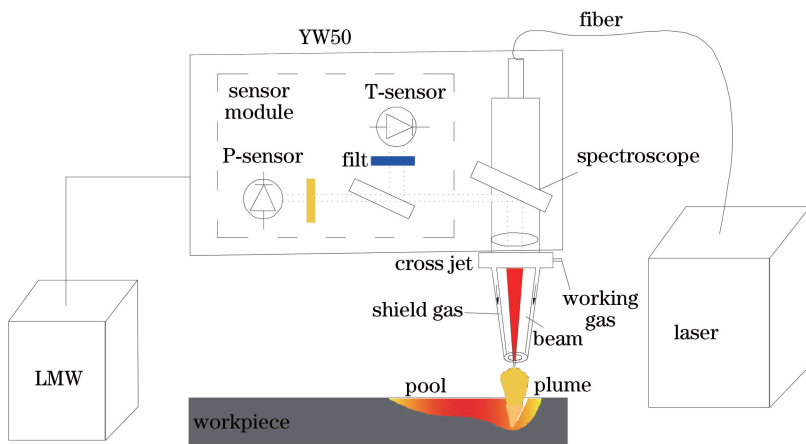


图1 同轴光信号检测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of coaxial optical signal monitoring system

焊接板材为304奥氏体不锈钢平板。激光功率为1.6 kW,保护气体氩气的流量为15 L/min,焊接速度为3 m/min(以下简称工艺参数1)。采用平板扫描焊的方式研究工艺参数对光信号的影响规律,试样尺寸为 $100\ \text{mm} \times 50\ \text{mm} \times 5\ \text{mm}$;采用搭接焊试验研究搭接间隙和焊缝位置对光信号的影响规律,上板尺寸为 $100\ \text{mm} \times 50\ \text{mm} \times 1\ \text{mm}$,下板尺寸为 $100\ \text{mm} \times 50\ \text{mm} \times 5\ \text{mm}$ 。

为了解释同轴保护焊接时,不同离焦量和间隙条件下光信号变化与羽辉形貌的关系,同时采用旁轴保护焊接进行验证试验。由于同轴焊接喷嘴末端距离工件表面仅为4 mm,远小于羽辉高度^[18],为观测完整羽辉形貌,选用旁轴喷嘴进行验证试验,并通过对比不同保护焊接中光信号强度随离焦量的变化关系来验证该试验的可行性,试验参数均采用工艺参数1。设置局部间隙如图2所示,其中 d 为搭接间隙。

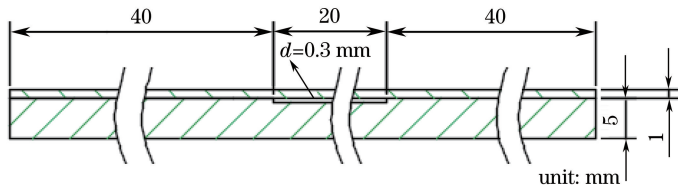


图 2 局部间隙示意图

Fig. 2 Schematic diagram of local gap

试件表面在焊前用丙酮清理,焊后试样经抛光腐蚀后放在体式显微镜下观察焊缝微观形貌。运用 Adobe Photoshop 软件计算羽辉面积,运用 Matlab 软件对信号进行除噪处理及均值计算。

3 试验结果和分析

3.1 工艺参数对光信号及焊缝成形的影响规律

同轴保护焊接的熔深及光信号随工艺参数的变化规律如图 3 所示。从图 3(a)中可以看出,焊缝熔深、P 信号和 T 信号强度的归一化数值均随激光功率的增加而增大。由图 3(b)可知,当离焦量从 -6 mm 变化至 6 mm 时,焊缝熔深先增大后减小;P 信号和 T 信号强度的归一化数值先减小后增大。

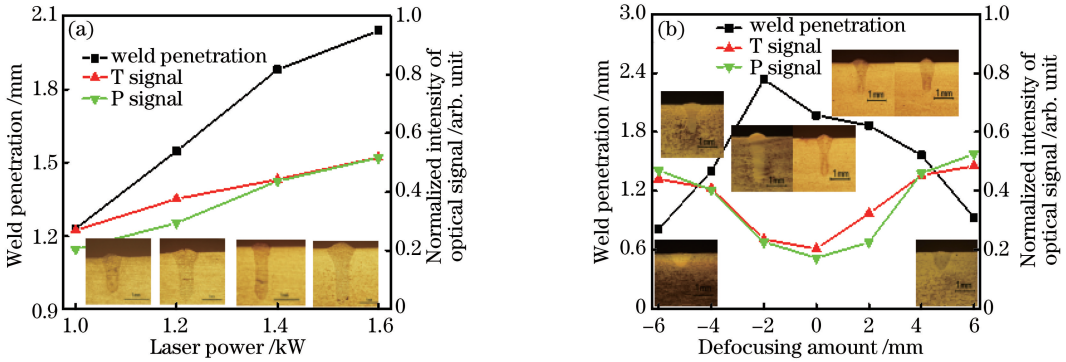


图 3 工艺参数对焊缝熔深及光信号的影响。(a)激光功率;(b)离焦量

Fig. 3 Effect of processing parameters on weld penetration and optical signals. (a) Laser power; (b) defocusing amount

P 信号的变化主要源自金属蒸气辐射,而 T 信号的改变主要源自金属蒸气和熔池的热辐射^[5,9,19]。激光功率的增加会提高工件表面的激光功率密度,导致小孔内金属蒸发量和金属蒸气压力增大,进而增大焊接熔深。蒸发量和蒸气压力增大导致喷出小孔的金属蒸气增多,从而使熔池和小孔上方金属羽辉体积增大。在较小的激光功率范围内,羽辉的温度几乎不变^[20]。羽辉体积的增加使得羽辉辐射的光信号强度增大,因此,焊缝熔深、P 信号和 T 信号归一化强度均随激光功率的增加而增大。

图 3(b)中光信号强度归一化数值随离焦量的变化呈“V”字形变化。在旁轴保护焊接中,利用 LWM 采集光信号,采用高速摄像机对羽辉形态进行观测,结果如图 4 所示。离焦量 f 从 -6 mm 变化到 6 mm 时,羽辉面积(因为羽辉体积与面积正相关,本文通过计算羽辉面积间接表示羽辉体积)和光信号强度归一化数值先减小后增大,在离焦量为 0 mm 时达到极小值。结合图 3(b)和图 4 可知,同轴保护焊接和旁轴保护焊接中 P 信号和 T 信号强度随离焦量的变化规律几乎是一致的。这表明同轴保护和旁轴保护中,羽辉随离焦量的变化规律也是一致的。在负离焦量条件下,激光束聚焦于工件内部,使工件内部的激光功率密度高于工件表面的,产生更强的气化作用,从而导致孔内的蒸汽压力和熔深增大;当负离焦量过大时,熔深逐渐减小。在正离焦量条件下,到达工件表面的激光光斑变大、激光功率密度减小,从而导致孔内的蒸汽压力和熔深减小。然而,激光光斑变大又使小孔开口处的直径增加,致使孔内的金属蒸气受到的孔壁阻力减小^[21],导致孔内喷出的金属蒸气增多,即羽辉体积增大。在较小的离焦量范围内,羽辉的温度几乎不变^[22]。因此,随着羽辉体积的增加,羽辉辐射出的光信号更强,导致 P 信号和 T 信号强度随着离焦量的增大而增大。

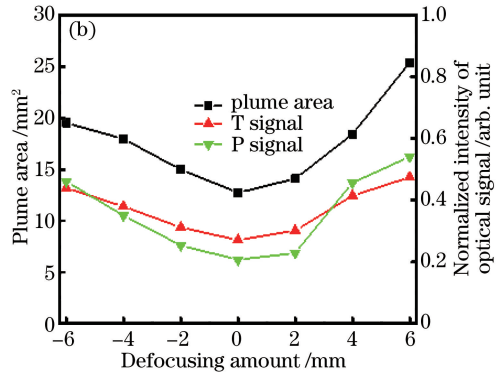
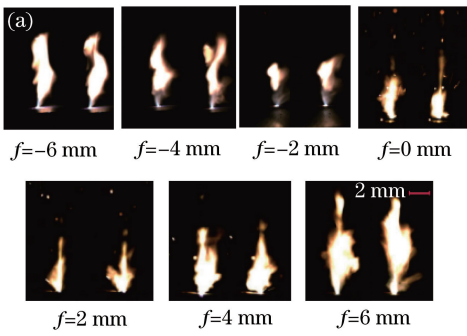


图 4 (a)羽辉形貌和(b)离焦量对光信号和羽辉面积的影响

Fig. 4 (a) Plume morphology and (b) effect of defocusing amount on optical signals and plume areas

3.2 搭接间隙对光信号和焊缝成形的影响规律

复杂内流道构件主要为搭接焊缝,搭接间隙过大会影响焊接质量。搭接间隙对光信号的影响规律如图 5 所示,对焊缝成形的影响如图 6 所示。为消除噪声对光信号的影响,采用 Savitzky-Golay 算法处理光信号数据。

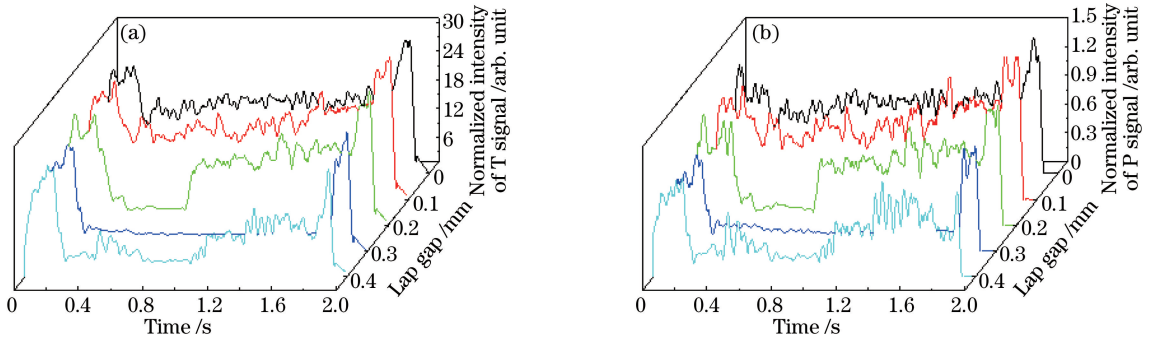


图 5 搭接间隙对光信号的影响。(a) T 信号;(b) P 信号

Fig. 5 Effect of lap gaps on optical signals. (a) T signal; (b) P signal

由图 5 可知,异常焊缝的光信号强度均值都低于正常值;未熔合区的非塌陷焊缝对应的光信号强度均值明显高于弧坑及塌陷焊缝位置的。当搭接间隙 $d \leq 0.1$ mm 时,P 信号和 T 信号无明显波动,焊缝成形良好,将此条件下光信号强度均值作为正常值,如图 6(a)、(b)所示。当 $d = 0.2$ mm 时,焊缝表面局部出现塌陷,塌陷区内的焊缝宏观形貌由钉头形变为花瓶形,如图 6(c)所示,此时 P 信号和 T 信号强度均值分别为正常值的 32% 和 34%。当 $d = 0.3$ mm 时,焊缝表面完全塌陷,焊缝宏观形貌和光信号的变化与 $d = 0.2$ mm 时的基本一致,如图 6(d)所示。当 $d = 0.4$ mm 时,焊缝表面弧坑及塌陷焊缝与非塌陷焊缝相互交错,三种典型的焊缝横截面如图 6(e)所示。

利用高速摄像机观察羽辉形貌,并分析焊缝塌陷时光信号强度均值减小的原因。间隙条件下旁轴保护焊接光信号强度均值、羽辉形貌和焊缝表面形貌如图 7 所示。

由图 7 可知, I 段和 III 段内焊缝表面成形良好,光信号强度稳定,羽辉形貌基本一致; II 段内焊缝表面塌陷,羽辉面积和光信号强度均明显减小。在激光焊接过程中,小孔周围被低强度的熔融金属包围^[23],间隙的存在致使孔内的高压金属蒸汽容易从间隙处外漏,导致小孔内部蒸汽压力减小,小孔内部喷出的金属蒸气减少,即羽辉体积减小。因此,焊缝塌陷处的 T 信号和 P 信号强度明显减小。

3.3 焊缝位置对光信号及焊缝成形的影响规律

在复杂内流道构件激光焊接过程中,焊接变形及轨迹误差会导致焊缝位置偏离筋中心,影响焊接质量。不同焊接位置对光信号强度及焊缝质量的影响如图 8、图 9 所示,其中 L 为焊缝与筋(筋宽为 2 mm)中心的距离。

从图 8 可以看出,当 $L \leq 0.6$ mm 时,P 信号和 T 信号强度相近;当 $L = 0.8$ mm 和 $L = 1$ mm 时,P 信号和 T 信号强度逐步降低。由图 9 可知,当 $L \leq 0.6$ mm 时焊缝成形良好,两种光信号的强度无明显变化;当

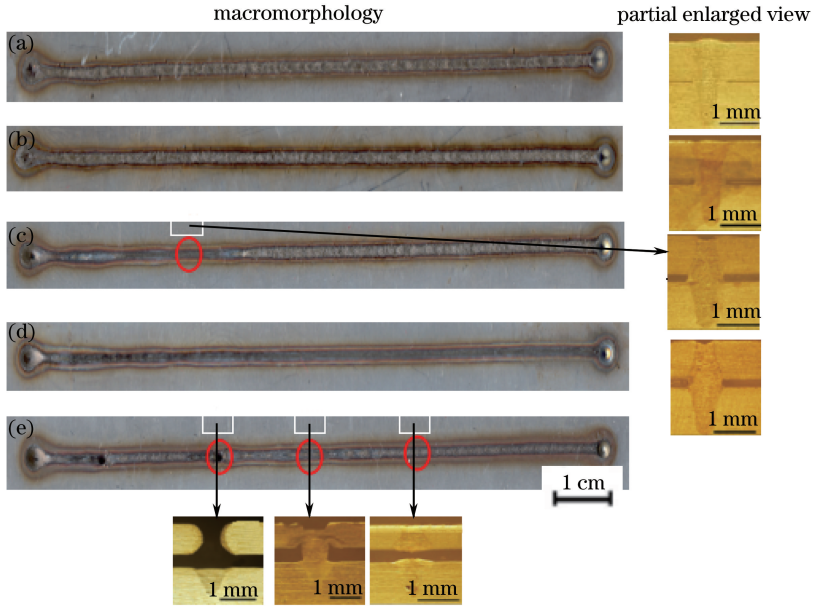


图 6 搭接间隙对焊缝成形的影响。(a) $d = 0$ mm; (b) $d = 0.1$ mm; (c) $d = 0.2$ mm; (d) $d = 0.3$ mm; (e) $d = 0.4$ mm

Fig. 6 Effect of lap gaps on weld formation. (a) $d = 0$ mm; (b) $d = 0.1$ mm; (c) $d = 0.2$ mm; (d) $d = 0.3$ mm; (e) $d = 0.4$ mm

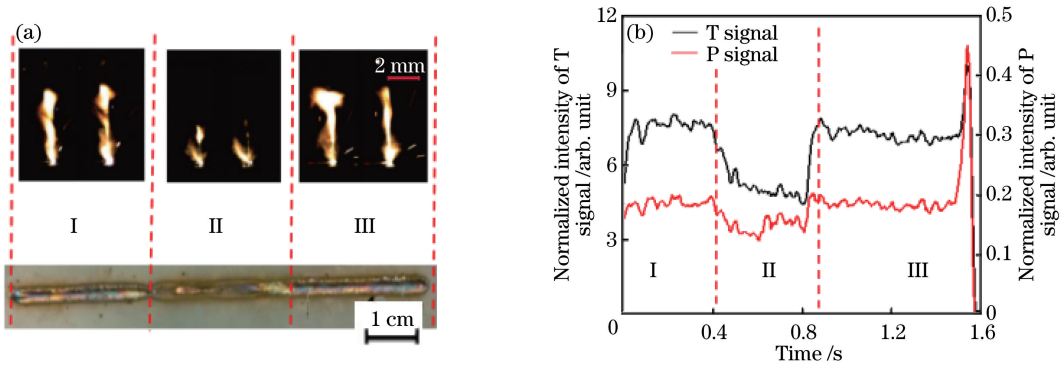


图 7 搭接间隙对光信号的影响。(a) T 信号; (b) P 信号

Fig. 7 Effect of lap gaps on optical signals. (a) T signal; (b) P signal

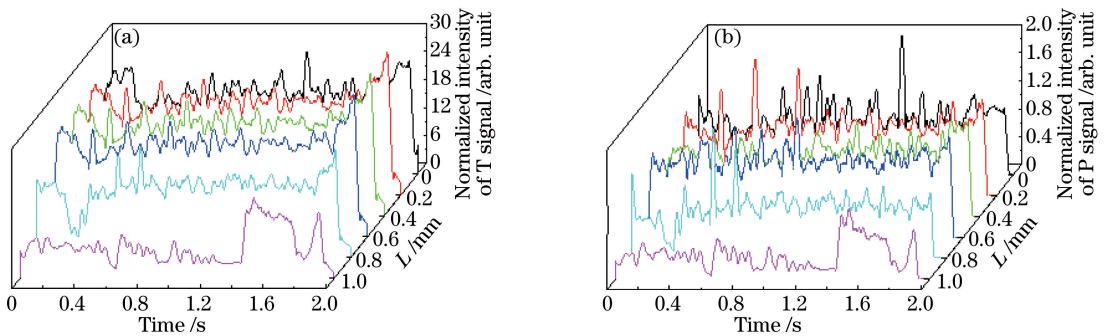


图 8 焊缝位置对光信号的影响。(a) T 信号; (b) P 信号

Fig. 8 Effect of weld position on optical signals. (a) T signal; (b) P signal

$L = 0.8$ mm 时, 焊缝表面虽无明显变化, 但是焊缝横截面出现异常, 在搭接面下部, 焊缝向流道一侧凸起; 当 $L = 1$ mm 时, 焊缝表面塌陷, 未形成完整搭接焊缝, P 信号和 T 信号强度降低到正常值的 32% 和 36%。

3.4 间隙条件下焊接质量的评估

分析试验数据可知, 在优化焊接工艺条件下, 焊接过程稳定, 焊缝成形良好, 光信号稳定; 当焊接条件变

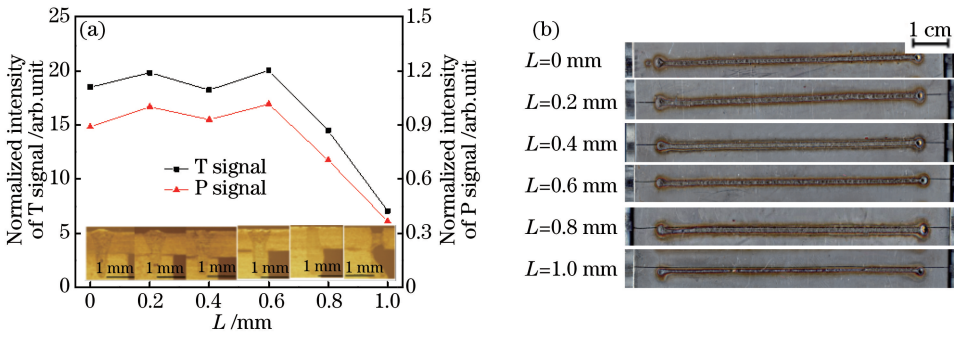


图 9 焊缝位置对(a) 光信号强度和(b) 焊缝表面的影响

Fig. 9 Effect of weld position on (a) intensity of optical signals and (b) weld surface

化较大时,光信号强度及波动幅度均有明显改变,焊接质量异常。通过对光信号数据进行处理和计算,获取焊接状态异常区域的准确位置。激光焊接是一个时变的过程,为了增加焊接质量评估精度,计算单位时间步长为 0.04 s 时的光信号强度均值。其中,某时间步长内的光信号强度均值为

$$A(m) = \frac{1}{40} \sum_{i=40 \times m - 39}^{40 \times m} a(i), \quad (1)$$

式中 m 为步长数, $a(i)$ 为第 i 个点的光信号强度值。令某时间步长内的光信号强度的波动值 $\Delta A(m) = |A(m) - A_{\text{normal}}|$, 当 $\Delta A(m) \leq \Delta A_{\text{max}}$ 时, 焊接过程正常; 当 $\Delta A(m) > \Delta A_{\text{max}}$ 时, 焊接过程异常。其中, A_{normal} 为正常焊接条件下光信号的强度均值, ΔA_{max} 为正常焊接条件下光信号强度允许的最大波动值。则 ΔA_{max} 的计算式为

$$\Delta A_{\text{max}} = \max |A(m) - A_{\text{normal}}|. \quad (2)$$

实施长焊缝搭接焊接试验,上板尺寸为 200 mm × 100 mm × 1 mm,下板尺寸为 200 mm × 100 mm × 1.5 mm,搭接焊缝总长度为 180 mm,搭接间隙设定为 0.3 mm,长度为 30 mm,搭接间隙位置设置在板材的 85~115 mm 处。试验参数采用工艺参数 1,将图 5 中 $d=0$ mm 时的光信号变化作为参考曲线,试验采用 P 信号作为数据处理信号。通过计算可知,图 5 中 $d=0$ mm 时 P 信号的 $\Delta A_{\text{max}}=19.2\%$,因此 P 信号强度均值的参考范围设置为 $1 \pm 19.2\%$ 。

当局部搭接间隙 $d=0.3$ mm 时,P 信号的强度随时间的变化和焊缝形貌如图 10 所示。从图中可以看出,局部间隙处焊缝表面塌陷,且焊缝宏观形貌为花瓶形。通过对 P 信号计算可知,在第 43~59 点内, $\Delta A(m) > \Delta A_{\text{max}}$,可表征为焊接异常,其记录缺陷时间为 1.72~2.36 s,对应焊缝位置为 86~118 mm,同设置间隙位置基本吻合。

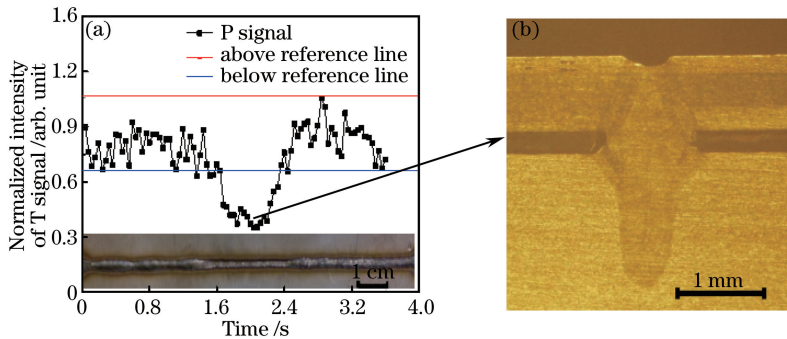


图 10 当搭接间隙为 0.3 mm 时,(a) P 信号强度随时间的变化和(b) 焊缝形貌

Fig. 10 (a) Change of P signal intensity with time and (b) weld morphology when lap gap is 0.3 mm

4 结 论

在光纤激光同轴焊接过程中,利用 LWM 采集焊接过程中的光信号,并分析光信号强度变化与焊接缺陷及羽辉形貌的对应关系,得到以下结论:

- 1) 光信号强度归一化数值同焊接功率正相关,其变化能反映出焊缝熔深的改变,利用该变化可检测焊接位置和搭接间隙引起的焊接缺陷。
- 2) 离焦量和搭接间隙对羽辉体积存在显著的影响,且 P 信号和 T 信号强度均值同羽辉体积正相关。
- 3) 通过对 P 信号强度均值的计算,能够准确判断出焊缝塌陷的具体位置,可作为光纤激光焊接质量的评估方法。

参 考 文 献

- [1] 左铁钊. 21 世纪的先进制造——激光技术与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 9-12.
- [2] Katayama S, Nagayama H, Mizutani M, *et al.* Fibre laser welding of aluminium alloy[J]. *Welding International*, 2009, 23(10): 744-752.
- [3] 陈武柱. 激光焊接与切割质量控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 34-62.
- [4] Chen Genyu, Xia Hailong, Zhou Cong, *et al.* Study on the mechanism of root humping of laser welding with high power fiber laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(2): 0203004.
陈根余, 夏海龙, 周 聪, 等. 高功率光纤激光焊接底部驼峰的机理研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0203004.
- [5] Kawahito Y, Kinoshita K, Matsumoto N, *et al.* Effect of weakly ionised plasma on penetration of stainless steel weld produced with ultra high power density fibre laser[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2008, 13(8): 749-753.
- [6] Park Y W, Park H, Rhee S, *et al.* Real time estimation of CO₂ laser weld quality for automotive industry[J]. *Optics and Laser Technology*, 2002, 34(2): 135-142.
- [7] Bardin F, Cobo A, Lopez-Higuera J M, *et al.* Optical techniques for real-time penetration monitoring for laser welding [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(19): 3869-3876.
- [8] Olsson R, Eriksson I, Powell J, *et al.* Challenges to the interpretation of the electromagnetic feedback from laser welding[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(2): 188-194.
- [9] Eriksson I, Powell J, Kaplan A F H. Signal overlap in the monitoring of laser welding[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(10): 105705.
- [10] Kaplan A F H, Norman P, Eriksson I. Analysis of the keyhole and weld pool dynamics by imaging evaluation and photodiode monitoring[C]. *Proceedings of LAMP2009*, 2009: 1-6.
- [11] Jiang Meng, Tao Wang, Chen Yanbin, *et al.* Characteristics of bead formation and plasma plume in fiber laser welding under vacuum[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(4): 0403010.
姜 梦, 陶 汪, 陈彦宾, 等. 真空激光焊接焊缝成形及等离子体特征[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0403010.
- [12] Wang T, Gao X D, Seiji K, *et al.* Study of dynamic features of surface plasma in high-power disk laser welding[J]. *Plasma Science and Technology*, 2012, 14(3): 245-251.
- [13] Sibillano T, Ancona A, Berardi V, *et al.* Real-time monitoring of laser welding by correlation analysis: The case of AA5083[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(10): 1005-1009.
- [14] Zhang X D, Chen W Z, Ashida E, *et al.* Relationship between weld quality and optical emissions in underwater Nd:YAG laser welding[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 41(5): 717-730.
- [15] You D Y, Gao X D, Katayama S. A novel stability quantification for disk laser welding by using frequency correlation coefficient between multiple-optics signals[J]. *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, 20(1): 327-337.
- [16] Colombo D, Previtali B. Through optical combiner monitoring of fiber laser processes[J]. *International Journal of Material Forming*, 2010, 3(s1): 1123-1126.
- [17] Colombo D, Colosimo B M, Previtali B. Comparison of methods for data analysis in the remote monitoring of remote laser welding[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(1): 34-46.
- [18] Shecheglov P Y, Uspenskiy S A, Gumenyuk A V, *et al.* Plume attenuation of laser radiation during high power fiber laser welding[J]. *Laser Physics Letters*, 2011, 8(6): 475-480.
- [19] Kawahito Y, Matsumoto N, Mizutani M, *et al.* Characterisation of plasma induced during high power fibre laser welding of stainless steel[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2008, 13(8): 744-758.
- [20] Gao M, Chen C, Hu M, *et al.* Characteristics of plasma plume in fiber laser welding of aluminum alloy[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 326: 181-186.
- [21] Li Shichun. Study on the coupling behavior between metallic vapor and melt pool during deep penetration welding with 10-kW level laser[D]. Hunan: Hunan University, 2014: 75-84.

李时春. 万瓦级激光深熔焊接中金属蒸气与熔池耦合行为研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2014: 75-84.

- [22] Li Shichun, Chen Genyu, Zhou Cong, *et al.* Plasma inside and outside keyhole during 10 kW level fiber laser welding [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(10): 104212.
李时春, 陈根余, 周 聪, 等. 万瓦级光纤激光焊接小孔内外等离子体研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(10): 104212.
- [23] Forsman T, Powell J, Magnusson C. Process instability in laser welding of aluminum alloys at the boundary of complete penetration[J]. *Journal of Laser Applications*, 2001, 13(5): 193-198.