

文章编号: 0258-7025(2005)01-0131-04

激光深熔焊缝的熔透性监测研究

段爱琴^{1,2}, 胡伦骥¹, 王亚军²

(¹ 华中科技大学材料工程学院, 湖北 武汉 430074; ² 高能束流加工技术国防科技重点实验室, 北京 100024)

摘要 随着激光焊接在国防工业中的应用越来越广泛, 焊接质量的监测和控制逐步成为一项重要的研究内容, 而焊缝的熔透性控制是其中最重要的参数之一, 特别对于一些密封件而言。通过对伴随激光深熔焊接所存在的光致等离子体的蓝紫光信号相对强度的监测, 以判断焊缝的熔透性。利用信号监测系统, 在焊接时采集光致等离子体蓝紫光的强度作为原始分析信号, 通过对数据的分析和处理, 以及大量的实验结果与数据分析结果的对比, 寻求信号与焊缝熔透性的关系。研究结果表明, 焊缝的熔透性与光致等离子体光信号的累积强度有对应关系, 当焊缝全部熔透时, 光信号稳定性非常好, 而一旦焊缝处于未熔透或熔透性差时, 光信号会产生极大的波动。

关键词 激光技术; 激光焊接; 熔透监测; 光致等离子体光信号

中图分类号 TG 456.7 **文献标识码** A

Research on Weld Penetration Monitoring by Laser Plasma Optical Signal in Laser Welding

DUAN Ai-qin^{1,2}, HU Lun-ji¹, WANG Ya-jun¹

(¹ School of Material Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)
(² BAMTRI, Key Laboratory for High Energy Density Beam Processing Technology, Beijing 100024, China)

Abstract Laser induced plasma is an important physical phenomena companied with laser keyhole welding. In this paper, the relation between weld penetration and optical signal was studied. Through many experiments, variety of optical signals were obtain when weld penetration was different. The results showed that the optical signals had better stability in full-penetration, and in partial- or non- penetration, optical signals had higher fluctuations. The aim of this study was to find a method to monitor and control weld penetration in laser welding.

Key words laser technique; laser welding; weld penetration monitoring; laser induced plasma optical signal

1 引 言

随着激光焊接技术在各个领域的广泛应用, 质量检测和控制就成为激光焊接技术推广应用的重要研究内容之一。尤其在大型结构件焊接时, 由于接头部位、工件装夹定位、材料的变形等因素的影响, 极易造成焊缝的未熔透或其他缺陷, 从而影响结构件的质量, 甚至造成报废。

激光深熔焊接过程是一个极为复杂的物理化学过程, 受众多相互作用因素的影响, 如材料的熔化与蒸发; 小孔的形成及激光诱导等离子体的出现; 小孔

壁改变激光入射角引起的 Fresnel 吸收促使工件对激光吸收率的提高; 等离子体对激光的折射、反射、散射和吸收会改变激光的聚焦状态和能量传输; 即便是准稳态深熔焊过程中等离子体依然存在周期性振荡等^[1~5]。因而使激光焊接过程的实时监测和控制成为激光焊接研究的一个难点。从上世纪 90 年代中期起, 国内外就开始致力于利用激光束及激光焊接过程本身的特点, 来研究实时监测其熔透及焊接质量的方法和装置。目前主要的研究方法包括激光束表面散射和反射的监测, 光致等离子体光信号、

收稿日期: 2003-06-11; 收到修改稿日期: 2003-12-04

基金项目: 武器装备预研重点基金资助项目。

作者简介: 段爱琴(1966—), 女, 高级工程师, 博士研究生, 目前研究方向为激光焊接的质量控制及熔池行为的研究。

E-mail: duan_aiqin@163.net 或 hb104@bamtri.com

声信号及带电粒子的监测,焊接熔池的形貌及温度的监测和超声检测。

但是,最常用的方法还是利用激光深熔焊接所特有的光致等离子体的声、光、电信号来监测激光焊接的熔透性及其他一些焊接缺陷。光致等离子体是伴随激光深熔焊接而存在的重要物理现象。激光焊接时金属蒸气及保护气体的电离而产生的等离子体云团具有光谱特性、声发射特性以及电场特性,其大小与焊接参数、材料、保护气体、焊缝质量等多种因素相关。

本文的研究目的是通过对焊缝正面的监测,特别是伴随激光深熔焊接所存在的光致等离子体的蓝紫光信号相对强度的监测,判断焊缝的熔透性。

2 实验方法及设备

利用焊接功率的连续降低及焦点位置变化来预置焊缝熔透性的变化。实验材料为 2 mm 厚的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢板材,焊缝长度为 150 mm。

所用的激光器为快速轴流 CO₂ 激光系统;用华中科技大学设计制造的等离子体声光信号监测仪进行监测;采样频率为 50 kHz,用 Phantom V4 高速摄像,图像分辨率为 512×512 像素,速度为 1000 帧/s。

3 实验结果与分析

3.1 光致等离子体的光特性

对光致等离子体的光谱测量可知,它是由许多不同波长的光辐射所组成的(如图 1 所示)。而由于材料、辅助气体等的不同,亮度高的谱线也不相同,反映在图像中更清楚地表明了这一点。图 2 为不同材料在焊接条件基本相同时,光致等离子体的图像。从图中可见由于材料的不同,等离子体的大小、形状、强度等都有很大的差别,这表明在信号提取和应

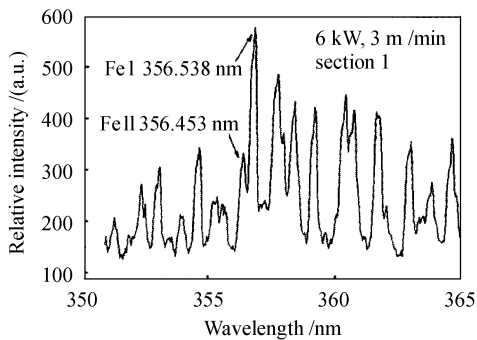


图 1 光致等离子体光谱辐射图

Fig. 1 Spectrum of the laser induced plasma

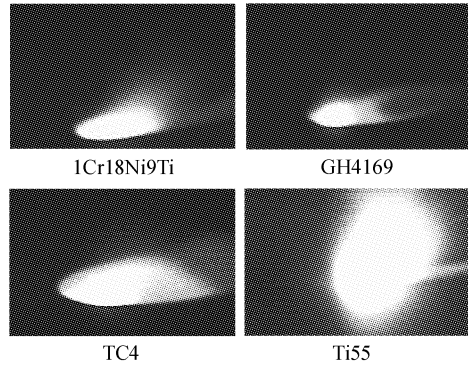


图 2 焊接材料不同时光致等离子体形态的变化
Fig. 2 Shapes of plasma for different weld materials

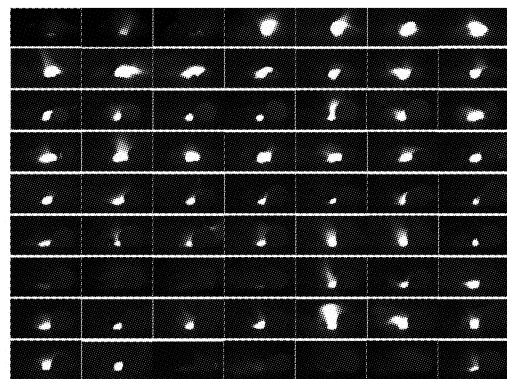


图 3 光致等离子体形貌变化
(以 1000 帧/s 记录的连续变化图)

Fig. 3 Shapes of plasma

(A series of plasma recorded by 1000 frames per second)

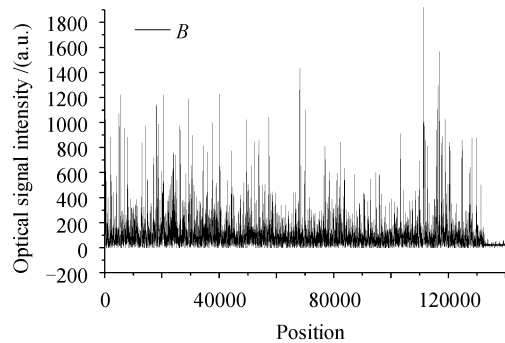


图 4 焊接条件相同时,光致等离子体光信号的分布
Fig. 4 Intensity of optical signals versus weld position
under same weld condition

用时,必须考虑材料的性能。

图 3 为利用高速摄像记录下的焊接时光致等离子体形态的连续变化图像,可以明显地发现其周期波动性。结果表明光致等离子体的周期是不确定的,与熔池的瞬态变化相关,这一点在光信号的监测实验中也得到证实。

图 4 是利用等离子体声光信号监测仪所获得的

一组原始光信号的采样曲线。从图中可见光信号的周期性变化、信号的瞬时变化及其变化的特征。

通过上述三种手段的研究,表明光致等离子体的光信号瞬时值不能反映光致等离子体的基本特性,同时也不能表征焊接稳定性及熔透性的情形。

3.2 光致等离子体光信号与焊缝熔透性的关系

通过连续降低焊接功率,我们预置了焊缝熔透性的变化。由以上的研究可知,原始光信号具有很大的波动性,因而要获得光信号的变化规律,必须采用一定的数字信号处理方法。

假设以 1024 原始采样点作为一个位置点,焊接速度 $V = 16.7 \text{ mm/s}$,采样频率 $K = 50 \text{ kHz}$,那么,一个位置点所代表的焊缝长度 $L = 1024 \times V/K = 0.34 \text{ mm}$ 。

而焊接时形成的熔池的宽度大约是 $1 \sim 2 \text{ mm}$,因而选择 1024 原始采样作为一个位置点完全可以表征焊缝的熔透过程。

以 1024 采样点作为一个位置点,对多组实验数据分别计算了光信号的相对强度、信号能量谱,结果

表明与相对强度相比,能量谱的曲线趋势相同,但能量谱的信号波动性比平均强度更大,这对于控制参数是不利的。

图 5 是光致等离子体光信号强度在整个焊缝上的分布图。从图中可见,光信号的变化具有区域性的规律,同时这种区域性与焊缝的熔透性具有对应的关系。表 1 为其相应区域的信号对比,可以发现光信号在不同的焊缝熔透部位,光强度具有不同的特征,这证明等离子体的光信号变化与焊接的熔透性确实具有特定的关系。

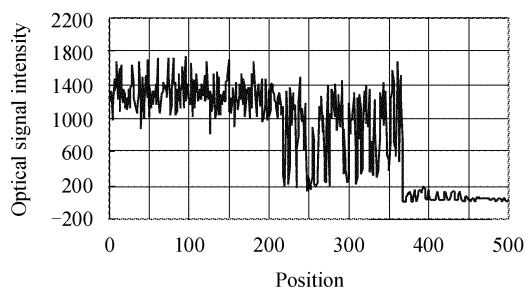


图 5 光致等离子体光信号强度随焊缝位置的分布
Fig. 5 Optical signal intensity versus weld position

表 1 不同区域的光信号及焊缝性能对比

Table 1 Optical signal intensity and weld character in different range

Range	Position	Power /W	Average intensity	Weld case
R1	1~218	1300~950	1281	Full-penetration
R2	218~367	950~716	830	Partial- or non-penetration
R3	367~441	716~600	69	Heat conduct welding
R4	441~500	0	36	Stop

区域 1:熔透情形:全部熔透,背面成型好。光信号特征:在这个区域等离子体的光信号强度最高,信号的波动幅度比较小。

区域 2:熔透情形:焊缝明显变细,熔透性变差直到未熔透。光信号特征:光信号波动性明显变大,出现强度很低的信号(均指处理后的强度),同时整体强度有所降低。

区域 3:熔透情形:背面不透。光信号特征:光信号突然明显降低几乎消失,平均强度只有 69,此时焊接过程处于热导焊过程。

区域 4:熔透情形:焊接过程停止。光信号特征:光信号平均强度 36,相当于背景光。

4 结果分析与讨论

根据多项实验结果分析,可以获得等离子体光

信号与焊缝的熔透性有如下对应关系:熔透性好:光信号强度高,波动性小,但强度值与焊接参数相关。熔透性差(未熔透):光信号强度高,波动性增大(焊接速度改变引起的熔透性差);光信号波动性增大(功率或焦点位置改变引起的熔透性差);光信号强度低(热导焊状态)。

假设一个采样段的光信号强度为 I_t ,而理论设定值为 I_0 , ΔI_0 为光强差值的设定值,那么可以获得等离子体光信号强度与熔透性的关系:

熔透性好,则有

$$|\Delta I_t| = |I_t - I_0| \leq \Delta I_0. \quad (1)$$

熔透性差(未熔透),则有

$$|\Delta I_t| = |I_t - I_0| > \Delta I_0. \quad (2)$$

虽然 I_0 , ΔI_0 都与焊接参数相关,但是对于某一特定的焊接过程来说,只要焊接材料、焊接速度、焊接功率及焦点位置、保护气体等都确定, I_0 , ΔI_0 就

可以确定,因而对于我们所研究的控制过程来说,利用 ΔI_r 作为测量参数具有一定的可行性。

5 结 论

通过对多个实验过程的综合分析,可以获得利用光致等离子体光信号实时监测焊缝熔透性的初步结论:

1) 光致等离子体的光信号与焊接材料、焊接参数密切相关;2) 光致等离子体光信号的变化与焊缝的熔透性密切相关,在焊缝熔透性好的情形下,光致等离子体稳定,强度较高且变化比较小,而在未熔透时,光信号变化大,不稳定;3) 利用光致等离子体光信号实时监测焊缝熔透性具有可行性。

参 考 文 献

- 1 Han Zhengjin. Adopt Control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995
韩曾晋. 自适应控制[M]. 北京:清华大学出版社,1995
- 2 Luo Hong, Hu Lunji, Hu Xiyuan *et al.*. Laser keyhole effect on optical and acoustic signals during laser welding [J]. *China Mechanical Engineering*, 1998, **9**(11):84~86
骆红,胡伦骥,胡席远等. 激光焊接过程中小孔行为对光、声的影响[J]. 中国机械工程, 1998, **9**(11):84~86
- 3 Walter W. Duley. Laser Welding [M]. Canada: Published Simultaneously in Canada, 1998. 159~200
- 4 Luo Hong, Hu Xiyuan, Hu Lunji. Real-time in process monitoring of laser welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(3):284~289
骆红,胡席远,胡伦骥. 激光焊接过程实时监测[J]. 中国激光, 2001, **A28**(3):284~289
- 5 Guan Zhenzhong. Laser Processing Handbook [M]. Beijing: China Measure Press, 1998. 116~126
关振中. 激光加工工艺手册[M]. 北京:中国计量出版社, 1998. 116~126