

双波段信号实时监测高功率激光焊接*

雒江涛 程兆谷 强宏亮 张赵林 夏金安 王润文

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 记录和分析了高功率激光焊接中工作区的紫外和红外信号,着重分析了双波段信号与离焦量变化的对应规律。

关键词 高功率激光焊接,双波段,熔池,等离子体

高功率激光焊接在工业上,特别是汽车、航天等领域的应用越来越广泛,同时也对其焊接质量提出越来越高的要求。影响激光焊接质量的参量比较多,例如激光功率、光束特性(模式,偏振等)、离焦量(工件表面偏离光束焦平面的大小)和焊接速度等。在长时间连续焊接过程中,某些参量势必要发生变化;同时现代工业自动化程度越来越高,因此,激光焊接质量的实时监测和闭环控制研究就成为一门重要的研究课题。

实时监测是实现闭环控制的第一步。检测焊接过程中工作区的发射信号一直是监测焊接质量的重要手段^[1~3]。实际工作中常以工作区发出耀眼的蓝光并伴有“滋滋”声为焊接质量比较好的经验标准,但由于可见、可听范围内的信号干扰过大而不适合作为检测信号。文献[1]通过检测等离子体离子谱线和等离子体波的声谱来监测焊接的质量,得到很好的结果,但缺乏直接反映熔池状态的信号,而且与光信号相比,声信号传播速度较慢,不宜作实时控制。本文报道的双波段信号监测方法,同时检测工作区附近红外(IR)和紫外(UV)辐射。实验证明,双波段信号能从不同的侧面完整地反映出焊接质量的变化。

1 实 验

1.1 实验装置

在长时间高功率激光焊接中,光腔输出镜和聚焦镜的热变形引起离焦量的变化是造成焊接质量恶化的主要原因,因此选择了离焦量作为主要的控制参量。实验中,保持激光功率、辅助气体吹气角度和吹气量不变,在不同焊接速度下,编程设定离焦量发生一定的变化,同时记录红外和紫外信号的变化,并对比实际焊接结果,进而找出其中的规律。

装置如图 1 所示,激光器为中国科学院上海光机所研制的工业用横流 CO₂ 激光器,聚焦透镜材料为 GaAs,焦距为 119 mm,紫外探测装置采用国产 UV-II 型紫外探测器加上紫外滤光片(通光波长为 200~400 nm);红外探测装置采用日本产锗探测器加上红外滤光片(通光波

* 福特-中国研究与发展基金资助项目(No. 09415518)。

长 1~ 2 μm)。在实验过程中,探测信号首先经预处理(滤波、放大),再经由数据采集卡输入计算机进行记录和分析。

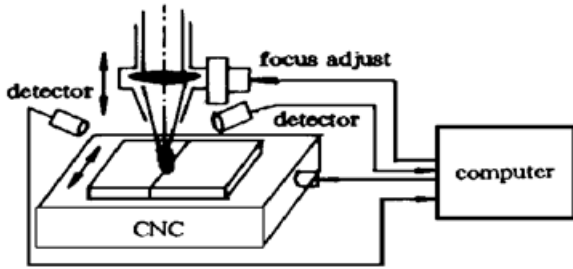


图 1 激光焊接双波段监测系统示意图

Fig. 1 Diagram of the dual-waveband monitoring system and the CNC machine

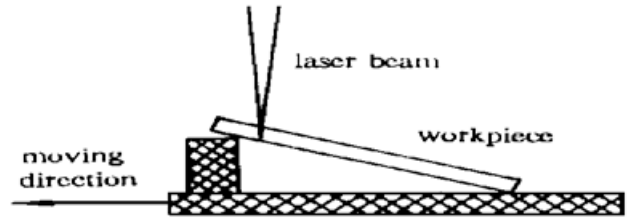


图 2 “爬山式”调焦示意图

Fig. 2 Diagram of climbing focusing

1.2 实验结果

1.2.1 爬山式调焦

爬山式调焦就是使样品倾斜一定的角度,这样当激光扫过样品表面时,离焦量即发生一定的连续变化(图 2),实验和生产中正式焊接前常用这种方法确定最佳离焦量。

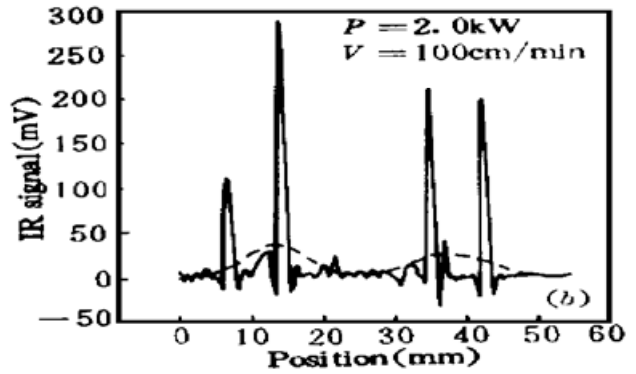
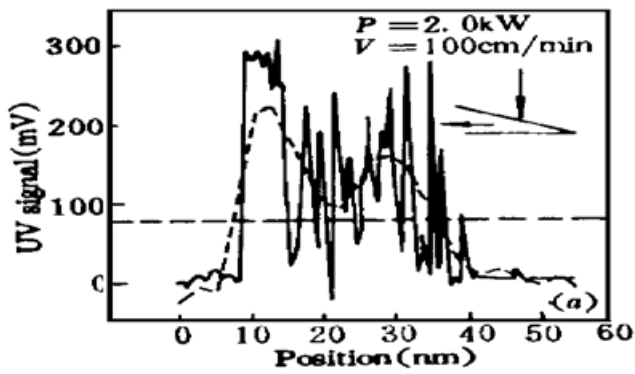


图 3 采用“爬山式”调焦焊接过程中的双波段信号

(a) 紫外信号; (b) 红外信号

Fig. 3 Dual-waveband signals detected during welding with climbing focusing

(a) UV signal; (b) IR signal

有关参量如下:激光功率为 2 kW,焊接速率为 100 cm/min,辅助气体为氮气,吹气量为 15 L/min,样品为 2 mm 厚的 45# 钢薄板,初始离焦量为 -2 mm。在焊接开始阶段,工作区有淡淡的红光,并可听到轻微的响声;随后听到刺耳的“滋滋”声,并可看到耀眼的蓝光;随着正离焦量增大,“滋滋”声渐弱,红光又出现。探测到的双波段信号及焊接结果见图 3,图 4。

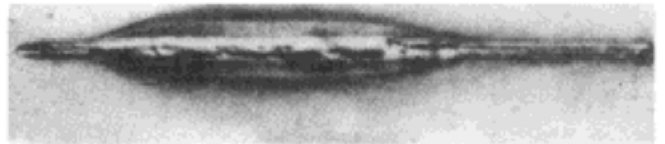


图 4 “爬山式”调焦所得焊缝(样品 # e, 1.25×)

Fig. 4 Weld with climbing focusing

(sample # e, 1.25×)

焊接开始和结束时,离焦量过大,紫外和红外信号都很微弱,几乎探测不到,样品上只留下窄而浅的痕迹;伴随着耀眼蓝光的出现,紫外信号出现一尖峰(280 mV),并持续一小段(“小平台”),此时,样品下面也出现火花,表明已被焊透。样品上焊透的范围是 10~ 30 mm,对应的紫

外信号以较高的频率在 120 mV 附近振荡;此时,红外信号也出现起伏,但除少数锐利的尖峰外,幅度都在 10 mV 左右。

1.2.2 适中的离焦量

利用上述爬山式调焦法确定一个适中的离焦量(-1 mm),将样品水平放置,采用这个离焦量进行焊接。焊接参量如下:激光功率为 2 kW,焊接速率为 75 cm/min,辅助气体为氮气,吹

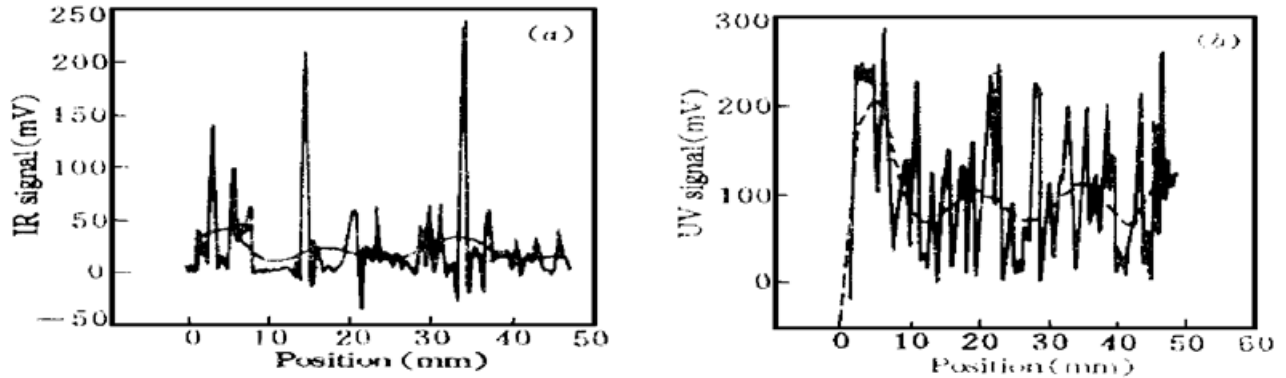


图 5 采用适中离焦量焊接时探测到的双波段信号

(a) 红外信号; (b) 紫外信号

Fig. 5 Dual-waveband signals detected during welding with moderate defocusing (sample # h)

(a) IR signal; (b) UV signal

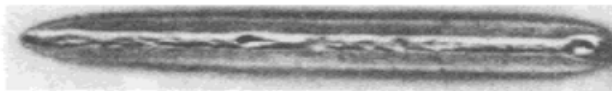


图 6 采用适中离焦量焊接所得焊缝(1.25×)

Fig. 6 Weld with moderate defocusing (1.25×)

气量为 15 L/min,样品为 2 mm 厚的 45# 钢薄板。整个焊接过程中,都有耀眼的蓝光出现,并伴有“滋滋”声。探测到的信号和焊接结果如图 5,图 6。

采用所选的离焦量,样品各处均被焊透。紫外信号开始有一个“小平台”(约 220 mV),随后在 80 mV 附近振荡(图 5)。红外信号在 20 mV 附近振荡,并有个数个锐利尖峰。

1.2.3 移动聚焦镜调焦

工件水平放置,设置初始较大负离焦,焊接过程中聚焦镜向上移动一定范围(10 mm),观

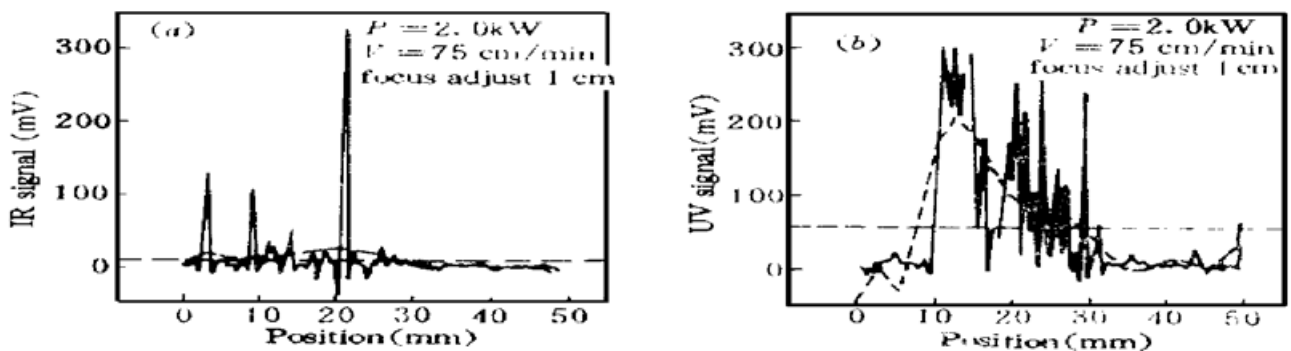


图 7 调节聚焦镜所得的双波段信号

(a) 红外信号; (b) 紫外信号

Fig. 7 Dual-waveband signals detected during welding with a focus-variable lens system

(a) IR signal; (b) UV signal

察到的现象与爬山式调焦类似。焊接参量如下: 激光功率为 2 kW, 焊接速率为 75 cm/min, 辅助气体为氮气, 吹气量为 15 L/min, 样品为 2 mm 厚的 45# 钢薄板。探测到的双波段信号及焊接结果如图 7, 图 8。采用这种调焦方法所得信号与用爬山式调焦得到的信号很类似, 不同之处在于紫外信号衰减得更快, 这是由于调节聚焦镜上升的速度较快, 引起离焦量的变化比爬山式调焦引起的变化快造成的。

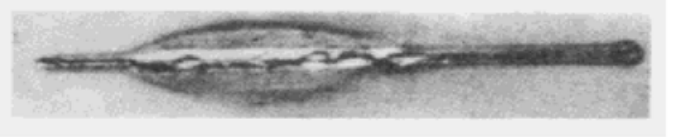


图 8 调升聚焦镜焊接所得的焊缝
(样品# 1, 1.3×)

Fig. 8 Weld with focus lens rising
(sample # 1, 1.3×)

1.3 结 论

采用目前的探测系统、加工系统和作用材料(45# 钢), 当离焦量比较适中, 熔深较大时, 紫外信号幅度变化平均在 80~ 300 mV 之间, 红外信号幅度不大, 平均在 15~ 20 mV 之间。

2 理论分析

2.1 高功率激光焊接过程中的再辐射

一般地, 高功率激光焊接指的是焦点处激光功率密度大于 10^6 W/cm^2 , 焊接过程中有“小孔效应”(Keyhole)发生的情况。再辐射指的是激光束与工作材料及与焊接过程中产生的等离子体等相互作用过程中产生的辐射。分析表明, 它们主要来自高温熔池和等离子体两个部分。

熔池由温度接近沸点的液态材料组成, 其辐射主要是热辐射。其辐射谱分布近似符合普朗克公式^[2]

$$W_{\lambda,T} d\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \left[e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right]^{-1} d\lambda$$

其中, $W_{\lambda,T}$ 是单位面积辐射体在温度 T 和波长 λ 附近的单位波长间隔内, 向 2π 立体角所发出的辐射通量密度, c_1, c_2 为常数。容易计算出 $W_{\lambda,T}$ 在 $\lambda_m = 2896/T$ 处达极大值。其中 λ_m 以 μm 为单位, T 为绝对温度^[5]。以不锈钢为例, 熔池温度在 3000 K 附近, λ_m 约 $0.96 \mu\text{m}$, 属红外波段。

等离子体的温度可高达 10^4 K , 成分包括自由电子、材料原子和离子、辅助气体原子和离子等^[4]。其辐射成分相应也比较复杂, 主要包括黑体辐射 ($\lambda_m = 0.2896 \mu\text{m}$)、材料原子和离子谱、辅助气体原子和离子谱以及等离子体的本征辐射等^[2]。此处, 选择了连续的黑体辐射作为监测对象, 其 λ_m 处于紫外波段。

2.2 紫外信号与熔深

由上述分析可知, 双波段信号中的紫外信号主要来自焊接过程中产生的等离子体, 紫外信号的强弱决定于等离子体的温度和体积; 而焊接的熔深决定于“小孔”的深度, “小孔”内的材料蒸气正是等离子体的来源。因此, 紫外信号的有无反映是否有“小孔”形成; 信号的幅度反映熔深的大小。例如, 当离焦量过大时, 材料表面的功率密度小于小孔形成的阈值, 材料几乎无气化发生, 也无等离子体的产生, 因此, 在调节离焦量的实验中, 正、负离焦过大时几乎探测不到紫外信号。

2.3 红外信号与焊缝表面

据以上分析, 所取波段的红外信号主要来自熔池表面的热辐射, 红外信号的幅度决定于熔池的温度分布和表面积, 而熔池的温度分布和表面积又决定着未来焊缝的形状。因此, 红外信

号可反映出最终焊缝的表面情况。例如,在采用“爬山式”调焦的实验中,将焊接速率减慢至 50 cm/min,其它参量不变,与焊速 100 cm/min 的情况相比,焊缝明显加宽,红外信号幅度也明显提高(见图 9,图 10)。

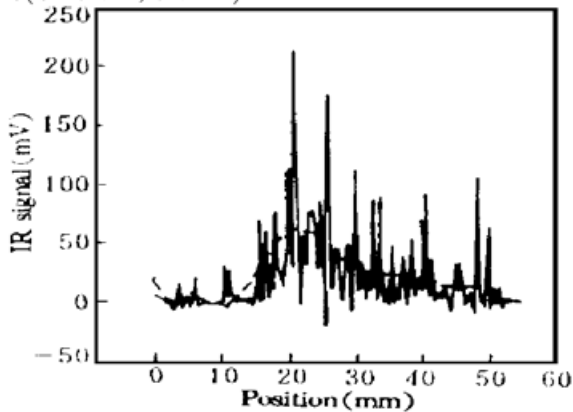


图 9 在“爬山式”调焦中探测到的红外信号
Fig. 9 IR signals detected during welding with climbing focusing

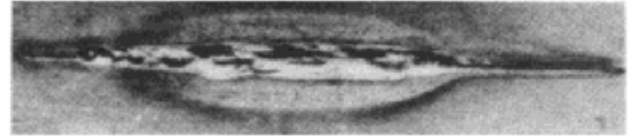


图 10 采用“爬山式”调焦焊接时得到的焊缝(1.15×)
Fig. 10 Weld with climbing focusing
 $P = 2 \text{ kW}$, $V = 50 \text{ cm/min}$

实验表明,双波段信号能迅速反映离焦量的变化,而且从不同侧面反映出焊缝情况,互为补充地反映了焊接质量的变化。

全部实验结果都是在使用 CO_2 激光器对 45# 钢进行焊接时得到的,至于用 YAG 或其它激光器或其它材料的情况,结果可能不太一样;而且,双波段信号中的紫外信号主要来自激光焊接过程中产生的等离子体,因此,它主要适用于对高功率激光焊接进行监测;但对于红外信号中经常出现的少数锐利尖峰,目前没有找到很好的解释。

参 考 文 献

- 1 胡伦骥,骆红,罗金华等. 马口铁激光焊接质量的实时光-声监测. 华中理工大学学报, 1993, 21(4): 95
- 2 H. B. Chen, L. Li, D. J. Brookfield *et al.*. Laser process monitoring with dual wavelength optical sensors, David Belfote, Morris Levitt. The Industrial Laser Annual Handbook. SPIE, 1990, 1241: 94~ 101
- 3 D. Kechemair, G. Caillibotte. Real-time control of high-power laser material processing. E. D. Metzbowyer *et al.*. Proc. ICALEO '91, Orlando, FL: Laser Institute of America, 1991, 113
- 4 John Dowden, Phiroze Kapadia, Nazmi Postacioglu. An analysis of the laser-plasma interaction in laser keyhole welding. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1989, 22: 741~ 749
- 5 母国光,战元龄. 光学. 北京: 高等教育出版社, 1978, 573

High-power Laser Welding Monitoring with Dual-waveband Signals

Luo Jiangtao Cheng Zhaogu Qiang Hongliang Zhang Zhaolin
Xia Jin'an Wang Runwen

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract Dual-waveband signals in high-power laser welding were recorded and analyzed, especially, the law between the signals magnitude and the defocusing was discussed.

Key words high-power laser welding, dual-waveband signals, welding pool, plasma