

# 激光深熔焊过程熔池小孔发声数值计算与试验分析

敖三三, 罗 震, 黄尊月, 冯梦楠

(天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072)

**摘 要:** 激光深熔焊过程中产生的声信号是激光焊接过程质量检测的重要参量。文中对 3.5 mm 厚的低碳钢板进行焊接速度分别为 3, 4 和 5 cm/s 的工艺试验, 得到了三种典型的熔池小孔, 即平底形熔池小孔、锥形熔池小孔和匙形熔池小孔。通过对声信号的频谱分析, 得到这三种不同形状的熔池小孔的共振频率分别为: 1 503.9 Hz, 1 894.53 Hz 和 2 792.96 Hz。同时, 文中对试验得到的三种形状的熔池小孔发声过程进行了数值分析, 得到了对应的共振频率, 分别为: 1 453.125 Hz, 1 890.625 Hz 和 2 750 Hz。数值计算得到的结果与试验结果误差在 5% 范围内。结果表明, 文中所建立的熔池小孔模型能很好的反映出实际的焊接过程声信号的声场分布, 为声信号在质量检测中的应用提供理论基础。

**关键词:** 激光深熔焊; 熔池小孔; 共振; 声信号

**中图分类号:** TG 456.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)11-0093-06

## 0 序 言

同其它焊接方法相比, 激光焊是最具发展前途的焊接技术<sup>[1-3]</sup>。为了保障激光焊接质量并充分发挥激光焊的优势, 亟需进行激光焊接过程质量检测技术的研究<sup>[4,5]</sup>。由于目前还难以通过试验手段对激光焊熔体金属和熔池小孔内部进行直接的准确观测, 因此激光焊过程质量检测重点主要集中在激光与材料相互作用产生各种信号, 如光信号<sup>[6]</sup>、电信号<sup>[7]</sup>、超声波信号<sup>[8]</sup>和声信号<sup>[9]</sup>等。

相比较而言, 用于激光声信号检测的传声器具有更大的优势。首先, 其传声器的安装灵活, 不受空间的限制; 同时, 造价成本低, 可以实现非接触式监测; 另外, 声信号具有响应速度快, 非接触测量的特点, 通过它可以间接获得焊接过程熔体金属的状态与变化, 其带有大量焊接过程信息, 是合适的过程检测参量。

理论和试验已经证明<sup>[10,11]</sup>: 当激光焊接模式处于深熔焊时, 就可以听到明显的滋滋声信号。该声信号主要通过流体介质与其相接触的任何固定面振动、直接作用在流体上振动力、流体本身的剧烈运动等途径产生。但是, 目前大部分的研究都是直接建立激光声信号与焊接质量之间的关系, 对于激光焊

接过程中声信号的产生机理研究很少, 而且从所掌握的文献来看, 很少有对激光焊接过程声源的发声过程进行数值计算并进行试验验证的。鉴于此, 文中将研究不同工艺参数条件下激光深熔焊所得到的三种形状的熔池小孔发声的过程, 并将数值计算结果与试验结果进行比较分析。

## 1 试验方法

选用厚度为 3.5 mm 低碳钢板。Nd:YAG 激光器型号为 JK2003SM, 其聚焦透镜焦距为 160 mm。选用传声器型号为 MPA416。传声器固定在一个自制的板上, 垂直正对激光束, 距离熔池的水平长度为 5 cm, 竖直高度为 5 cm。采样频率设置为 10 kHz, 整个采集系统如图 1 所示。

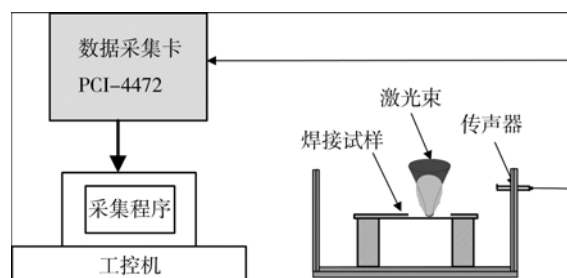


图 1 激光焊接过程声信号采集示意图

Fig. 1 Schematic of pool vibrating sound source

收稿日期: 2014-10-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51405335、51275342); 中国博士后特别资助项目(2014T70212)

焊接速度是影响激光焊接质量和焊接过程稳定

性的一个重要参数. 因此, 文中重点研究激光焊接速度对声信号的影响.

选用的焊接速度分别为 3, 4 和 5 cm/s. 三种焊接速度下, 激光功率和离焦量均为 1 900 W 和 -3.5 mm.

## 2 熔池小孔发声过程数值模拟

### 2.1 熔池小孔发声过程

熔池小孔所组成的振动体位于空气介质中, 如图 2 所示. 空气密度为  $\rho$ , 声音在空气介质中传播速度为  $c$ , 记振动体的表面积为  $S_0$ , 其包围的外区域为  $D_-$ , 内区域为  $D_+$ .

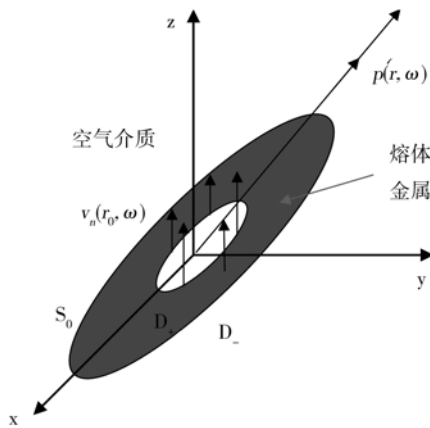


图 2 熔池小孔示意图

Fig. 2 Schematic of pool vibrating sound source

熔池小孔振动满足的波动方程为

$$\nabla^2 p(r, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(r, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

当振动体处于稳态振动状态时, 振动体声压可以表示为关于时间简谐振动函数, 记为  $p = pe^{-i\omega t}$ , 带入(1)中, 得 Helmholtz 方程, 即

$$\nabla^2 p(r, \omega) + k^2 \cdot p(r, \omega) = 0 \quad (2)$$

通过 Euler 方程, 得到表面声压与法向振动速度的关系式为

$$\frac{\partial p(r_0, \omega)}{\partial n} = -i\omega\rho v_n(r_0, \omega) \quad (3)$$

联合求解式(2)和式(3), 可得到熔池小孔振动时, 其外部辐射声场计算的基本公式, 即

$$C(P)p(r, \omega) = \iint_{S_0} \left[ p(r_0, \omega) \frac{\partial G(r_0, \omega)}{\partial n} - p(r_0, \omega) \frac{\partial G(r_0, \omega)}{\partial n} \right] dS \quad (4)$$

式中:  $\nabla^2$  为拉普拉斯算子;  $p(r, t)$  为极坐标空间某点对时间  $t$  的声压函数;  $p(r, \omega)$  为角频率  $\omega$  的声波在空间声场  $r$  处的复声压;  $\omega$  为声波的角频率;  $r$  为某

点在空间声场的距离;  $v_n(r_0, \omega)$  为已知的振动表面法向振动速度;  $r_0$  为振动体表面上某点;  $G(r, r_0)$  为自由空间场的 Green 函数;  $\partial/\partial n$  为边界  $\partial S_0$  上的法向导数;  $C(P)$  为系数, 根据辐射声场所处的区域, 选取不同的数值.

### 2.2 熔池小孔模型的建立

对三组激光焊接试验得到的焊缝试样, 进行切割、打磨和腐蚀, 得到三种焊接速度条件下熔池小孔形貌. 分别命名为: 平底型熔池小孔、锥形熔池小孔和匙形熔池小孔.

根据试验所得到的三种不同形状的熔池小孔形状, 建立对应的熔池小孔模型, 如图 3 - 图 5 所示.

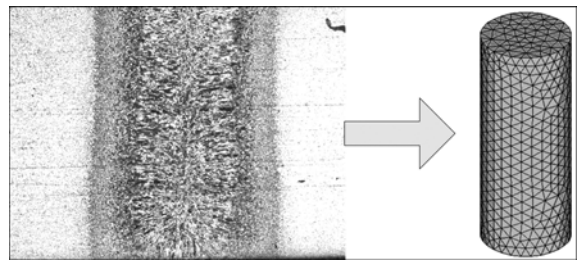


图 3 平底形熔池小孔实际轮廓与数值计算模型

Fig. 3 Profile models of flat shape pool-keyhole

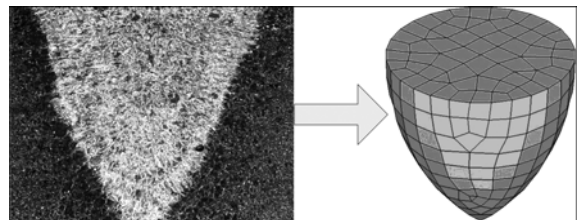


图 4 锥形熔池小孔实际轮廓与数值计算模型

Fig. 4 Profile models of cone shape pool-keyhole

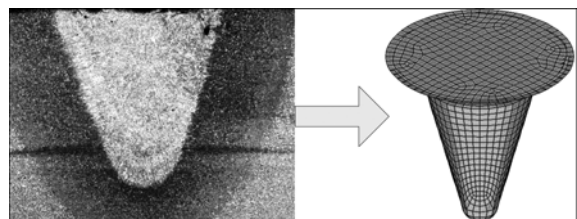


图 5 匙形熔池小孔实际轮廓与数值计算模型

Fig. 5 Profile models of spoon shape pool-keyhole

### 2.3 辐射声场场点的建立

为了获得熔池小孔的辐射声场分布; 同时, 为了比较三种不同形状的熔池小孔产生声信号的差异, 建立了平面场点, 如图 6 所示.

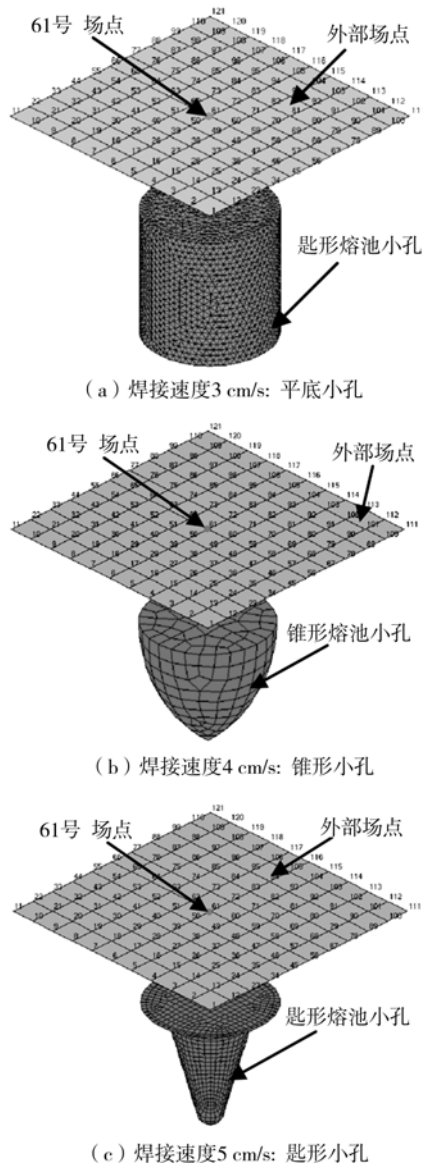


图 6 熔池小孔辐射声场场点的建立

Fig. 6 Field point meshes of three pool-keyholes

## 2.4 边界条件的确定

激光深熔焊形成的熔池小孔,被熔体金属包围,熔池小孔内部的混合气体的密度相对较低,假设材料须由熔池小孔的前沿连续的向熔池小孔的后部传输<sup>[12]</sup>. 设熔池小孔内部材料以混合气体形式流动占总质量的比例为 $\beta$ ,穿过熔池小孔的速度设为 $v_t$ ,则此时连续的传质过程需要满足的条件为<sup>[12]</sup>

$$\rho_v v_t = \beta v_0 \rho_s \quad (5)$$

在熔池小孔前沿蒸发的熔体金属的传质过程中将会产生一个附加的压力 $p$

$$p = (\beta \rho_s v_0) v_t \quad (6)$$

忽略熔体金属的粘性力,则熔池小孔前沿熔体金属在附加压力 $p$ 的作用下得到的流动速度 $v$ 为

$$\frac{1}{2} \rho_s v^2 = p \quad (7)$$

由式(5)、式(6)和式(7)联立可得

$$v = \beta v_0 \left( \frac{2 \rho_s}{\rho_v} \right) \frac{1}{2} \quad (8)$$

式中: $\rho_s$ 为固体金属和熔体金属的密度( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ); $\rho_v$ 为混合气体的密度( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ); $v_0$ 为熔池小孔移动速度( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $\beta$ 为熔池小孔内部材料以混合气体形式流动占总质量的比例; $v_t$ 为气体穿过熔池小孔的速度( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $v$ 为液体金属的流动速度( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

在一个标准大气压的条件下,低碳钢液态金属密度 $\rho_s$ 与混合气体密度 $\rho_v$ 之比为 $\rho_s/\rho_v = 2 \times 10^4$ , $v_0 = 0.03, 0.04, 0.05 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 分别带入上式,求得其边界加载条件.

## 3 结果及讨论

### 3.1 激光深熔焊试验

三种焊接速度下,采集到的激光声信号波形如图7~图9所示,声信号的采集时间为2 s.

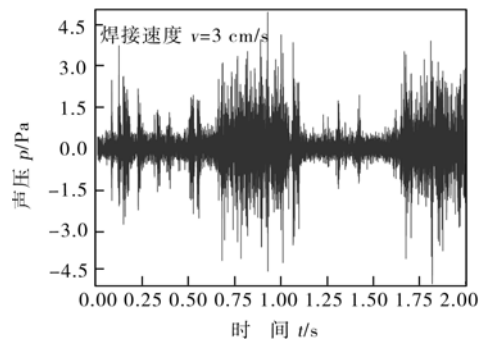


图 7 焊接速度为 3 cm/s 时采集到的声信号

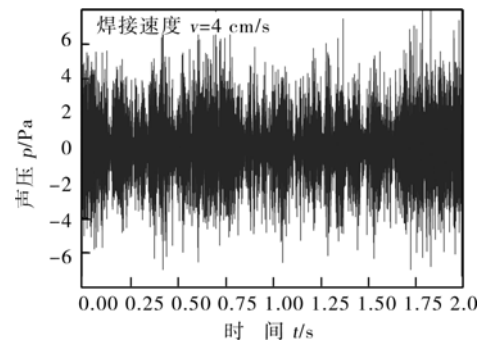
Fig. 7 Acoustic signal obtained at speed  $v=3 \text{ cm/s}$ 

图 8 焊接速度为 4 cm/s 时采集到的声信号

Fig. 8 Acoustic signal obtained at speed  $v=4 \text{ cm/s}$ 

从采集到的声压随时间变化的曲线中(图7~图9),很难发现三种不同焊接速度条件下所采集的声信号差异. 因此,对声信号作时变参量分析,得到

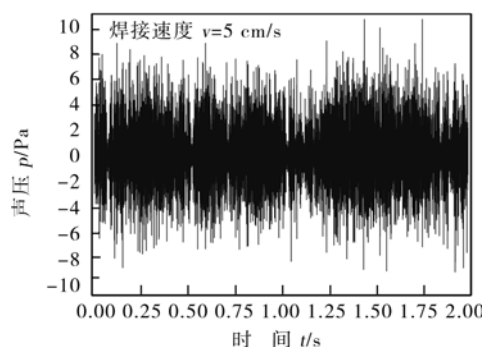


图 9 焊接速度为 5 cm/s 时采集到的声信号

Fig. 9 Acoustic signal obtained at speed  $v=5$  cm/s

的结果如图 10 所示。

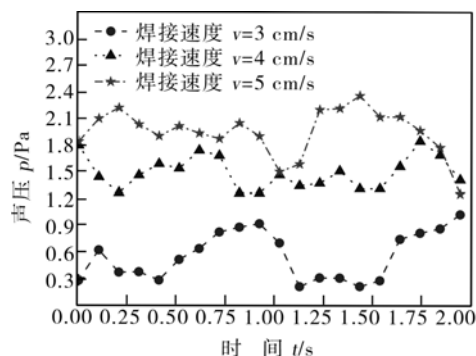


图 10 不同焊接速度声信号的时变参量分析

Fig. 10 Effective value of acoustic pressure at different welding speeds

从图 10 中可以发现:随着焊接速度的增大,其产生的声信号的声压值也随之增大。对采集的声信号做进一步的频谱分析,其分析结果如图 11 所示。

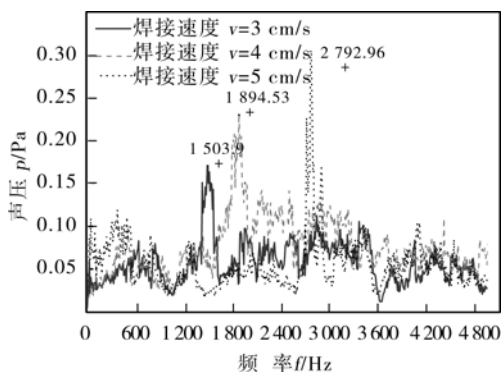


图 11 不同焊接速度下声信号的频谱分析

Fig. 11 Acoustic spectra at different welding speeds

从频谱分析的结果(图 11)可以明显的得到,不同的焊接速度所产生的声信号都存在一个明显的频

率峰值。由于激光深熔焊过程中,声信号的产生是熔池小孔的振动而引起的。所以,声信号中峰值频率应是对应于熔池小孔的共振频率。很明显,当速度为 3 cm/s 时,其共振频率为 1 503.9 Hz,4 cm/s 速度所对应的共振频率为 1 894.53 Hz,速度为 5 cm/s 时,所对应的共振频率为 2 792.96 Hz。

### 3.2 数值计算结果

采用比利时 leuven measurement & system LMS 公司开发的 Sysnoise 软件对熔池小孔发声过程进行数值分析。选取熔池小孔正上方的 61 号场点,提取该场点处的声信号,进行频谱分析,其分析结果如图 12 所示。

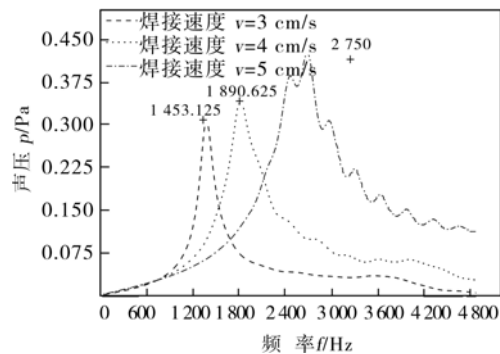


图 12 不同熔池小孔,61 号场点声信号频谱特性

Fig. 12 Frequency response function of No. 61 point

从图 12 可以得到:在 0 ~ 5 000 Hz 的频率范围内,3 种熔池小孔在声场 61 号场点出所产生的声信号的频谱特性是不同的,可以得到,平底形小孔产生的声信号的共振频率为 1 453.125 Hz,锥形小孔的共振频率为 1 890.625 Hz,匙形小孔的共振频率为 2 750 Hz。数值计算得到的熔池小孔的共振频率值与试验得到的共振频率值很接近,其误差在 5% 范围内。由此可见,文中所建立的模型能很好的反映出激光深熔焊过程声信号的特征。

图 13 进一步给出了 3 种不同的熔池小孔在各自的共振频率点处,所对应的辐射声场声压分布云图。从图 13 辐射声场声压云图,就可以很直观的观察观察到各自辐射声场处任意场点的声压。

### 3.3 讨论与分析

激光深熔焊过程所形成的熔池小孔,在其内部存在各种力,包括由重力引起的流体静压力、流体的表面张力、材料蒸发所产生的气化压力以及熔体金属流体所产生的流体动压力<sup>[13,14]</sup>。在焊接过程中,存在于熔池小孔内部的压力梯度迫使混合气体从熔池小孔中喷射出来,当混合气体喷射出来的瞬间,熔池小孔内部的压力不再保持平衡,此刻在熔体金属

重力和表面张力的作用下,试图迫使熔池小孔闭合;然而激光能量是连续补给的,内部混合气体再次生成,克服熔体金属重力和表面张力,进而避免熔池小孔发生闭合。在这样一个动态过程中,熔池小孔就会发生振动<sup>[15]</sup>。熔池小孔的振动必将引起周围空气介质的振动,从而产生声信号。

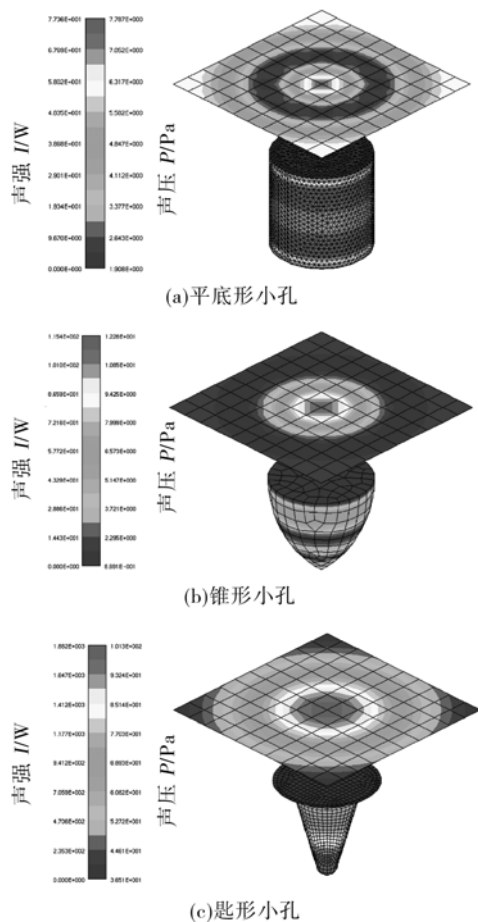


图 13 不同的熔池小孔在共振频率点处辐射声场声压分布  
Fig. 13 Acoustic pressure distribution of radiation field at resonant frequency

三种不同熔池小孔的共振频率点、辐射声压信号以及振动情况的不同,主要是由于熔池小孔的几何形状和内腔共振面的大小,对于声波有反射、折射作用,影响熔池小孔振动频率,从而造成辐射声信号声压值的不同。另外,由试验和数值计算的结果都可以发现,随着焊接速度的增加,声信号的声压也在变大。产生这种现象的可以解释为在稳定的激光深熔焊模式下,有式(5)可知:混合气体的喷出速度  $v_1$  与焊接速度  $v_0$  是成正比的。所以,焊接速度提高,其混合气体的喷射速度也随之增加,则作用在熔池小孔壁上的压力大小也随着焊接速度的增加而成指数增长。显然,作用的压力越大,熔体金属的振动就越

剧烈,从而所辐射的声压也就越大。

## 4 结 论

(1) 通过三组不同焊接速度的工艺试验,分别得到了平底形熔池小孔、锥形熔池小孔和匙形熔池小孔,三个熔池小孔对应的共振频率分别为:1 503.9 Hz、1 894.53 Hz和 2 792.96 Hz。

(2) 在激光工艺试验得到的三种类型熔池小孔的前提下,进行了数值分析。也得到了三种熔池小孔的共振频率分别为:1 453.125 Hz,1 890.625 Hz和 2 750 Hz。数值计算得到的值与激光试验得到的数值误差范围在 5% 内。因此,文中所建立的熔池小孔模型能很好的反映出实际焊接过程声信号辐射情况。

(3) 通过数值计算,可以得到不同的频率下,熔池小孔的声辐射场分布情况。这些结果是很难通过试验手段得到的。因此,数值计算为进一步分析熔池小孔发声提供了理论依据。

## 参考文献:

- [1] 敖三三,罗震,单平,等. Inconel 601 镍基高温合金激光焊焊缝显微组织[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(8): 1-9.  
Ao Sansan, Luo Zhen, Shan Ping, *et al.* Microstructure of inconel 601 nickel-based superalloy laser welded joint [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(8): 1-9.
- [2] 王腾,高向东. 大功率碟形激光焊支持向量回归熔宽预测算法[J]. 焊接学报, 2013, 34(5): 25-28.  
Wang Teng, Gao Xiangdong. Support vector regression algorithm for fusion width prediction in high-power disc laser welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(5): 25-28.
- [3] 黄尊月,罗震,姚杞,等. 薄板激光焊接热变形的检测[J]. 焊接学报, 2015, 36(7): 47-50.  
Huang Zunyue, Luo Zhen, Yao Qi, *et al.* Detection of aluminum alloy sheet deformation during laser beam welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(7): 47-50.
- [4] 蔡华,肖荣诗. 薄板铝合金高功率 CO<sub>2</sub> 激光与光纤激光焊接飞溅特性对比分析 [J]. 焊接学报, 2013, 34(2): 11-14.  
Cai Hua, Xiao Rongshi. Spatter characteristics analysis of thin aluminum alloy welding by the high power CO<sub>2</sub> laser and fiber laser [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(2): 11-14.
- [5] 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-检测信号整体分析方法[J]. 焊接学报, 2016, 37(3): 45-48.  
Wang Xuyou, Sun Qian, Wang Wei, *et al.* The law of the plasma changes and the rapid test methods of the hole defects in laser

- welding-Analysis method of the detection signals[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(3): 45–48.
- [6] Park Y W, Park H, Rhee S, *et al.* Real time estimation of CO<sub>2</sub> laser weld quality for automotive industry[J]. Optics & Laser Technology, 2002, 34(2): 135–142.
- [7] Li L, Brookfield D J, Steen W M. Plasma charge sensor for in-process, non-contact monitoring of the laser welding process[J]. Measurement Science and Technology, 1996, 7(4): 615.
- [8] Li L. A comparative study of ultrasound emission characteristics in laser processing[J]. Applied Surface Science, 2002, 186(4): 604–610.
- [9] Ao Sansan, Luo Zhen. Simulation and experimental analysis of acoustic signal characteristics in laser welding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1/4): 277–287.
- [10] Luo H, Zeng H, Hu L J, *et al.* Application of artificial neural network in laser welding defect diagnosis[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 170(2): 403–411.
- [11] Gu Hand Duley W W. Resonant acoustic emission during laser welding of metals[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1996, 29(3): 550–555.
- [12] Klemens P G. Heat balance and flow conditions for electron beam and laser welding[J]. Journal of Applied Physics, 1976, 47(5): 2165–2174.
- [13] Kroos J, Gratzke U, Vicanek M, *et al.* Dynamic behavior of the keyhole in laser welding, Journal of Physics D: Applied Physics [J]. 1993, 26(3): 481–486.
- [14] Kroos J, Gratzke U, Simon G. Towards a self-consistent model of the keyhole in penetration laser beam welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1993, 26(3): 474–480.
- [15] Klein T, M. Vicanek, J. Kroos. Oscillations of the keyhole in penetration laser beam welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1994, 27(10): 2023–2030.

**作者简介:** 敖三三,男,1984 年出生,讲师。主要从事激光焊接质量检测方面研究工作。发表论文 15 余篇。Email: aosanmick@163.com

**通讯作者:** 罗 震,男,教授,博士研究生导师。Email: lz@tju.edu.cn

## [ 上接第 92 页 ]

### 参考文献:

- [1] 郝安林,赵亚东. 铝合金焊接方法的研究现状[J]. 安阳工学院学报, 2010, 9(6): 1673–2928.
- Hao AnLin, Zhao Ya dong. Review of research on welding technologies of aluminum alloys [J]. Journal of Anyang Institute Technology, 2010, 9(6): 1673–2928.
- [2] 关 桥. 搅拌摩擦焊——未来的连接技术[C]//工程前沿——香山会议文集. 第一卷, 未来的制造科学与技术, 柳百成主编. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [3] 关 桥, 栾国红. 搅拌摩擦焊的现状与发展, 中国机械工程学会焊接学会, 第十一次全国焊接会议论文集(第一册): D15–D29.
- [4] 陈 舟, 周友龙, 田 博, 等. 6061 铝合金搅拌摩擦焊工艺[J]. 电焊机[J]. 2011, 41(11): 95–98.
- Chen Zhou, Zhou Youlong, Tian Bo, *et al.* Research on FSW of 6061 aluminum alloy[J]. Electric Welding Machine, 2011, 41(11): 95–98.
- [5] 李 亭. 2024 铝合金搅拌摩擦焊研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.
- [6] 邢 丽, 柯黎明, 周细应, 等. 防锈铝 LF6 的固态塑性连接工艺[J]. 中国有色金属学报. 2002, 12(6): 1162–1166.
- Xing Li, Ke Liming, Zhou Xiyang, *et al.* Solid-state plasticized joining for aluminum alloy LF6[J]. The Chinese Journal of Non-ferrous Metals, 2002, 12(6): 1162–1166.
- [7] Rajakumar S, Balasubramanian V. Establishing relationships between mechanical properties of aluminum alloys and optimized friction stir welding process parameters [J]. Materials and Design, 2012, 40: 17–35.
- [8] Pasquale C. Friction stir welding of Al alloy: analysis of processing parameters affecting mechanical behavior[J]. 2nd International Through-life Engineering Services Conference, 2013, 11: 139–144.
- [9] Balasubramanian V. Relationship between base metal properties and friction stir welding process parameters [J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 480(1–2): 397–403.
- [10] 李 杰, 宋仁国, 陈小明, 等. 固溶处理对 7050 高强铝合金显微组织和机械性能的影响[J]. 稀有金属, 2009, 33(4): 494–499.
- Li Jie, Song Renguo, Chen Xiaoming, *et al.* Effects of solid solution treatment on microstructure and mechanical properties of 7075 high strength aluminum alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2009, 33(4): 494–499.
- [11] Sunggon Lim, San Gshikkim, Sungjoon Kim. Tensile behavior of friction stir welded Al 6061-T651[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2004(35): 2829–2935.

**作者简介:** 潘 锐,男,1989 年出生,硕士研究生。主要从事搅拌摩擦焊技术研究。发表论文 3 篇。Email: nanhangpanrui@126.com

**通讯作者:** 王善林,男,副教授。Email: slwang70518@nchu.edu.cn