

非穿透激光深熔焊熔深与等离子体光信号的关系

王春明¹, 余福林¹, 段爱琴², 胡伦骥¹

(1. 华中科技大学 材料学院, 武汉 430074; 2. 高能束流加工技术重点试验室, 北京 100024)

摘 要: 对于非穿透激光深熔焊而言, 焊接熔深是最重要的质量参数之一, 对其进行实时监测具有重要意义。通过采集和分析激光焊接过程中等离子体光信号以探索焊接熔深的实时监测技术。研究结果表明, 当激光功率不变时降低焊接速度, 或焊接速度不变时提高激光功率, 在焊缝熔深加大的同时, 采集到的等离子体光信号强度亦呈明显上升趋势; 在工艺参数不变的同一焊缝内, 对应焊缝光信号的频谱图中存在明显主频, 且随着焊接线能量的提高, 主频率下降; 同一焊缝内由于某些不稳定因素导致局部焊缝熔深变化超过 8% 时, 等离子体光强明显下降, 而对应该段信号的幅值谱不存在明显主频率。

关键词: 激光焊接; 焊缝熔深; 等离子体; 实时监测

中图分类号: TG402 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2002)05-45-05



王春明

0 序 言

激光焊接在工业中获得了日益广泛的应用, 正在逐步取代许多传统的加工方法。然而, 激光焊接作为高速、精密、影响因素复杂的高柔性制造技术, 仅仅要求工艺参数和加工设备具有足够的稳定性是不够的, 诸如工件表面状况、材料成分的不均匀性、光程的变化以及透镜的热效应等因素都可能导致焊接质量的波动。对于非穿透激光焊而言, 焊接熔深是焊接质量的最重要参数, 对其进行非破坏性的实时监测具有较大工程意义和理论价值。近年来, 对激光焊接质量实时监测的研究报道很多^[1, 2], 但对于熔深监测这一课题研究很少^[3], 因此对其进行了有意义的探讨。

1 试验方法与装置

激光致等离子体是影响非穿透焊缝熔深的重要因素, 采用光电传感器获取等离子体的特征光信号对焊接熔深进行监测, 其信号检测装置如图 1 所示。

在最大输出激光功率为 9 kW 的横流激光器上对不锈钢板进行堆焊, 分别选择不同的激光功率和焊接速度在 Ar 气保护下进行试验, 在焊接过程中, 整条焊缝都不穿透被焊试板, 通过改变激光功率和



图 1 等离子体光信号检测装置

Fig. 1 Plasma optical signal picking up device

焊接速度来获得不同焊缝熔深, 用 25 kHz 的采样频率来采集等离子体光信号, 并将采集结果以数据文件的形式存入计算机, 然后再对等离子体的光信号进行分析处理。焊后对每条焊缝在焊缝中轴线用线切割方法纵剖, 选其中一半焊缝制成金相试样, 以此来观察整条焊缝上的熔深变化。焊缝经过扫描仪扫描并输入计算机后, 其纵截面上的点变成以数值表示的精确像点, 利用图像处理软件可以读取焊缝熔合线上每一点的具体熔深值。

2 试验结果

在厚度为 7.9 mm 的不锈钢平板上实施激光焊接后得到四条非穿透焊缝, 各条焊缝的焊接工艺参

数如表 1 所示。

表 1 焊缝的焊接工艺参数及平均熔深
Table 1 Welding parameters and averaged penetration of four welds

No.	1	2	3	4
Laser power P/kW	6.00	6.00	6.00	7.00
Welding speed $v/(m \cdot min^{-1})$	1.00	2.00	3.00	3.00
Averaged penetration h/mm	5.91	5.85	5.32	5.44

各焊缝经过扫描并输入计算机后的纵截面如图 2 所示, 图 2 中颜色比较深的上半部分为焊缝, 颜色比较浅的下半部分为母材, 其中标有 Start 字样的是焊接过程的起始端, 标有 End 字样的是焊接过程的终止端。对于每一条焊缝, 在焊接过程中其焊接工艺参数没有改变, 整条焊缝的熔深存在着短程起伏变化, 总体上是围绕某一幅值而在小范围内上下波动, 因此在每条焊缝中读取 20 个熔深值, 取其平均值作为各条焊缝的熔深。这些读取的熔深值分布在被分析处理的整条焊缝上, 并且, 为了排除少数熔深变化较大的局部焊缝段可能带来的误差, 在熔深变化很大的局部焊缝段内尽可能读取中间熔深值。各焊缝平均熔深见表 1。

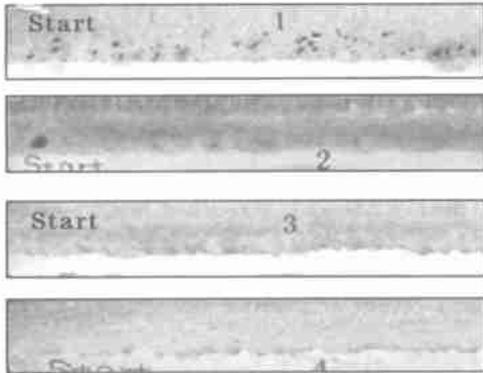


图 2 各条焊缝纵截面图
Fig. 2 Vertical section of welds

进一步观察图 2 中的各条焊缝熔深可以发现, 在同一条焊缝的某一些局部, 熔深变化有时很大, 例如 3 号焊缝中局部熔深变化甚至高达 0.65 mm, 局部熔深变化幅度为焊缝平均熔深的 12%, 这说明即使对同一条焊缝, 工艺参数不变并不一定获得均匀一致的熔深。首先讨论激光焊接工艺参数对整条焊缝平均熔深的影响以及等离子体光信号的变化特征, 然后再对局部熔深变化较大的焊缝段做进一步分析。

3 分析讨论

3.1 焊接工艺参数对焊缝熔深的影响

从表 1 可以看出, 在保持激光功率 6 kW 不变时, 焊缝熔深随焊接速度的增加而减小。在保持焊接速度 3 m/min 不变时, 焊缝熔深随着激光功率的增加而加大。为了综合工艺参数两种变化方式对熔深的影响, 建立了焊缝熔深与焊接线能量之间的关系。焊接线能量以 J/m 为单位, 试验中各焊缝的焊接线能量分别为: 1 号—360.0, 2 号—180.0, 4 号—138.0, 3 号—120.0。得到焊缝熔深与焊接线能量之间的关系如图 3 所示。

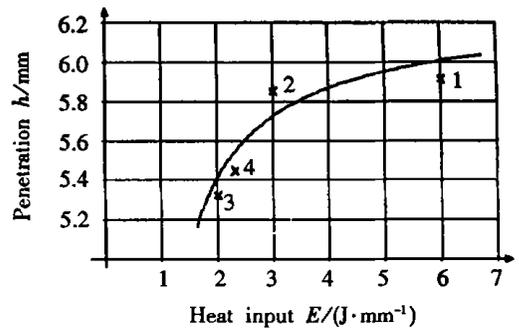


图 3 焊缝熔深与焊接线能量之间的关系

Fig. 3 Relationship between penetration & heat input

图 3 表明, 四条焊缝都遵循焊接线能量增加焊缝熔深加大的规律。试验中保护气为 Ar 气, 虽然试验的激光功率高达 6 kW 甚至 7 kW, 但由于控制合适而没有出现强烈的等离子体屏蔽现象, 焊缝熔深保持在 5 mm 以上。从图中还可以看出, 虽然焊缝熔深随着焊接线能量的增加而加大, 但是焊缝熔深不可能无限地加大, 当焊缝熔深达到一定值后继续增加焊接线能量, 焊缝熔深加大的速度明显降低, 进一步增加焊接线能量时焊缝熔深几乎没有加大, 若焊接线能量超过某一限度很有可能出现强烈的等离子体屏蔽现象, 从而导致焊缝熔深急剧下降。

3.2 激光焊接工艺参数改变时焊缝熔深与光信号强度的关系

采集到的等离子体光信号的波形见图 4。光信号的波形有一些起伏变化, 整体上表现出相当的平稳性, 这与焊缝熔深围绕平均值而上下波动的试验结果相吻合。另外, 光信号的波形图还直观地显示了光信号强度的相对高低, 例如, 从图 4 可以直接看出 4 号焊缝的光信号强度比 3 号焊缝的要高。为了以确切的数值来表示光信号强度的大小, 对每一条焊缝的光信号数据求出其平均光强。各焊缝的平均光强分别为: 1 号—2 135, 2 号—1 843, 3 号—1 624, 4 号—2 620, 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。

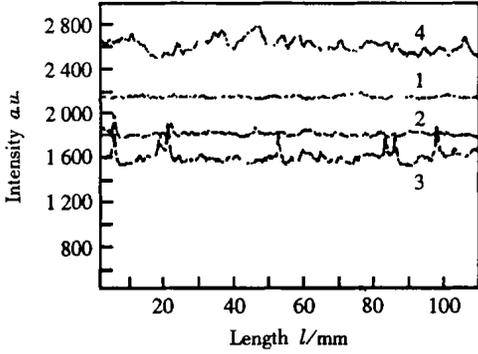


图4 四条焊缝的等离子体光信号

Fig. 4 Plasma optical signal of four welds

对1号、2号、3号焊缝,在激光功率不变的条件下,提高焊接速度导致焊缝熔深下降的同时,等离子体光信号强度亦存在下降趋势;对3号、4号焊缝而言,在焊接速度不变的条件下,提高激光功率在导致焊缝熔深加大的同时,等离子体光信号强度亦随之增加。上述试验结果表明,在激光焊接过程中当改变激光功率和焊接速度中的一个焊接工艺参数时,焊缝熔深和等离子体的光信号强度具有相同的变化趋势。

进而综合考虑激光功率和焊接速度的影响,即在焊接线能量发生变化时建立焊缝熔深与等离子体光信号强度的关系,如图5。

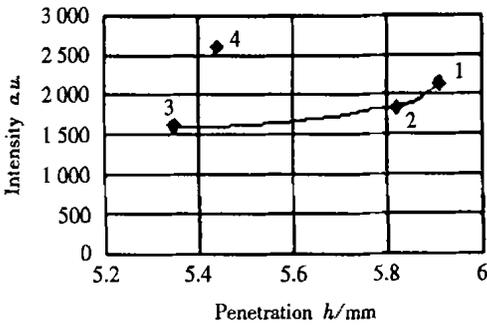


图5 信号强度与熔深的关系

Fig. 5 Relationship of signal amplitude and penetration

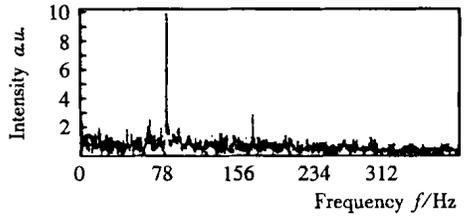
3号焊缝、2号焊缝和1号焊缝的熔深加大时其相应的光强也增加,并且在焊缝熔深超过5.8mm后,焊缝熔深的加大变得很缓慢(见图3),而光强随着熔深加大而迅速增加。可以认为在熔深超过5.8mm后,继续提高焊接线能量,增加的能量用于增加熔深的份额减少,相当一部分被等离子体吸收散射,从而使光强迅速增加。

同理不难解释4号焊缝光强明显高于其它焊缝的现象,特别需要考虑的是其线能量增加是通过提高功率而非降低焊接速度来实现的,而3号焊缝、2号焊缝和1号焊缝则是通过减小焊接速度来实现

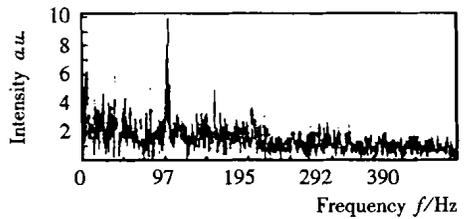
的。在4号焊缝上增加激光功率时,改变了激光与等离子体的作用状态,增加的激光能量只有一部分用于加大焊缝熔深,另一部分则为等离子体吸收、散射,因而其光强明显提高。

3.3 激光焊接工艺参数改变时不同焊缝光信号的频谱特征

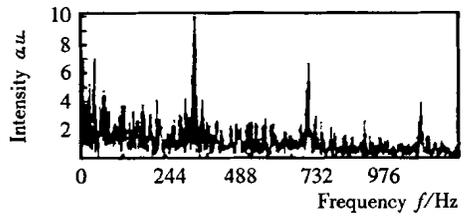
为了进一步揭示等离子体信号与焊缝熔深的关系,对信号进行了快速傅立叶变换(FFT)得到了四条焊缝信号的幅值谱,图6是整条焊缝上离子体的光信号的幅值谱,其横坐标是频率,纵坐标是光信号的相对光强。



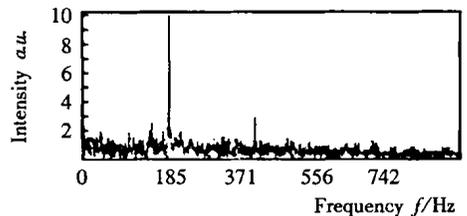
(a) Weld 1



(b) Weld 2



(c) Weld 3



(d) Weld 4

图6 焊缝的全貌FFT图

Fig. 6 Amplitude spectrum of four welds

从图6不难看出,在每条焊缝的全貌FFT图中均存在一条特征谱线,即主频峰,这反映本次激光焊接试验过程中等离子体光信号存在明显的周期性。显然,主频峰越是清晰尖锐,等离子体周期性越是确定,焊接过程越是稳定,焊缝熔深起伏变化越小。比较而言,图6所示1号、2号、3号、4号焊缝的全貌FFT图中,1号焊缝的主频峰最为清晰尖锐,附近杂

散频率强度均远低于主频,从图2焊缝纵截面图中亦可看出,相应的1号焊缝熔深最为平稳,熔深起伏变化最小。

进一步观察图6的焊缝全貌幅值谱,可以发现不同焊缝的主频峰位置是不同的,其相应的频率分别为:1号—80 Hz,2号—100 Hz,4号—120 Hz,3号—300 Hz。对1号、2号、3号焊缝,它们具有相同的激光功率,其主频峰频率随着焊接速度的提高而增大;对3号、4号焊缝,它们具有相同焊接速度,其主频峰频率随着激光功率的增大而减小。综合激光功率和焊接速度的影响,焊接线能量越高,则其相应的幅值谱主频峰频率越低。结合上文中分析的焊接线能量对焊缝熔深的影响,可以发现焊接线能量提高时焊缝熔深加大,同时其相应的幅值谱主频峰频率下降。焊缝熔深与其相应的幅值谱主频峰频率的关系如图7所示,主频峰频率随着焊缝熔深的加大而降低。

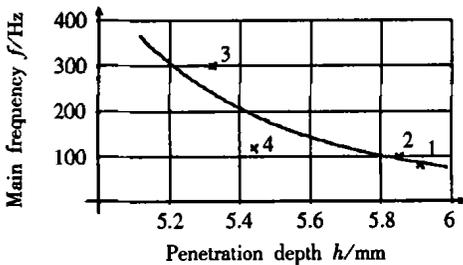


图7 焊缝熔深与主频峰频率的关系

Fig. 7 Relationship of main frequency and penetration

3.4 同一条焊缝内局部焊缝熔深变化很大时等离子体光信号的变化规律

前已叙及,工艺参数不变的同一条焊缝内,熔深也可能存在起伏,四条焊缝中以3号焊缝为最。图8所示为3号焊缝中局部熔深变化最为明显的区域,按其熔深变化趋势,可将其分为a、b、c、d四个焊缝段(考虑到FFT变换数据个数的要求,每一焊缝段的长度为4.1 mm,对应光信号数据个数为2048)。其中a是由较大熔深向较小熔深过渡的非平稳段,熔深波动达12%;b则是由较小熔深向较大

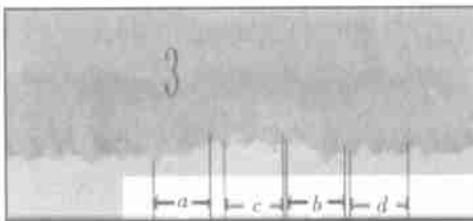


图8 各焊缝段在3号焊缝中的位置

Fig. 8 Position of a, b, c and d in No. 3 weld

熔深过渡的非平稳段,熔深波动达8%;c和d内虽仍存在更为局部的短程熔深起伏,但相对而言,其总体趋势比较平稳,且由于FFT变换数据个数、焊接速度及数据采集频率的制约,被分析焊缝的长度不能太小,故c段和d段可以认为是熔深平稳焊缝段。

对应于图8中各焊缝段的光信号强度分别为:a—1 529, b—1 744, c—1 985, d—1 944。可以从中看出,焊缝平稳段c、d的光信号强度明显高于非平稳段a、b的光信号强度。平稳焊缝段c的光信号强度比非平稳焊缝段a和b的光信号强度分别要高30%和14%,而平稳焊缝段c、d之间的差别只有2%。这一结果表明,保持同一条焊缝的激光焊接工艺参数不变,当激光器的不稳定性或其它某种不稳定因素造成焊接过程失稳、焊缝熔深发生变化时,等离子体的光信号强度能够反映这种变化。

进而对3号焊缝的平稳焊缝段c、d和非平稳焊缝段a、b的光信号分别进行FFT处理,图9是处理

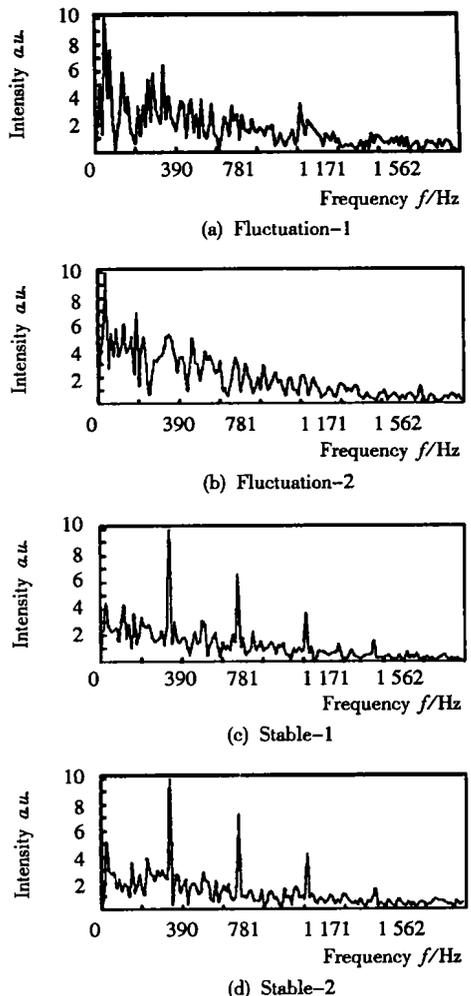


图9 3号焊缝的局部FFT图

Fig. 9 Signal amplitude spectrum for a, b, c and d

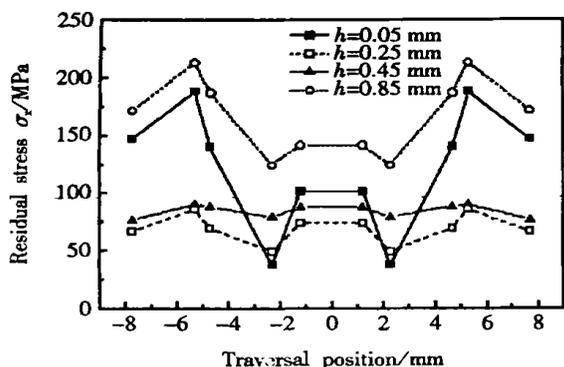


图5 搅拌摩擦焊试件纵向残余应力 σ_x 沿垂直焊缝方向和沿深度方向的分布

Fig. 5 Non-uniform in plane and in depth residual stress σ_x of FSW specimen

4 结 论

(1) 对于搅拌摩擦焊这种高应力梯度残余应力问题,传统的应变片钻孔法不再适应。

(2) 利用云纹干涉测量全场位移的特点,并假设非均匀残余应力场在孔周小范围内是均匀的,就可以得到残余应力沿孔直径方向的应力梯度。通过沿焊缝垂直方向的几个典型区域钻多个阶梯孔可以得到残余应力沿深度和垂直焊缝方向的非均匀分布。

[上接第48页]

后得到的焊缝局部幅值谱。

从图9可以看出,焊缝熔深的平稳段 c 、 d 的局部幅值谱与图6中3号焊缝全貌幅值谱极为相似,它们都有主频峰,并且主频峰在频谱上的位置也相同; c 段与 d 段之间虽然熔深存在区别,相应FFT图中主频峰强度亦略有区别,但这种区别十分细微,难以作为监测依据。然而焊缝熔深非平稳段 a 、 b 的幅值谱却显示出重大的差别:主频峰强度下降,附近杂散频率强度提高,主频峰被淹没。此种现象表明,焊缝熔深在局部出现持续变化时,等离子体光信号原有的稳定性遭到破坏,从而反映在局部焊缝段的幅值谱中主频峰的消失。

4 结 论

(1) 试验表明,激光功率不变时降低焊接速度,或焊接速度不变时提高激光功率,在焊缝熔深加大的同时,等离子体光信号强度亦呈明显上升趋势。

(2) 试验条件下,在工艺参数不变的另一焊缝内,由于某种不稳定因素导致局部焊缝熔深在一段时间内持续变化,熔深增大或减小量超过8%时,等

(3) 从残余应力测量计算结果可看出热影响区和搅拌影响区是残余应力相对较大的区域,该结果与文献[6]中用X射线法测量的结果相符合。

参考文献:

- [1] Dawes C J. An introduction to friction stir welding and its development [J]. Weld Metal Fabrication, 1995, (1): 13~16.
- [2] Nicoletto G. Moiré interferometry determination of residual stresses in the presence of gradients [J]. Exp. Mech., 1991, 31(3): 252~256.
- [3] Wu Z. Détermination des contraintes résiduelles par interférométrie de moiré et méthode de perçage du trou incremental [D]. Ph.D. thesis of Univ. Technology of Troyes 1998.
- [4] Schajer G S. Measurement of non-uniform residual stresses using the hole drilling method, part 1—stresses calculation procedures [J]. J. Eng. Mater. Technol., 1988, 111(4): 338~343.
- [5] Post D, Han B, Ifju P. High sensitivity moiré [M]. New York: Springer-Verlag, 1994. 85~134.
- [6] Webster P J. Synchrotron X-ray residual strain scanning of a friction stir weld [J]. J. Strain analysis, 2001, 36(1): 61~70.

作者简介: 亚敏,女,1974年出生。现为清华大学力学系与法国特鲁瓦技术大学联合培养的博士研究生,主要从事光学测试方法与残余应力测量方法研究。发表论文数篇。

Email: ym99@mails.tsinghua.edu.cn

离子光强明显下降。

(3) 频谱分析表明,试验条件下,对应焊缝光信号的频谱图中存在明显主频率,且随着焊接线能量的提高,焊缝熔深增加的同时主频峰频率下降,而不稳定因素引起的焊缝熔深持续变化的非平稳过渡段,主频峰值下降,为附近杂频淹没。

(4) 上述规律表明,等离子体光信号的时域、频域特征能反映工艺参数变化或某种隐含因素不稳定引起的熔深变化,可以成为实时监测激光焊缝熔深的良好判据。

参考文献:

- [1] 骆红,胡伦骥,黄树槐,等. 激光焊接过程中的等离子体振荡 [J]. 应用激光, 1997, (2): 77~78.
- [2] Sokowski W. Spectral plasma diagnostics in welding with CO₂ lasers [C]. SPIE, 1988. 96~102.
- [3] Sjoerd Postma, Roald G K M Aarts, John Meijer. Penetration detection in Nd:YAG laser welding of sheet metal by optical sensors [C]. Section E-ICALEO, 2000. 44~51.

作者简介: 王春明,男,1975年2月出生,工学博士,讲师。主要从事激光加工质量实时监测技术及工艺研究。发表论文5篇。

Email: cmwang@public.wh.hb.cn