

激光焊接金刚石锯片的特征声信号反馈控制*

庄其仁 张文珍 陈为忠 杜旭日
(华侨大学电气工程与自动化系, 泉州, 362011)

摘要: 激光焊接金刚石锯片过程中形成的光致等离子体伴随着具有明显特征的声响, 这种特征声信号可看成是由频率为 16kHz 左右的等离子体声信号被一周期信号所调制, 周期信号的频率约为 300Hz。介绍了特征声信号的提取方法及其用于激光焊接金刚石锯片的反馈控制系统构成和基本原理。试验结果表明, 采用特征声信号反馈控制的激光焊接金刚石锯片在焊接缺陷方面优于无反馈控制激光焊接方法。

关键词: 金刚石锯片 激光焊接 特征声信号 反馈控制

Feedback control of laser welding diamond saw by acoustic signals

Zhuang Qiren, Zhang Wenzhen, Chen Weizhong, Du Xuri

(Department of Electrical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou, 362011)

Abstract: The distinctive acoustic signal emitted by plasma while laser welding diamond saw is regarded as a signal which is produced when a carrier wave with frequency of 16kHz is modulated with a periodical signal with frequency of 300Hz. A method to obtain the diagnostic signal, the acoustic feedback control system and the principle of laser welding diamond saw are described in the paper. Experimental results prove that in terms of welding qualities, acoustic feedback method is better than ordinary laser welding method.

Key words: diamond saw laser welding diagnostic acoustic signal feedback control

引 言

激光焊接使金刚石锯片的结合强度(尤其是高温强度)大大增加, 最近几年, 国内的研究一直不断^[1~3]。可以预见, 用激光焊接的金刚石锯片将取代传统的烧结法和钎焊法。但是, 要得到优质激光焊接金刚石锯片, 需要使用高稳定的基模激光器。在使用普通低阶模 CO₂ 激光器进行焊接时, 为提高金刚石锯片的激光焊接质量, 除在材料、工艺参数等方面的研究外, 同时采用声光反馈控制技术来弥补激光器模式和功率等不稳定因素的影响, 也是一种有效的方法。

1 特征声信号反馈控制原理

众所周知, 激光深熔焊(小孔效应焊)会产生光致等离子体。激光焊接金刚石锯片在出现小孔效应时, 工件表面的光辐射颜色由粉红色变为蓝色, 并伴有爆裂声, 此爆裂声可看成是由等离子体声信号频率(等离子体最强声信号频率为 16kHz 左右)被低频信号所调制的结果。频谱分析显示, 焊接碳钢时调制信号主频率约为 300Hz^[4]。这种特征调制声信号的产生是因等离子体对激光的吸收率与等离子体中的电子密度成正比, 在小孔内部及其周围, 随着等离子

* 福建省自然科学基金与国务院侨办科学基金资助。

体的形成,电子密度的提高相应提高了等离子体对激光的吸收率,一方面导致等离子体温度的提高,另一方面减少了工件对激光的吸收,导致金属的蒸发和电离减弱,反过来降低了等离子体密度和等离子体吸收率,这时,工件又能吸收较多的激光能量,金属再次强烈蒸发、电离,如此周而复始,就出现了等离子体密度的周期性变化,反映到声信号即为某一频率的调制信号谱。小孔深度越深,这种周期性变化越明显,声信号的特征线谱幅值越大。在均匀焊透时,小孔深度接近工件厚度,特征声信号强度大,而未焊透时,小孔深度浅或变为热传导焊,特征声信号就不明显。

在影响激光焊接深度的工艺参数中,激光功率、焊接速度和离焦量是主要参数。改变激光功率进行控制受到激光器最大输出功率的限制,改变离焦量进行控制受到测量系统和传动系统的精度限制,因我们研究的是小锯片焊接(基体厚度 1.2mm),所以,最容易实现反馈控制的参量是焊接速度,在一定的速度范围内,功率一定,焊接深度及宽度随焊速的加快而减小,呈现较好的线性关系^[2]。焊接速度由步进电机驱动,微机控制,反应速度快,可以实现无惯性运转。当稳定焊接时,等离子体特征声信号强度保持在一个固定的幅值(阈值)以上,焊接速度(光斑移动速度)不变;当声信号强度低于阈值时,微机控制步进电机以较慢的速度运转。系统原理图如图 1 所示。

2 试验方法及条件

2.1 焊接材料与工艺

基体材料用含 Mn 和 Cr 的高强度的特种

低合金钢,直径 $\phi 100\text{mm}$,厚 1.2mm;刀头胎体材料为青铜、钴和碳化钨等的混合颗粒经热压烧结而成,厚 2mm,宽 6mm,同时在刀头内侧待焊处设置 1mm 宽的过渡层,以提高焊接性能,过渡层加入少量 Ni 和 Cr。

刀头与基体在焊前均应除油、清洁、除水,以减少气孔的产生。刀头的磨弧也是很重要的环节,因热压成型的刀头边角有毛刺,会影响刀头与基体的吻合,使焊接质量大大降低,刀头与基体的配合间隙应在 0.1mm 以下。激光功率是决定焊接厚度的主要参数。功率太低,熔深浅,不能焊透;功率太高,熔池翻转,焊缝有波折和孔洞,并烧损过渡层的合金元素,热影响区晶粒粗大,使机械性能降低。试验采用上海雷欧厂生产的 2kW 横流 CO₂ 激光器,经腔内改造后

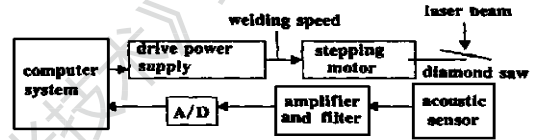


Fig. 1 Schematic diagram of the system

输出 680W 的激光功率(以基模为主的低阶模),对基体的焊接深度达到 0.95mm。当激光功率一定时,焊接速度成为影响焊缝强度的主要因素,焊接速度变化范围控制在 0.5m/min 到 1.3m/min 之间,平均焊接速度为

0.9m/min。其它工艺参数有主吹氩气保护气体流量为 1.3m³/h,激光束入射锯片的光轴角为 5°,聚焦光斑朝刀体偏移量 0.2mm。

2.2 信号取样与处理

实现反馈控制的关键是特征声信号的提取与判读。激光焊接金刚石锯片等离子体爆裂声声信号可由右式表示为: $s(t) = A \cos(2\pi f_1 t + \varphi) \cos(2\pi f_2 t + \psi) + n(t)$ 。式中, f_1 为声调制信号主频率(约为 300Hz), f_2 为等离子体声信号频率(载波频率 16kHz 左右), $n(t)$ 是其它频率的声信号,这里,把它们当成噪声信号,而将 $A \cos(2\pi f_1 t + \varphi) \cos(2\pi f_2 t + \psi)$ 项当成有用信号

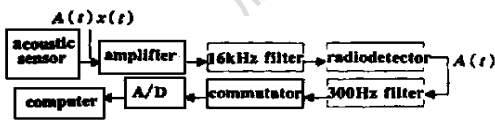


Fig. 2 Schematic diagram for obtaining the diagnostic acoustic signal

(特征声信号), 这种特征声信号的提取原理框图如图 2 所示。

等离子体声信号由声传感器变为电信号并放大后, 首先经过 16kHz 窄带滤波器, 去除其它频率声信号的干扰, 然后经过检波器得到调制信号, 调制信号经过 300Hz 窄带滤波器后再整流滤波, 最后获得特征声信号的强度相对值 $I(t)$, 经 A/D 转换后将数据送入计算机处理。

2.3 传递函数分析

控制系统的输入量选择焊接速度 $v(t)$, 输出量为等离子体特征声信号强度 $I(t)$ 。对象近似为一阶延时惯性环节。控制器选择实际微分 PID 控制, 其传递函数为:

$$1/[v(t)I(t)] = k_p[1 + 1/(T_{st}) + T_d t / (1 + T_d t / k_d)] \tag{1}$$

采用计算机完成 PID 控制算法, 控制器的数字化形式为:

$$\Delta[1/v(n)] = \Delta[1/v_p(n)] + \Delta[1/v_i(n)] + \Delta[1/v_d(n)] \tag{2}$$

若用步进电机转速控制脉冲计数器的计数值 N 表示, 则(2)式变为:

$$\Delta N(n) = \Delta N_p(n) + \Delta N_i(n) + N_d(n) \tag{3}$$

式中, $N_p(n) = k_p[I(n) - I(n-1)] + N_p(n-1)$, $N_i(n) = k_p T_0 (T_i)^{-1} I(n) + N_i(n-1)$, $N_d(n) = T_d [N_d(n-1) + k_p k_d I(n) - I(n-1)] / (k_d T_0 + T_d)$ 。对 PID 参数进行初值估计, 然后进行在线优化, 可得到 k_p, T_i, T_d, T_0 和 k_d 的 PID 优化参数。

3 结果分析

3.1 特征声信号强度与熔深的关系

试验采用激光在刀体上垂直扫描的方法, 激光焦斑在工件表面。不同的焊接深度是分别通过改变激光功率和改变焊接速度而得到的, 其它试验条

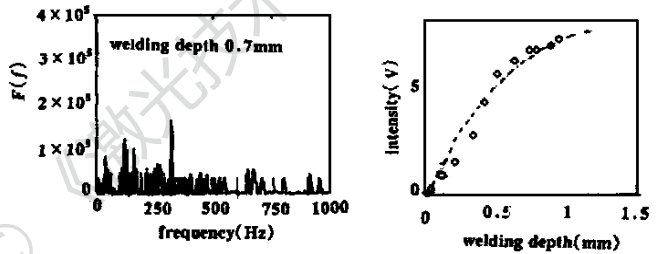


Fig. 3 The relationship between the intensity of diagnostic acoustic signal and the welding depth in different laser power

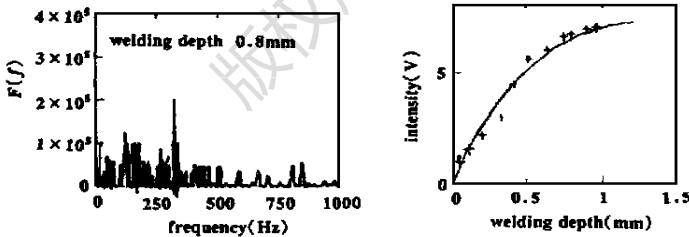


Fig. 4 The relationship between the intensity of diagnostic acoustic signal and the welding depth in different welding speed

关系曲线如图 4 所示。可见, 通过改变激光功率和通过改变焊接速度进行熔深控制得到的特征声信号强度与熔深关系曲线在熔深较浅时差别较大, 而在熔深大于 0.3mm 后基本一致。

3.2 完全穿透条件下的频谱及幅值

由于受激光器最大输出功率限制(680W), 对 1.2mm 厚的锯片基体无法完全穿透, 改用 0.75mm 厚的镀锌板, 其它条件不变, 得到的完全穿透焊频谱分布图见图 5, 与未完全穿

件如上面所述。通过改变激光功率(焊接速度 0.9m/min)而改变熔深时, 得到的特征声信号频谱和特征声信号强度与熔深关系曲线如图 3 所示。通过改变焊接速度(激光功率 680W)而改变熔深时, 得到的特征声信号频谱和特征声信号强度与熔深

透焊相比,完全穿透焊的特征谱线更明显(在 300Hz 处),幅度大,且较稳定。值得注意的是,因为材质不一样,等离子体行为不一样,所以,特征谱线的位置也有变化,镀锌板在 300Hz 左右的谱线位置朝低频方向偏移(比较图 3、图 4、图 5),因此,对于不同材料的焊接,图 2 中的滤波器要做相应的调整。

3.3 焊缝截面形貌分析

图 6a 和图 6b 是焊接速度固定不变(0.9m/min)和通过特征声信号反馈控制的激光双面焊接金刚石锯片的一组随机抽样焊缝截面形貌比较(工艺参数见 2.2 节),从图中可看出,没有反馈控制的焊缝存在一定的内部缺陷(虚焊),而通过反馈控制的焊缝没有虚焊现象,抗弯检验时,焊缝平均弯曲强度后者优于前者。

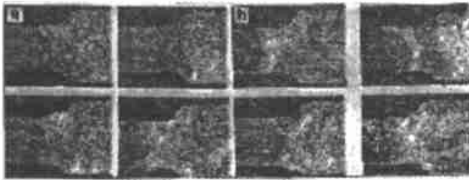


Fig. 6 Cross section of weld bead

a- ordinary laser welding b- feedback laser welding

金刚石锯片出现未焊透的原因是多方面的:基体材料和刀头材料的表面形状和内部结构不均匀、激光器输出功率变化、聚焦透镜的热效应引起焦距变化、等离子体对激光的吸收影响等都可能使焊缝出现未焊透现象。如果只靠降低焊接速度,虽然可以增加焊接深度,减少虚焊现象,但这将导致生产率降低、热影响区因晶粒粗大而脆断,工件变形也大。采用反馈控制焊接速度,就只在出现未达到焊接深度时才降低速度,而大多数时间是以正常速度匀速焊接的,这就是本控制系统的目的,所以,焊缝形貌在一般情况下两者没有多大差别,只在出现虚焊的个别区域有明显差别。

4 结 论

试验结果表明,采用特征声信号反馈控制的激光焊接金刚石锯片在焊接缺陷方面优于常规激光焊接方法,主要表现在没有未焊透的缺陷,提高了成品率。由于激光焊接金刚石锯片是居于小孔效应,当没有小孔形成时,等离子体密度不集中,周期性变化不明显,使得声调制信号的幅度和周期性不明显,只有在小孔达到一定深度后,检测到的特征声信号强度才能达到预先确定的阈值,所以,反馈控制后焊接深度比较稳定。另外,特征声信号的调制频率与材料及其它工艺参数有关,需在实验中确定。

参 考 文 献

- 1 朱海红,唐霞辉,朱国富,激光技术,1998;22(5):273~275
- 2 史小强,李力均,中国激光,1999;A26(4):379~383
- 3 夏锦华,殷声,叶宏煜 *et al.* 激光技术,1999;23(4):248~251
- 4 骆红,胡伦骥,胡席远 *et al.* 中国激光,1998;A25(6):570~572

作者简介:庄其仁,男,1960年出生。副研究员。现主要从事激光应用技术研究。

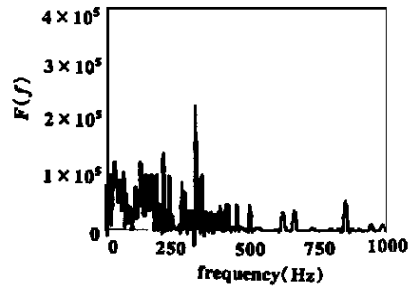


Fig. 5 Spectra of acoustic emission in full penetration