

文章编号: 1001-3806(2006)05-0455-03

## CO<sub>2</sub> 激光焊接拼缝间隙缺陷的同轴实时监测

朱琼玉, 吴松坪, 胡伦骥, 王春明\*

(华中科技大学 材料科学与工程学院, 武汉 430074)

**摘要:** 为了研究不同间隙下激光拼焊的焊缝质量及其对应的信号特征, 采用自制同轴传感系统采集提取多种间隙下焊接时的同轴光信号, 并对信号进行众数分析、分段功率谱分析和小波分析。结果表明, 同轴光信号幅值的众数在不同间隙的焊缝段, 聚集在线性可分的不同的区间, 可以有效分开焊接质量不同的 I 类、II 类、III 类焊缝; 信号的分段功率谱分析能够较为直观地反映焊接状态的变化。同轴光信号小波分解后的第 4 层逼近信号, 可以直观地识别出质量好的 I 类焊缝。同轴光信号的第 3 层、第 4 层细节信号可以清晰地辨识出质量低劣的 II 类焊缝。

**关键词:** 激光技术; 同轴监测; 信号处理; 小波分析

**中图分类号:** TG456.7      **文献标识码:** A

### Coaxial real time monitoring of gap defect in CO<sub>2</sub> laser welding process

ZHU Qiong-yu, WU Song-ping, HU Lun-ji, WANG Chun-ming

(Material Science and Technology Institute HUST, Wuhan 430074, China)

**Abstract** In order to study the characteristic signals according to the quality of the welding with dissimilar gaps, the self-made real time monitoring system with coaxial sensors is applied to acquire and extract coaxial signal and then the signals are analyzed with modes analysis, subsection power analysis and wavelet analysis. It is found that the modes of coaxial optical emission of dissimilar gaps clustering at distinct numerical range, can distinguish 1st, 2nd and 3rd class welds of different welding quality effectively. The subsection power analysis of coaxial signals can reflect the welding changes obviously. The approximation signals on level 4 of the coaxial signals after wavelet decomposing can intuitively distinguish the 1st class welds while detail signals on level 3 and level 4 of coaxial optical emission can clearly identify the 2nd class welds.

**Key words** laser technique; coaxial monitoring; signal process; wavelet analysis

### 引 言

激光焊接是一种高速度、非接触、变形小的热加工方式, 非常适合大量而连续的生产加工过程。对于常见的对接接头方式, 由于焊前板边预加工和装配误差, 同时伴随着焊接过程中热变形的影响, 在实际生产中很难达到零间隙的拼缝。而焊接时激光光束被聚焦到很小范围内, 在这种情况下, 间隙过大将导致激光能量漏空, 焊缝质量不稳定, 严重时将无法形成焊缝。因此, 研究不同间隙下激光拼焊的焊缝质量及其对应的信号特征, 是实时监测激光拼焊质量的重要课题。

利用光电传感器或视觉传感器检测激光焊接过程中小孔、等离子体或熔池等产生的光辐射是激光焊接过程检测的主要方法, 提取反映焊接状态的特征信号, 是实现激光焊接自动控制的前提。从工件上方侧面探测等离子体和小孔信号虽较易实现, 但改变探测角度

时, 获得的信息也随着发生变化, 说明偏轴采集信号只能获得小孔上方等离子体的部分信息。而从焊缝正面特别是小孔的正上方进行检测, 能够获得较全面的小孔上方等离子体的信息。近年来, 国外一些学者在 Nd:YAG 激光焊接中, 利用同轴检测装置检测熔池和等离子体红外辐射光信号进行检测与控制<sup>[1-3]</sup>。其他学者在 CO<sub>2</sub> 激光焊的熔透检测与控制方面也进行了许多研究工作, 但尚未就不同拼缝间隙下的焊接状态进行研究<sup>[4-11]</sup>。

本研究通过自行研制的激光焊接同轴传感器实时监测系统, 实时采集同轴光辐射信号, 采用多种信号处理手段, 对不同间隙所对应信号时频域特征进行深入分析, 并对相应的焊接过程、焊缝接头质量进行对比研究, 进而探求信号特征、焊接质量之间的内在联系。

### 1 监测系统的组成与实验方案

激光焊接实时监测系统主要由以下 4 个部分组成: 同轴光信号传感器, 信号调理电路, 数据采集卡以及信号处理分析软件。综合考虑采样定理和信号的精度的要求, 数据采样频率定为 40kHz, 同轴光信号沿激光

作者简介: 朱琼玉 (1982-), 女, 硕士研究生, 主要从事激光焊接工艺及质量监测方面的研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: onwang@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2005-08-26 收到修改稿日期: 2005-10-06

束轴向采集, 响应波长范围为 190nm ~ 1100nm, 示意图如图 1 所示。

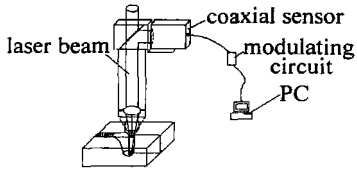


Fig 1 Experimental setup of laser butt welding with gap defect

实验选用 PCR-2000型激光器, 焊接激光功率定为 1500W, 焊接速度 1.3m/min, 透镜焦距 127mm, 聚光斑直径约为 0.2mm ~ 0.3mm, 辅助气体为纯 Ar, 侧吹角度 30°, 气体流量 1m<sup>3</sup>/h, 焊接试样材料为 1.5mm 厚的低碳钢板。

在同一条拼缝上设计阶梯变化的不同间隙进行焊接, 拼焊试样及焊接方向如图 2 所示, 顺着焊接方向 5 组间隙大小分别为 0.10mm, 0.15mm, 0.20mm, 0.25mm 和 0.30mm。

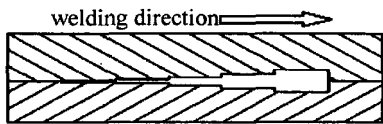


Fig 2 Gap plank workpiece in butt welding

## 2 实验结果与分析

间隙试样的焊缝如图 3 所示, 依据焊缝成形以及焊接质量的特点可将整段焊缝分为 3 类。

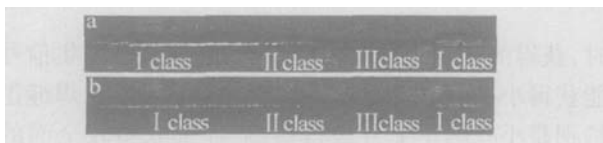


Fig 3 The weld of gap workpiece

a— the front surface of the welding line b— the back surface of the welding line

I 类, 焊缝较好熔合区域: 拼缝间隙为 0mm, 0.1mm, 0.15mm 时, 此时激光能量利用率较高, 熔化母材能填充间隙形成焊缝, 在间隙为 0.1mm 和 0.15mm 时, 焊缝稍宽, 正面有少许下凹, 成形较好。

II 类, 焊缝未完全熔合区域: 拼缝间隙为 0.20mm 时, 此时激光能量部分被试样吸收, 熔化的少量母材不足以填满间隙, 形成断断续续细窄的焊缝, 且正、反两面都下凹严重。

III 类, 焊缝完全未熔合区域: 拼缝间隙为 0.25mm 和 0.3mm 时, 此时激光能量绝大部分漏空, 试样仅有加热的痕迹而几乎不熔化, 焊缝完全没有形成。

### 2.1 信号的统计学分析

原始信号的统计学参数, 包括均方根值、标准差、中位数、众数、波峰/波谷频率等, 能从多方面表现信号的特征。仔细研究这些统计特征发现, 同轴光信号幅值的众数能够比较清晰地区分开 3 种类型的缺陷。考

虑到整段原始信号的所包含数据多达 400000 个, 同时 II 类焊缝对应的信号幅值曲线中, 有部分“尖峰”点的幅值与 I 类焊缝很相似, 作者以 0.1031s (约 0.002mm 长焊缝) 为单位步长, 对整段信号进行了分段众数统计, 结果如图 4 所示。

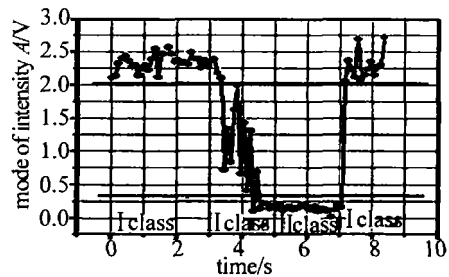


Fig 4 Subsection status of the modes of coaxial original signal intensity

I 类焊缝质量较好, 0.10mm 和 0.15mm 的间隙段上统计出的信号强度众数值基本上与无间隙焊接时近似。并且众数值的范围在 20223~25980 之间, 即都在 2.0 这条线以上。众数定义的是一系列数值中出现次数最多的数, 本文中它反映的是同轴光原始信号的主要能量。间隙量小的 I 类焊缝, 激光能量漏失较少, 大部分都被母材吸收, 轴向喷发的等离子体强度较强, 导致采集到的同轴光信号能量高。

II 类焊缝熔合状态时断时续, 0.20mm 的间隙已经导致焊接过程无法稳定进行, 仅仅只有局部焊缝呈现熔合的状态。这段信号的众数值在 0.3512~1.9850 之间。可见这段信号的主要能量分布同 RMS 值类似, 波动较大, 这说明了焊接过程中, 激光能量时而被母材侧壁吸收, 时而漏失, 轴向喷发的等离子体时有时无, 并且强度波动很大。众数最大值点 1.9850 对应一小段熔合情况相对较好的焊缝, 然而, 这个众数值是低于任何一段 I 类焊缝的众数值的。可见以 2.0 为分界线是可以将 I 类和 II 类焊缝区分开来的。

III 类焊缝间隙太大, 焊缝完全没有熔合。焊接过程中几乎采集不到光信号, 对应的这段信号的众数值在 0.25 以下。以 0.25 为分界线, 可以把这类焊缝同其它两类完全分开。

### 2.2 信号功率谱分析

首先对不同间隙量的焊缝进行分段功率谱分析, 由于同轴光信号主要集中在较低频段 5Hz~7000Hz, 因此主要分析这一频段范围内信号的幅值特征, 如图 5 所示, 其强度 (简称为光强) 是相对光强, 只是用来表示等离子体光信号的相对强弱。

从图 5 中可以看出, 间隙量为 0.1mm 和 0.15mm 时 (I 类焊缝区), 同轴光信号频段集中在 1000Hz~3000Hz 范围内, 此时熔池和小孔能稳定存在, 但由于间隙量的增大, 熔化和蒸发的金属量减少, 导致等离子体减少, 间隙量为 0.15mm 的信号集中频段 (1000Hz~

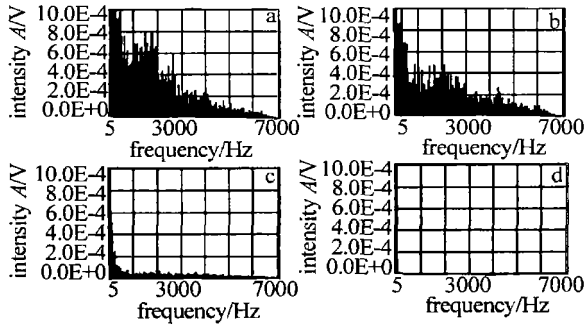


Fig 5 Subsection power analysis of coaxial signals

a—gap = 0.1mm b—gap = 0.15mm c—gap = 0.2mm d—gap = 0.25mm & 0.3mm

300Hz)幅值较间隙量为 0.1mm 的信号集中频段幅值有明显下降,相比 RMS 均值分析更加直观。而当间隙量为 0.2mm 时(II类焊缝区),熔池和小孔不能稳定存在,只能间歇形成,同轴光信号主要集中在 5Hz~7000Hz 整个频段内幅值大幅下降,接近于 0。当间隙量为 0.25mm 和 0.3mm 时(III类焊缝区),焊缝完全没有形成,整个频段内幅值接近于 0。

通过对同轴光信号的分段功率谱分析,可以较直观地发现同轴光信号能量能够敏感地随间隙量的变化而变化。因此,同轴光信号的分段功率谱分析可作为一个较直观的标准来研究间隙量变化时的信号规律。

### 2.3 信号的小波分析

采用 db4 (daubechies, order 4)小波,对同轴光信号进行小波分解。信号  $s$  及其小波分解波形如图 6 所示。小波分析对信号  $s$  分解到第 4 层。 $a_4, d_4, d_3, d_2, d_1$

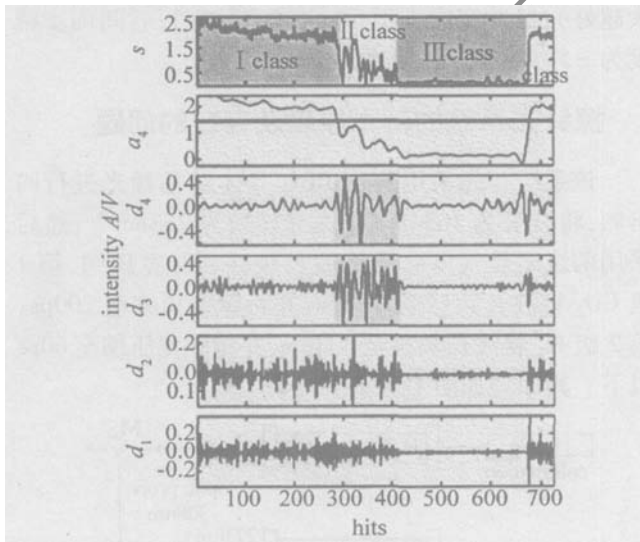


Fig 6 Wavelet decomposition of signal in welding gap db4, level 14

$d_1$  为小波分解结果。 $a_4$  为第 4 层逼近信号,  $d_4, d_3, d_2, d_1$  分别是第 4 第 3 第 2 和第 1 层的细节信号。根据小波分解的原理,有:

$$s = a_4 + d_4 + d_3 + d_2 + d_1 \quad (1)$$

根据小波分解各分量的频率结构关系,小波分解每一层都是对上一层信号的等带宽分解,将低频部分作为

逼近信号,而把高频部分作为袭击信号。可以算出,  $a_4, d_4, d_3, d_2, d_1$  的频率范围分别为  $0\text{Hz} \sim 2500\text{Hz}$ ,  $2500\text{Hz} \sim 5000\text{Hz}$ ,  $5000\text{Hz} \sim 10000\text{Hz}$ ,  $10000\text{Hz} \sim 20000\text{Hz}$ ,  $20000\text{Hz} \sim 40000\text{Hz}$ 。对信号进行小波变换以后,得到的是分属不同频段的分解信号。

仔细分析小波分解图谱发现:(1)同轴光信号  $0\text{Hz} \sim 2500\text{Hz}$  低频段逼近信号  $a_4$  中,间隙较小的 I 类焊缝的信号幅值比起 II 类、II 类焊缝要高出许多,在图中可以分别作出一条分界线将焊缝质量良好的 I 类焊缝给识别出来。这说明等离子体和熔池的低频振荡与焊接质量的好坏有密切的联系;焊缝融合情况较好时,等离子体和熔池的低频信号强度较大,一旦融合状态不稳定,低频信号强度就会下降。(2)同轴光信号在  $2500\text{Hz} \sim 5000\text{Hz}$  和  $5000\text{Hz} \sim 10000\text{Hz}$  频段上的细节信号即  $d_4, d_3$  能够很好地将 II 类焊缝区分开。如图中阴影所示,间隙稍大的 II 类焊缝这两端细节信号的波动幅度剧烈。这一特征可以直观地把 II 类焊缝识别出来。这个现象说明了信号的中频段所包含信息能够较好地反映出激光焊接时出现的不稳定波动,导致质量低劣的情况。(3)对于间隙很大的 III 类焊缝的同轴光原始信号本身就可以很好地将其它两类焊缝区分开来。观察同轴光  $d_4, d_3, d_2, d_1$  细节信号,可以发现其振荡幅度很小,几乎为 0。这一信号特征也同样可以将这类焊缝同其它两类完全区别开来。

### 3 结论

(1)同轴光信号幅值的众数在间隙不同的焊缝段集中聚集在不同的区间。利用众数这一特征可以直观地区分开 3 类焊接质量不同的焊缝。

(2)同轴光信号分段功率谱分析能够较直观地反映同轴光信号能量,能够敏锐反映间隙量的变化。

(3)基于 db4 的小波分析表明:同轴光信号的第 4 层逼近信号中,焊缝成型较好的 I 类焊缝段,信号幅值明显高出间隙大而造成质量低劣的 II 类、III 类,可以确定一条分界线来界定质量好同质量差的焊缝。另外,同轴光信号的第 3 第 4 层细节信号在 II 类焊缝段的波动特性可以将其同其它间隙缺陷焊缝段明显区别开。

### 参 考 文 献

[1] POSIMA S, AARTS RONALD G K M, MEIJER J *et al*. Penetration control in laser welding of sheet metal using optical sensors [A]. Proc of ICALEO' 2001 [C]. Orlando: Laser Institute of America, 2001. 1083~1092.

[2] POSIMA S, AARTS RONALD G K M, MEIJER J *et al*. Feedback control for optimal production speed in laser beam welding of mild steel [A]. Proc of ICALEO' 2002 [C]. Orlando: Laser Institute of America, 2002. 1053~1062.

图 8 为改造后输出的 308nm 紫外探针光的时间波形。由于条件限制,此次实验没有进行 308nm 光束

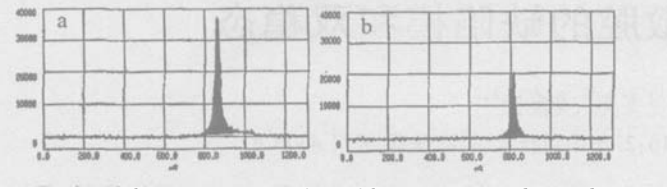


Fig 8 The time-region waveform of the output 308nm laser pulse

的均匀性测量。实验研究结果表明:在解决了抽运光束质量的情况下,系统的倍频效率和压缩质量有了很大的提高,输出的 308nm 紫外光的能量大于 1mJ,且脉宽也得到了有效的压缩。经过系统机械结构稳定性改造后的紫外探针光系统能够长时间稳定运行,成功率大于 90%,达到了研制标的,可以作为等离子体激光诊断的探针光源。

#### 4 讨论

如要进一步提高探针光系统的输出能量,单纯地提高抽运光能量导致的后果只能是使输出的脉宽得不到有效的压缩。要想提高注入喇曼池的倍频光能量且又不至于超过 SRS 产生的阈值,可采用在高能量倍频光进入喇曼池前用 4 块拼接的劈板将其分为水平的 4 束激光,进入喇曼池后分别聚焦压缩,通过这样的方法就能达到既能输入高能量的激光进入喇曼池,又能不影响脉宽有效压缩的目的,从而解决了高能量探针光输出与脉宽压缩之间的矛盾。

如要进一步提高探针光输出的稳定性,也可以在抽运光进入空间滤波器前加上高斯反射镜将其整形为高斯型光源注入,并在倍频器上加上恒温装置<sup>[11]</sup>,这

样将会极大的稳定倍频晶体的倍频效率,从而产生稳定的 308nm 紫外探针光的输出。

#### 参 考 文 献

- [1] WANG Ch Ch, YU H W, ZHOU H *et al*. A new high power solid-state laser multi segment amplifier [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(1): 1~3 (in Chinese).
  - [2] LI Y F, MA J X. High-order harmonic generation by relativistic lasers in a Maxwellian distributed plasma [J]. *High Power Laser and Particle Beams* 2002, 16(5): 801~805 (in Chinese).
  - [3] ZHANG J, ZEPT M, NORREYS P A *et al*. Coherence and bandwidth measurements of harmonic generated from solid surface irradiated by intense picosecond laser pulses [J]. *Phys Rev*, 1996, A64: 1597~1603.
  - [4] NORREYS P A, ZEPT M, MOUSTAIZIS S *et al*. Efficient extreme UV harmonics generated from picosecond laser pulse interaction with solid targets [J]. *Phys Rev Lett* 1996, 76(4): 1832~1835.
  - [5] CHEN Y B, YUAN X D, GUO L F *et al*. Development for a laser device with 40J energy [J]. *High Power Laser and Particle Beams* 2000, 12(s1): 158~161 (in Chinese).
  - [6] GLENZER S H, WELAND T L, BOWER J *et al*. High energy 4W probe laser for laser plasma experiments at Nova [J]. *Rev Scient Instrum*, 1999, 48(11): 1241~1244.
  - [7] GUO Y K, BAO P D. Course of optics [M]. Chengdu Siduan University Press, 1993. 256~259 (in Chinese).
  - [8] XU R P, LIU J H. Course of laser apparatus and technic [M]. Beijing: Beijing Industry College Press, 1986. 435~437 (in Chinese).
  - [9] KIRKWOOD P K, MacGOWAN B J, MONTGOMERY D S *et al*. Effect of ion wave damping on stimulated Raman scattering in high-Z reduced plasma [J]. *Phys Rev Lett* 1996, 77(5): 2706~2708.
  - [10] WANG Ch Ch, YUAN X D, CHEN Q H *et al*. Design optimization of sub-beam laser system used for ICF benchmark experiments [J]. *Optics & Optoelectronics Technology* 2003, 1(5): 35~38 (in Chinese).
  - [11] KOECHNER W. Solid state laser engineering [M]. Beijing Science Press 2002. 519~520 (in Chinese).
- (上接第 457 页)
- [3] PETERE II J, ABELS P, KAERLE S *et al*. Failure recognition and on-line process control in laser beam welding [A]. Proc of ICAL EO' 2002 [C]. Orlando Laser Institute of America 2002. 2501~2509.
  - [4] MIYAMOTO I, MORIKI D. Development of in 2 process monitoring system for laser welding [A]. Proc of ICAL EO' 95 [C]. Orlando Laser Institute of America 1996. 759~767.
  - [5] GU H P, DULEY W W. Discrete signal components in optical emission during keyhole welding [A]. Proc of ICAL EO' 97 [C]. Orlando Laser Institute of America 1998. 40~46.
  - [6] GUO J, LIU Ch, YANG W G *et al*. Detection of the axial optical signal during keyhole laser welding [J]. *Laser Journal* 2003, 24(1): 51~53 (in Chinese).
  - [7] LIU Ch. Study about the coaxial monitoring and penetration control in CO<sub>2</sub> laser welding [D]. Beijing Tsinghua University, 2003. 1~97 (in Chinese).
  - [8] ZHANG X D, CHEN W Zh. Coaxial monitoring and penetration control in CO<sub>2</sub> laser welding [J]. *Transactions of the Chinese Welding Institution* 2004, 25(4): 1~4 (in Chinese).
  - [9] QIN G L, QIX B, YANG Y G *et al*. Collection of coaxial emission in high power Nd:YAG laser deep-penetration welding [J]. *Applied Laser* 2003, 23(4): 205~208 (in Chinese).
  - [10] CHEN W Zh, JIA L, ZHANG X D *et al*. Coaxial vision sensing system and detection of penetration status in CO<sub>2</sub> laser welding [J]. *Applied Laser* 2004, 24(3): 130~134 (in Chinese).
  - [11] WANG J Ch. Development and expectation of laser welding technology [J]. *Laser Technology*, 2001, 25(1): 48~53 (in Chinese).