

激光焊接中的等离子体变化规律 及气孔缺陷快速测试方法 ——气孔缺陷特征参数提取方法

孙 谦¹, 王旭友¹, 李小宇¹, 徐富家¹, 廖 盈²

(1. 哈尔滨焊接研究所, 哈尔滨 150028; 2. 湖南省特种设备检验检测研究院, 长沙 410117)

摘 要: 在激光焊接等离子体面积信号整体分析法研究的基础上, 针对气孔缺陷生成时的激光小孔变化特征, 继续研究了气孔缺陷与等离子体面积信号整体分布模型间的特征关联性, 提出了可识别等离子体面积信号最大概率密度分布区域信号强度的基值和描述等离子体面积信号波动程度的躁动值两种特征参数的提取方法, 研究了两种特征参数与实际焊接条件以及焊接气孔缺陷的关联性。结果表明, 基值的大小与实际焊接条件密切相关, 而躁动值的数值可较好反映出激光焊接气孔缺陷的情况。

关键词: 激光焊接; 等离子体; 气孔缺陷; 快速检测

中图分类号: TG 456.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)06-0001-04

0 序 言

在文献[1]中通过高速摄像对激光焊接时等离子体形态进行观察, 并对图像中等离子体面积信号做了线性分析, 发现激光等离子体的线性分布规律具有非稳态、数值变化剧烈且随机性较高等特点, 难于和实际焊接质量建立直接的对应关系。但是, 通过概率统计的方法对大量的等离子体检测信号的分布规律进行分析时, 找到了检测信号的整体分布规律与实际焊接条件间的关联性, 并由此提出了针对激光焊接过程等离子体面积信号强度分布规律的整体分析方法。此法不但能有效去除检测信号中随机干扰信号及信号波动对检测数据分析产生的不利影响, 准确识别激光焊接时等离子体形态的变化特征, 还具有较好的可重复性及易识别特点。

在实际焊接中不同的焊接状态会伴随着不同的物理现象, 而不同的物理现象所产生的信号数值是存在差异的, 同样在产生气孔缺陷时也会存在由特殊物理现象导致的检测信号差异^[2]。由于气孔缺陷大多产生于激光焊接过程中小孔瞬间失稳、坍塌, 液态金属不能完全回填, 或者有部分金属蒸气及保护气体被卷入熔池来不及释放出来而形成的, 所以小孔的异常波动情况是产生气孔缺陷的起因, 也是决

定气孔生成情况的主要因素之一^[3,4]。而激光等离子体主要是由小孔内的金属蒸气及保护气体在激光作用下发生电离形成的, 所以激光等离子体的形态变化特征与焊接过程中小孔的内部内气压变化情况 & 稳定性情况都存在很大的关联性^[5-8]。

文中将继续采用整体分析方法识别等离子体形态的变化特征, 并尝试通过等离子体面积信号强度分布模型与实际气孔缺陷生成情况建立联系, 深入挖掘模型中的特征信息, 找到与气孔缺陷的直接关联的特征参数, 提出一种获取焊接气孔缺陷的新型、有效检测途径。

1 试验方法

1.1 焊接条件

试验针对 6061-T6 铝合金, 板厚 4 mm。试验采用的焊接参数为激光功率 4 kW, 氩气保护, 保护气体流量为 20 L/min, 焊接速度为 2 m/min, 离焦量为 0 mm。试验分别采用了非扫描激光焊接、大离焦激光焊和扫描路径为圆形的扫描激光焊接 3 种焊接工艺。焊接时产生的等离子体形态由 FastCam Ultima 512 高速摄像机拍摄获得, 拍摄速度为 5 000 frame/s, 此时最大分辨率为 256 pixel × 128 pixel。

1.2 气孔缺陷特征参数提取方法

通过文献[1]中提到的等离子体面积信号提取方法及检测信号整体分析方法, 可以从高速摄像中

获得激光焊接过程等离子体面积信号的强度分布情况及其整体分布模型,如图 1 所示(以非扫描激光焊为例)。

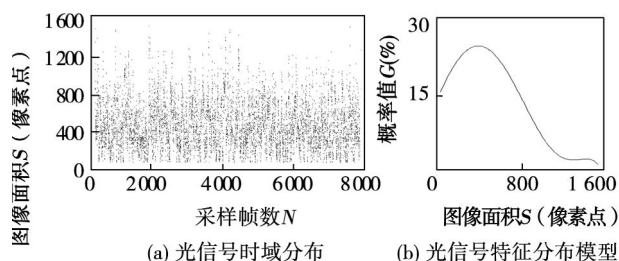


图 1 非扫描激光焊接等离子体面积信号的强度分布情况及其整体分布模型

Fig. 1 Whole distribution and its feature model of plasma size signals in non-scanning laser welding

通过试验观察发现,虽然不同焊接条件下的获得的等离子体面积信号强度分布情况都是存在差异的,但是在每次检测到的信号空间分布中,都存在一个分布的最密集区域,在这里可以找到等离子体面积信号中最集中出现的信号强度数值.由于此数值附近出现的信号频率最多,概率最大,等离子体作用最集中,因此可视为焊接过程的一项准稳态平衡参数,定义其为基值.由于信号整体分布模型与焊接条件密切相关^[1],所以基值点的大小一般和实际焊接条件存在一定的关联性,在等离子体信号整体分布模型中,可以从曲线的顶点位置对应找到基值的强度数值,如图 2 中所示,基值的表达式为

$$\alpha = \varphi^{-1}(\chi_{\max}) \quad (1)$$

式中: α 为基值; φ 为等离子体面积信号概率密度分布函数; χ_{\max} 为等离子体面积信号概率密度分布中的最大值(%).

在等离子体信号空间分布中,除了分布的最密集区域以外,其它区域内的点也同样会对焊接效果产生作用,只是它们的影响效果会受到这些点出现的位置及分布概率的直接影响.出现位置与基值距离越远,且分布概率越大,对基值焊接效果下产生的波动也就越大.文中将这种描述等离子体面积信号波动程度的特征参数定义为躁动值,其数值可根据实际信号的概率密度分布模型的积分值得.如图 2 中所示,躁动值的表达式为

$$\beta = \int_{\min}^{\max} C \cdot |D(k)| \cdot \phi(k) \cdot dk \quad (2)$$

式中: β 为躁动值; C 为比例调节常数; k 为检测信号范围内的任一点信号强度值; $\phi(k)$ 为 k 点对应的概率密度值; $D(k)$ 为 k 点与基值的距离.

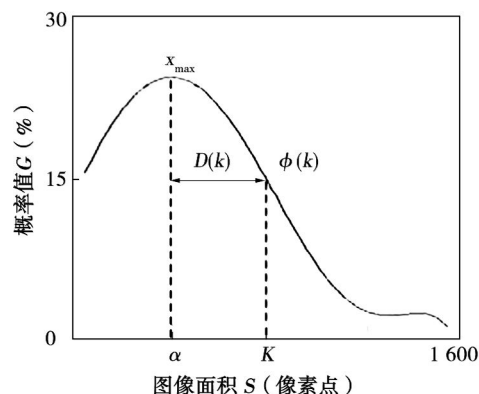


图 2 参数说明图

Fig. 2 Diagram of parameter explaining

由于等离子面积信号整体分布模型中的波动情况反映了焊接过程中小孔的稳定情况,而小孔的异常波动又是产生气孔缺陷的起因,也是决定气孔生成情况的主要因素之一.所以离子面积信号分布模型中与基值相对应的焊接波动参数与焊接气孔缺陷必然存在一定的关联性^[9].因此,躁动值可以作为识别气孔缺陷的一项重要指标.

在实际分析时除了要考虑检测信号的分布特征外,还需考虑到两个方面的问题.一是不同焊接工艺条件对焊接结果的影响,比如能量输入情况、光学参数情况及焊接速度等,这些条件的变化都会对实际检测结果产生影响,需要根据实际情况对检测结果做一定的修正处理.二是需要选取合理数量的信号区间逐一进行概率密度分析,因为虽然激光焊接过程等离子体面积信号的概率分布规律与实际焊接条件存在较严格的对应关系,但是所有焊接过程中又都是存在局部焊接波动的(这与焊接特性有关).所以为了区分同一条焊缝的气孔率变化情况,就需要选取合理的信号区间逐一进行概率密度分析,然后从中提取出与焊接状态及焊接气孔缺陷有直接关联的特征值组合,并绘制出变化曲线,最后可通过对特征值分析实现对焊接气孔缺陷的可靠检测^[10,11].

2 试验结果及分析

2.1 不同焊接工艺方法气孔缺陷检测试验结果

为了验证特征参数与气孔缺陷的实际对应情况,试验选取含有工艺类气孔较多的无摆动激光深熔焊和两种抑制气孔较好的离焦量为 +10 mm 的大光斑激光深熔焊及扫描半径为 0.6 mm,频率为 120 Hz 的扫描激光深熔焊作为研究对象,采用上述检测方法,在 4 kW 相同能量输入、光学参数及焊接速度的情况下进行了气孔缺陷无损检测.

试验从采集的等离子体面积信号中逐点选取了一系列连续且具有相同合理数量的信号分析区间;通过整体分析方法得到了每一区间检测数据的整体分布模型;然后从各模型中提取出基值及躁动值相关特征参数;最后在检测界面中做出基值及躁动值随时间的变化曲线。

试验的检测结果如图3所示,图中粗线部分为检测获得的基值变化曲线,细线为计算得到的与焊接稳定性(或气孔缺陷)相关的躁动值曲线。图中可以发现在3种不同焊接工艺条件下,它们的基值存在明显的数值及波动情况的差异,尤其在图3b大光斑激光焊试验中,由于初始试板温度较低形成的是激光热导焊,而随后随着试板温度的累积升高又形成了激光深熔焊,这一过程被基值变化曲线很好的记录下来。说明基值大小与实际焊接条件存在关联性。从图中还可以看出,含有工艺类气孔较多的无摆动激光深熔焊的躁动值要明显高于抑制气孔较好工艺下的大光斑深熔焊和摆动激光深熔焊,且波动非常剧烈,说明无摆动激光深熔焊的稳定性是较差的。而实际焊接结果是无摆动激光深熔焊的气孔率为9.46%,远高于大光斑激光深熔焊及扫描激光深熔焊的0.8%和0.1%,说明躁动值特征曲线与实际气孔生成情况间存在较大的关联。

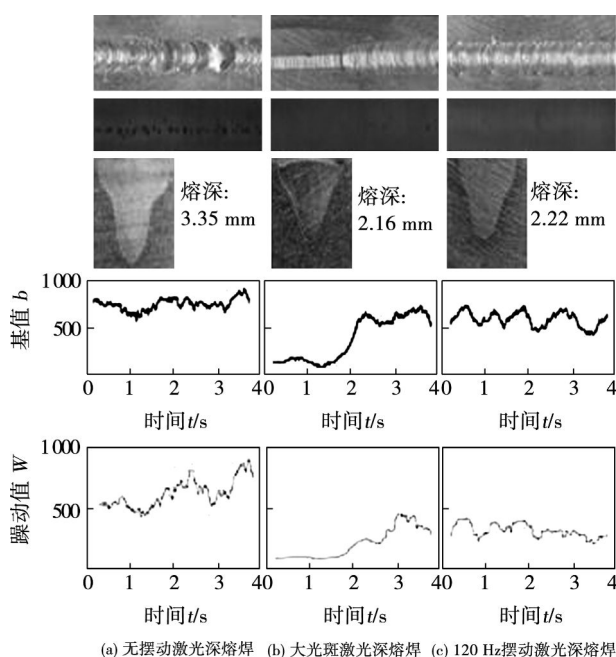


图3 不同类型焊缝的检测结果对比(激光功率4 kW)

Fig. 3 Contrast detection results of different welding types (laser power 4000 W)

2.2 不同频率间的圆形扫描激光焊接检测试验

为了进一步验证该检测方法的有效性,并获得

该检测方法与气孔率间的定量关系。试验选取焊接条件为激光功率4 kW,离焦量0 mm,保护气体流量10 L/min,摆动半径0.65 mm,扫描频率为60~240 Hz,的一组圆形轨迹扫描激光焊试验,观察在焊接条件变化较小时,该检测方法对气孔缺陷的识别能力。试验去除了起焊和收焊区域的不稳定检测信息,然后将整段的检测信号进行一次整体分析和躁动值特征参数提取,试验结果如表1所示。

表1 不同频率间的圆形扫描激光焊接试验结果

Table 1 Results of circular scanning laser welding with different frequencies

光束摆动序号	频率 f/Hz	气孔率 $\eta(\%)$	躁动值 W
1A41	60	0.5	8.76
1A42	80	0.4	7.07
1A43	110	0.3	7.12
1A44	130	0.6	10.62
1A45	150	1.0	12.96
1A46	170	1.2	14.12
1A46	190	1.5	16.27
1A48	240	1.7	19.66

从表1中不难发现在激光扫描频率发生改变时焊缝的实际气孔生成情况与特征参数躁动值间存在较大的关联性和较好的趋势同向性。通过origin建立的躁动值与气孔率的二维图中发现此二者间还具有较好的线性关系,如图4所示。

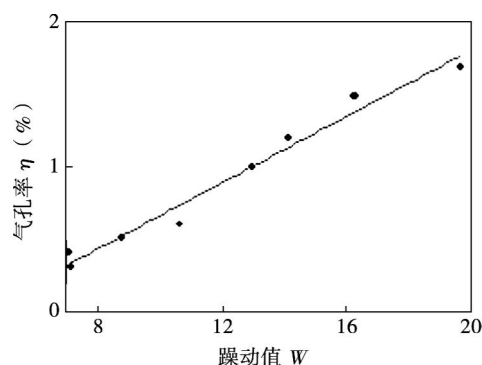


图4 躁动值与气孔率的线性关系

Fig. 4 Linear relationship between restless parameter and porosity

3 结 论

(1) 在整体分析方法的基础上提出了基值和躁动值两种特征参数。其中,基值定义为等离子体面积信号最大概率密度分布区域的信号强度;躁动值定义为等离子体面积信号相对于基值的偏离程度或等

离子体面积信号的波动程度.

(2) 基值的大小与实际焊接条件存在关联性.

(3) 躁动值的数值与激光焊接波动情况及气孔缺陷情况具有较大相关性.

(4) 在不同频率的圆形扫描激光焊接试验中发现,躁动值与焊接气孔率间存在较好的线性关系.

参考文献:

- [1] 王旭友, 孙 谦, 王 威, 等. 激光焊接中的等离子体变化规律及气孔缺陷快速测试方法研究——检测信号整体分析方法[J]. 焊接学报, 2016, 37(3): 21–24.
Wang Xuyou, Sun Qian, Wang Wei, *et al.* Study on the changing ruler of plasma in laser welding and the quick testing method of blowhole defects——global analysis method for detection signals[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(3): 21–24.
- [2] 高向东, 吕威兴, 游德勇, 等. 大功率盘形激光焊接过程等离子体图像特征分析[J]. 焊接学报, 2011, 32(11): 5–8.
Gao Xiangdong, Lü Weixing, You Deyong, *et al.* Analysis of characteristics of plasma image during highpower disk laser welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(11): 5–8.
- [3] Sibillano T, Ancona A, Berardi V, *et al.* Optical detection of conduction/keyhole mode transition in laser welding[J]. Journal of Materials Processing Tech. 2007, 191(1): 364–367.
- [4] Gael D, Afia K D, Henri W, *et al.* Non-destructive testing of porosity in laser welded aluminum alloy plates: laser ultrasound and frequency-bandwidth analysis[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2013, 32(4): 354–361.
- [5] Sergio S R, Roberto A G, José M B, *et al.* Laser welding defects detection in automotive industry based on radiation and spectroscopical measurements[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49(1): 133–145.
- [6] 孟宣宣, 王春明, 胡席远. CO₂ 激光拼焊的光与声信号分析[J]. 焊接学报, 2011, 32(7): 95–99.
Meng Xuanxuan, Wang Chunming, Hu Xiyuan. Analysis of optical and acoustic signals in CO₂ laser butt welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(7): 95–99.
- [7] Wang J, Wang C M, Meng X X, *et al.* Study on the periodic oscillation of plasma/vapour induced during high power fibre laser penetration welding[J]. Optics and Laser Technology, 2011, 44(1): 67–70.
- [8] Sibillano T, Ancona A, Rizzi D, *et al.* Plasma plume oscillations monitoring during laser welding of stainless steel by discrete wavelet transform application[J]. Sensors, 2010, 10(4): 3549–61.
- [9] 黎 硕, 王 军, 杨上陆, 等. 铝合金激光-MIG 复合焊接气孔缺陷研究[J]. 应用激光, 2013, 33(6): 595–600.
Li Shuo, Wang Jun, Yang Shanglu, *et al.* Study on porosity defects of aluminium alloy in laser-MIG hybrid welding[J]. Applied Laser, 2013, 33(6): 595–600.
- [10] 孙 谦. 激光焊接质量快速无损检测方法: 中国, 201310459378.3 [P]. 2013–10–02.
- [11] 孙 谦. 激光焊接质量在线检测方法: 中国, 201310459376.4 [P]. 2013–10–02.

作者简介: 孙 谦,男,1980 年出生,博士,高级工程师. 主要从事激光及激光电弧复合焊接质量在线检测技术和装备方面的科研. 发表论文 15 篇,发明专利 20 余项. Email: 13936469057@163.com