

钛合金激光焊接过程中等离子体光信号的检测与分析

王春明, 胡伦骥, 胡席远, 杜汉斌

(华中科技大学 材料科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 通过试验的方法探讨了钛合金激光焊接过程中的等离子体光信号与焊接质量的关系, 结果分析表明, 钛合金的激光焊接过程比低碳钢产生更强烈的等离子体云, 等离子体光信号可以较好地反映焊接过程的稳定性和焊接质量的变化。焊接质量良好时, 等离子体光信号幅值在某一固定值上下波动, 当改变焊接参数使焊接熔深或熔宽改变时, 信号的平均幅值亦有明显改变; 当较大间隙或错边存在时, 等离子体光信号的平均值明显降低, 但两种信号的特征不尽相同, 前者造成等离子体光信号剧烈动荡而均值很低, 而后者一定范围内, 随着错边量增加, 信号幅值逐渐减小。上述试验结果表明, 可以用等离子体光信号的幅值高低和波动大小作为焊接质量实时监测和控制的特征信号。

关键词: 钛合金; 激光焊接; 等离子体; 质量监测与控制

中图分类号: TG402 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2004)01-83-05



王春明

0 序 言

钛金属由于强度高、比重小(还不到钢的一半), 同时又具有良好的抗腐蚀性、热强性及低温韧性, 因而不仅被广泛地应用于航空航天等军用领域, 近年来由于其生产成本下降, 在民用领域也得到了广泛应用。通常情况下, 钛及其合金具有良好的焊接性能, 钨极氩弧焊和熔化极气体保护焊是焊接钛合金最常用的焊接工艺, 但是在指标要求严格的场合(军工产品和武器装备), 飞溅和接头成形以及变形就成为限制其应用的重要因素。激光焊接具有能量集中、焊缝成形好、焊件变形小、操作简单、生产效率高优势, 非常适合焊接各种厚度的钛合金材料, 必将成为钛合金焊接的主导方向^[1]。由于钛合金一般用于重要的场合, 对其焊接质量的严格检测与控制非常重要。作者探讨了一种实时监测和控制激光焊接钛合金质量的方法及其所取得的试验成果。

1 监测方案

理论分析及试验研究表明, 钛板激光深熔焊过程中存在着等离子体, 激光诱导的等离子体对激光深熔焊过程中小孔的形成、能量以及物质的传递起到至关重要的作用, 且等离子体光强与被焊物质蒸

发量、等离子体温度和长度有关, 光强的变化可以很好地反映激光焊接过程中等离子体状态的波动, 进而反映激光焊接质量。因此, 采集钛板激光焊接过程中等离子体的特征光信号作为其质量监测的被检测参量。整个监测系统(见图 1)主要由三部分组成: (1)信号拾取装置。信号拾取装置用于装夹定位传感器, 要求精确灵活, 确保传感器采集到施焊过程中的等离子体光信号。(2)信号调理电路。模拟信号处理电路主要起两方面的作用, 一是把微弱的传感器信号放大到合适的程度以利于计算机采集, 二是滤除前端高频干扰和噪音。(3)信号采集与分析软件。激光焊接速度快, 焊接过程产生的等离子体更是一个高速震荡过程, 因此, 采用采样频率高达 300 kHz 的数据采集卡对等离子体光信号进行高速采集, 并在信号采集的同时进行数据的实时分析。

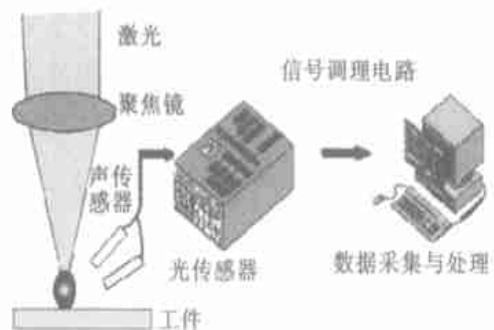


图 1 监测系统简图

Fig. 1 Laser welding monitoring system

2 试验条件与方法

试验所采用的设备与材料有激光器: PRC STS 2000(快轴流连续), 光束模式: TEM₀₀+TEM₀₁, 钛板型号: BT20, 钛板厚度: 1.8 mm, 2.5 mm.

钛板激光焊接的质量不仅受工艺参数(如激光功率、焊接速度等)的影响, 同时还与焊前拼缝间隙、错边等装配定位精度密切相关。因此, 除了进行了零间隙、无错边情况下的不同工艺参数的试验外, 还进行了在一定错边或间隙情况下的焊接试验, 并对实时采集了上述试验条件下的等离子体光声信号进行分析。不仅如此, 为了比较钛板激光焊接与普通钢板的异同, 还进行了相同厚度的钛板和低碳钢板在相同工艺参数下的堆焊试验, 并对采集到的信号进行了比较分析。

3 试验结果及分析

3.1 钛板与低碳钢板激光焊接的比较

前期使用同一检测设备已做过大量钢板激光焊接的实时监测试验, 一方面为了检测该监测系统某些参数设置(如放大倍数)对钛板是否合适, 另一方面为了比较钛板与钢板激光焊接的信号之异同, 首先进行了钛板和钢板的激光堆焊试验。试验中采用相同的工艺参数(激光功率、焊接速度、离焦量等)对等厚度的钛板和低碳钢板进行堆焊试验, 并采集焊接过程中等离子体光声信号进行比较。试验参数为激光功率 1 800 W, 焊接速度 1.10 m/min., 板厚 1.8 mm。低碳钢板以及钛板的等离子体光信号曲线分别如图 2 和图 3 所示。

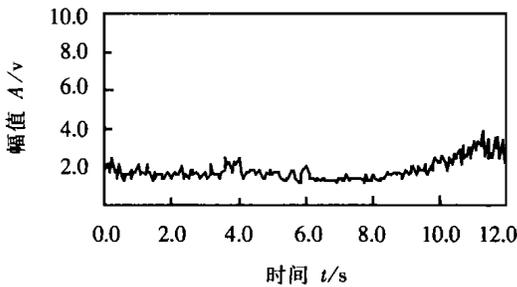


图 2 低碳钢板激光焊接等离子体光信号

Fig. 2 Plasma optic signal of mild steel welding

从图 2、3 可以看出, 相同的工艺参数焊接 1.8 mm 厚的钛板和低碳钢板, 钛板焊接过程中的等离子体光信号的幅值比低碳钢板强得多, 不仅如此, 信号的波动程度也比低碳钢板剧烈。在激光深熔焊过程中, 等离子体光信号强度与金属蒸发量和等离子体长度成正比, 并随等离子体温度的增加而增强^[2]。因此, 上述现象表明相同条件下, 钛的

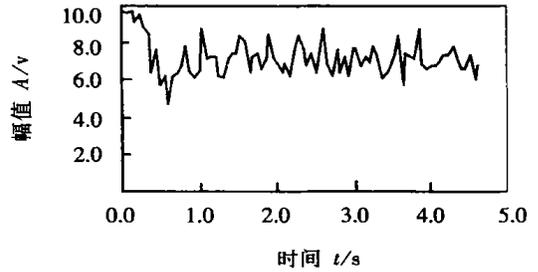


图 3 钛板激光焊接等离子体光信号

Fig. 3 Plasma optic signal of titanium welding

激光焊接过程中产生的等离子体比低碳钢更强烈、更加剧烈振荡, 其激光焊接过程比低碳钢更容易产生等离子体。

钛合金和钢两种材料的某些物理性质对比如表 1 所示。

表 1 钛和铁的物理性能比较

Table 1 Some physical performances of Ti & Fe

	热传导系数 $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^\circ)$	电离能 E / eV	对 10.6 μm 激光 的吸收系数
Ti	22	6.83	0.08
Fe	49.8	7.83	0.035

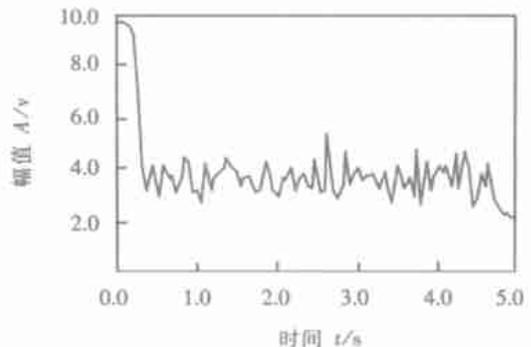
从表中可以看出, 钛合金对激光的吸收率高于钢铁材料, 其热传导系数较低, 因此钛板在焊接过程中对激光能量的利用效率更高, 而激光焊接中的等离子体主要是由被焊金属蒸汽电离而成, 钛又是一种比铁更活泼的金属, 电离能更低, 其蒸汽更容易被电离而形成等离子体。钛、铁材料本质上的差别决定了相同焊接条件下两种材料等离子体光信号的不同。

3.2 正常焊接情况下等离子体光信号

正常对接焊缝及信号如图 4 所示。从图 4 可看出, 光信号在焊缝起始部分具有很高的峰值, 其持续



(a) 正常焊缝



(b) 等离子体光信号

图 4 正常对接焊缝及其等离子体光信号

Fig. 4 Normal butt weld and its plasma optic signal

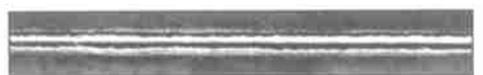
($h=2.5 \text{ mm}$, $P=1600 \text{ W}$, $v=1.13 \text{ m/min}$)

时间约 0.25 s, 在结束部分幅值又突然降低, 其持续时间约为 0.3 s, 焊缝中间部分的信号幅值在 3.9 v 左右浮动。对整条焊缝进行观察, 可以发现其起始部分有约 5 mm 左右的明显堆高, 而在结束部分有约 5 mm 的明显下凹, 中间部分的焊接熔深熔宽均匀一致。因此看出, 焊接过程稳定质量良好时, 等离子体信号光强度在某一固定值上下波动, 当焊缝熔深或熔宽等发生变化时, 信号幅值亦会发生相应变化, 即信号的变化特征与焊缝质量的变化具有良好的对应关系。

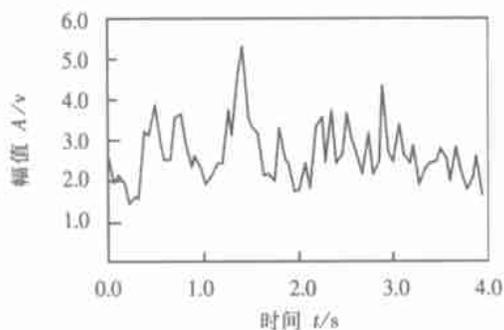
在钛板的激光焊接过程中, 由于钛合金的表面张力梯度与热传导能力等因素的相互作用, 起始段的堆高和结束段的下凹较其它板材尤为明显, 一般可长达 5 mm, 而等离子体光信号可以准确地实时监测上述现象, 对于进一步采取某种措施实施控制具有重要意义。

3.3 零间隙、无错边情况下改变焊接速度对接试验

在保持激光功率 ($P = 1\ 600\ \text{W}$, 板厚 $h = 2.5\ \text{mm}$) 等条件不变的情况下, 用两种焊接速度对相同规格的两组钛板试样进行拼焊试验。选取整条焊缝的中间稳定段以及对应的等离子体光信号进行比较 (信号及焊缝如图 5、6 所示)。可以明显看出, 当焊接速度从 1.13 m/min 降低到 0.53 m/min 时, 焊缝宽度明显加大, 从 2.5 mm 增大到 4.0 mm, 焊缝的正反面有更明显的堆高; 同时, 采集到的等离子体光信号强度也明显增强, 其平均幅值从 2.97 v 增强到 5.81 v。



(a) 焊速为 1.13 m/min 时的焊缝



(b) 焊速为 1.13 m/min 时的等离子体光信号

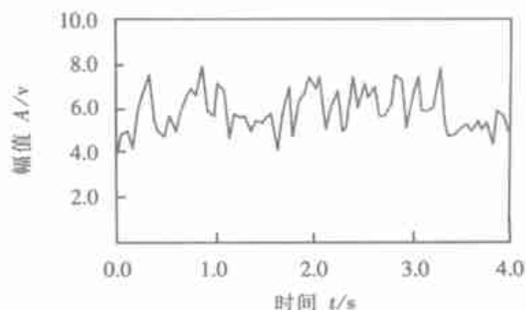
图 5 $v = 1.13\ \text{m/min}$ 时焊缝及其信号

Fig. 5 Butt weld and its signal at $v = 1.13\ \text{m/min}$

上述现象表明, 在激光深熔焊能够稳定进行的前提下, 降低焊接速度, 加大线能量输入, 熔化的金属增多, 不仅使焊缝变宽熔深加大, 同时使金属的蒸发量增多产生更强烈的等离子体, 因而采集到的



(a) 焊速为 0.53 m/min 时的焊缝



(b) 焊速为 0.53 m/min 时的等离子体光信号

图 6 $v = 0.53\ \text{m/min}$ 时焊缝及其信号

Fig. 6 Butt weld and its signal at $v = 0.53\ \text{m/min}$

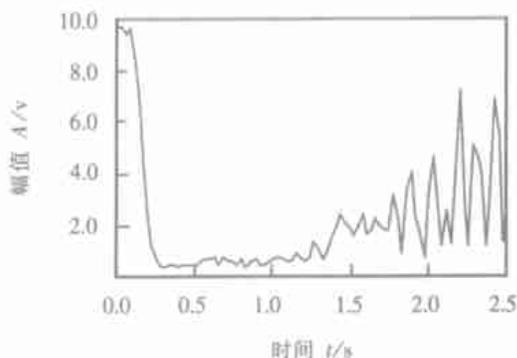
等离子体光信号幅值变高。反过来, 即等离子体光信号幅值的变化能够反应出焊缝熔深或熔宽的变化。

3.4 存在一定间隙的对接试验

如图 7a 所示的焊缝是在焊前存在间隙情况下完成的, 最大间隙量约 0.1 mm, 并且整条焊缝的间隙量并不一致, 起始段稍小一些, 得到了约 8 mm 长的较好焊缝, 等离子体光信号很强; 其后约 40 mm 间隙量稍大, 得到了均匀的密布小孔洞的焊缝, 等离子体光信号很低, 但很均匀; 最后 50 mm 长由于间隙量过大, 并且光束与焊缝不对中, 结果得到了在拼板一边极不均匀的堆焊点, 大部分焊缝并未熔合, 此时等离子体光信号剧烈动荡, 在堆焊点处等离子体光信号很强, 未熔合处激光漏空, 焊接过程不能进行, 光强迅速骤降。该条焊缝对应的等离子体光信号如图 7b 所示。



(a) 焊前存在间隙时的焊缝



(b) 焊前存在间隙时的等离子体光信号

图 7 焊前存在间隙焊缝及其等离子体光信号

Fig. 7 Butt weld and its signal when gap existed before welding

装配间隙的存在一般使得焊接过程不能连续稳定的进行下去,焊缝不能完全熔合,焊缝中存在孔洞,因而造成激光致等离子体云也时断时续,并且等离子体光信号剧烈动荡而均值很低。

3.5 存在错边的对接试验

图 8a 所示焊缝起始部分板边对接良好,在结尾部分存在错边,错边量约 0.2 mm,其焊缝对应的信号如图 8b 所示。

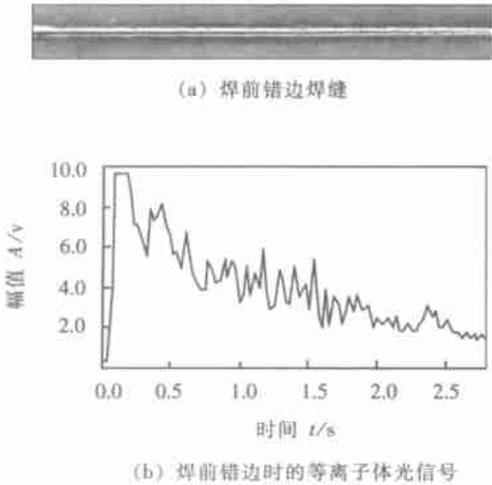


图 8 焊前存在错边焊缝及其等离子体光信号

Fig. 8 Butt weld and its signal when mismatch existed before welding

($h=1.8\text{ mm}$, $P=1\ 600\text{ W}$, $v=2.13\text{ m/min}$)

从图 8 可以看出,随着整条焊缝从前到后错边量逐渐增大,焊缝熔宽逐渐变小,等离子体光信号强度也逐渐降低。

错边存在的焊缝不能完全熔透或熔深变窄,但深熔焊过程一般能够持续进行,等离子体弧能够稳定燃烧。一定范围内,随着错边量增加,焊缝的一边或两边的离焦量发生较大的变化,相当于激光被部分散焦,造成作用于工件的激光能量密度降低,小孔的穿透能力减弱,金属的蒸发量减少,因而等离子体强度和体积减小,光信号幅值降低。

3.6 钛板激光焊接质量实时监控的可行性

从上文的试验数据及其分析可以看出,在各种焊接参数和装配条件保持稳定且焊接过程不受外部干扰的情况下,激光焊接的熔深、熔宽等焊缝参数保持不变,其等离子体光信号强度亦在某一稳定幅值上进行小幅度的波动,当外部条件发生变化引起焊接质量发生变化时,等离子体光信号幅值大小或波动范围也有明显的改变。

焊接过程稳定,焊缝质量正常时有

$$|\Delta A(t)| = |A(t) - A_s(t)| \leq \Delta A_s(t) \delta(t) \leq \hat{\delta}(t)$$

焊接过程失稳,焊缝质量有所改变时有

$$|\Delta A(t)| = |A(t) - A_s(t)| > \Delta A_s(t) \delta(t) > \hat{\delta}(t)$$

式中: $A(t)$ 和 $\delta(t)$ 分别为某一时刻该时间段内的光信号强度和均方差; $A_s(t)$ 和 $\hat{\delta}(t)$ 为与正常焊接过程等离子体光信号强度和均方差的设定值; $\Delta A_s(t)$ 为与该焊接过程相关的等离子体光信号强度幅值和均方差正常波动范围的设定值。

虽然 $A_s(t)$ 、 $\hat{\delta}(t)$ 、 $\Delta A_s(t)$ 都与焊接参数、装配精度等条件密切相关,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、焦点位置及保护气体等都确定,这些参量是可以确定的。通过实时比较分析等离子体光信号的幅值和方差是否落在预设范围之内,可以实时监测焊接过程是否稳定、焊缝质量是否发生了改变。当信号超出了预设范围时可通过调整焊接线能量或离焦量对焊接质量进行控制。

正常焊缝的信号范围可通过一组良好焊缝的信号进行训练而得到。图 9 所示为焊接 2.5 mm 厚钛板时正常焊缝的信号及其波动范围。当改变焊接条件时,焊缝的质量发生了变化的同时,信号也落在了正常范围之外。图 10 为预留了 0.1 mm 装配间隙的焊缝信号。图 11 为降低了焊接速度的焊缝信号。

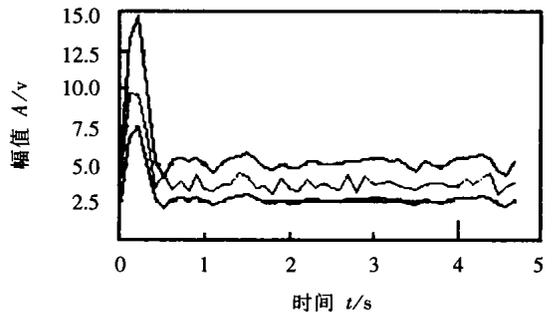


图 9 正常焊缝的信号及其波动范围

Fig. 9 Normal weld signal and fluctuation limits ($P=1\ 800\text{ W}$, $v=1.13\text{ m/min}$)

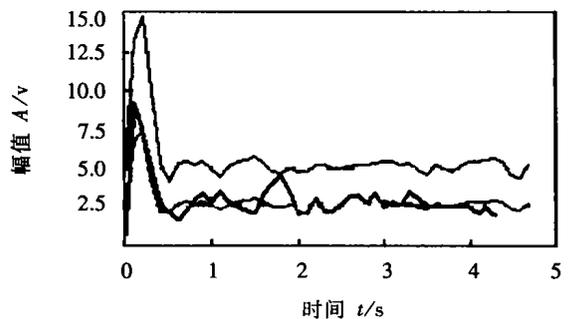


图 10 预留 0.1 mm 间隙焊缝的信号

Fig. 10 Signal of weld when 0.1 mm gap existed before welding

($P=1\ 800\text{ W}$, $v=1.13\text{ m/min}$)

从图 9、10、11 可以看出,等离子体光信号的幅

[下转第 90 页]

可以看出, 变换尺度对于最后的处理结果有很大影响。随着 j 的增加, 飞溅等噪声干扰被有效抑制, 熔池边缘越来越清晰, 但是位于熔池右下方的焊缝位置也越来越模糊。当 $j=3$ 时基本检测不出焊缝。因为弧光的干扰, 熔池边缘的闭合性受到较大的影响, 在焊接过程中表现更明显, 这个问题有待进一步探讨。在图 4b 中, 还存在伪边缘的现象, 如 $j=3$ 时, 图像下方焊缝位置旁边的边缘为弧光干扰形成的伪边缘, 需要进一步处理。对检测出的边缘点连线时的闭合性需要改进。此外, 焊缝和熔池边缘属于不同类型边缘, 如何在一幅图中进行协调处理, 也需要进一步加以研究。

5 结 论

(1) 基于 CO_2 焊图像灰度值的分布特征, 选择了相应的中值滤波和乘法运算进行预处理, 预处理的效果好坏对随后的边缘检测有较大影响。

(2) 构造 Bubble 小波算子, 利用零交叉边缘检测方法, 较好地检测出熔池边缘和焊缝位置。

(3) 对不同尺度下 Bubble 小波的边缘检测结果

果进行比较研究, 初步探讨了其对焊缝和熔池边缘检测的作用和影响。

参考文献:

- [1] Mallat S. Zero-crossings of a wavelet transform [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1991, 37(4): 1019~1033.
- [2] Zeev Berman, John S. Properties of the multiscale maxima and zero-crossings representations [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1993, 41(12): 3216~3231.
- [3] Mallat S, Hwang WL. Singularity detection and processing with wavelets [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1992, 38(2): 617~643.
- [4] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [5] 贾天旭, 郑南宁. 基于 Bubble 小波的多尺度边缘提取 [J]. 电子学报, 1996, 24(4): 117~121.
- [6] 袁 晓, 虞厥邦. 基于 Bubble 函数的子波构造 [J]. 信号处理, 1999, 15(1): 37~41.

作者简介: 薛家祥, 男, 1962 年 10 月出生, 工学博士, 副教授。主要从事弧焊过程小波分析、神经网络模糊控制及新型弧焊逆变器的研究, 发表论文 58 篇。

Email: mejiaxue@scut.edu.cn

[上接第 86 页]

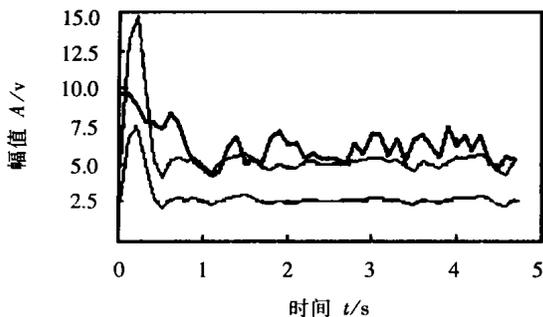


图 11 焊接速度降低焊缝的信号

Fig. 11 Lower speed weld signal

($P=1\ 600\ \text{W}$, $v=0.53\ \text{m/min}$)

值可以用来实时监测焊接质量, 当焊接过程发生变化时, 信号将超出正常的波动范围, 采取一定的控制策略调整激光功率、焊接速度或离焦量等参数保证信号在正常的波动范围内, 从而实现焊接质量的控制。

4 结 论

(1) 钛合金激光焊接过程中产生等离子体光信号能够较好地反映焊接过程的稳定性和焊接质量的变化。

(2) 相同条件下, 钛合金激光焊接比低碳钢产生更强烈的等离子体

(3) 焊接质量良好时, 等离子体光信号强度在某一固定值上下波动, 当改变焊接参数使焊接熔深熔宽改变时, 其光强的平均幅值亦有明显改变。

(4) 当较大间隙或错边存在时, 等离子体光信号的平均值明显降低, 两种装配缺陷对焊接质量影响不同, 其等离子体光信号的特征也不尽相同。前者造成等离子体光信号剧烈动荡而均值很低; 而后者一定范围内, 随着错边量增加, 采集到的等离子体光信号强度降低。

(5) 初步的试验表明, 可以用等离子体光信号的幅值高低和波动大小作为焊接质量实时监测和控制的特征信号。

参考文献:

- [1] 王家淳. 消除钛合金激光焊接的隐患 [J]. 焊接技术, 2001, 30(1): 16~17.
- [2] 骆 红. 薄板激光焊接过程中焊接缺陷的诊断原理和技术 [D]. 武汉: 华中理工大学, 1998.

作者简介: 王春明, 男, 1975 年 2 月出生, 讲师, 博士研究生。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 6 篇。

Email: cmwang@public.wh.hb.cn