

焊接电弧发射光谱的动态诊断方法及其应用

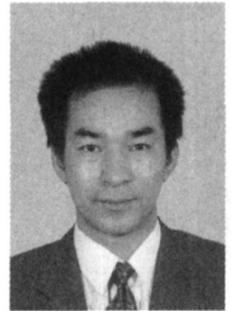
胡坤平, 宋永伦, 夏 源, 陈志翔

(北京工业大学 机电学院, 北京 100022)

摘 要: 建立了新型的电弧光谱动态诊断系统, 提出了基于时控—统计平均方案的动态诊断方法, 实现了对电弧光谱连续的动态诊断. 结果表明, 应用这一新型诊断系统, 可以观测交流电弧特征谱线半高宽变化量和中心波长位移量两个重要特征量的动态变化规律, 进而可认识交流电弧电子数密度和氩原子激发温度的动态变化, 这对于研究电弧(特别是交流电弧)热力学状态的时间特征具有重要的意义; 另外, 这一诊断方法拓展了以往电弧发射光谱诊断方法的应用范围, 在焊接电弧物理研究中将有着良好的应用前景.

关键词: 交流动态电弧; 光谱; 动态诊断; 时控—统计平均方法

中图分类号: TG115.28 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2009)01-0047-04



胡坤平

0 序 言

以往焊接电弧热力学状态参数观测与研究对象大多是直流稳态 TIG 焊电弧, 并在局部热力学平衡条件(LTE)的前提下, 应用经典热力学状态方程, 观测焊接电弧的发射光谱并求解电弧等离子体的热力学状态参数, 但是对于各类交流动态电弧观测和参数诊断方面的研究都相当缺乏^[1,2].

为了实现对交流动态电弧的观测和参数诊断, 文中基于增强型 CCD 光谱仪, 设计了相关接口控制电路和弧光采集装置, 建立了一套新型的交流动态电弧发射光谱的观测系统, 并提出了可以精确控制交流电弧光谱信息采样时刻的统计平均方法, 实现了对各类交流电弧动态过程的连续诊断, 特别是对方波交流 TIG 焊电弧过零过程中氩特征谱线中心波长的位移效应和氢特征谱线轮廓的展宽效应进行了连续观测, 成功地诊断了交流电弧中的原子激发温度、电子数密度等热力学状态参数.

1 诊断系统与方法的建立

1.1 诊断系统的建立

焊接电弧发射光谱诊断系统主要是基于增强型 CCD 光谱仪建立的. 整个电弧物理试验系统由弧焊

电源、光谱仪(配备 ICCD 摄像机、控制器)、双透镜光学装置、电参数采集装置、电弧同步触发器、测试过程监测装置、数据处理系统(工作站)等组成(图 1). 电弧电源为 Miller Aerospace 350 多功能弧焊电源, 可得到工频交流、直流脉冲、交流方波和直流等多种波形的焊接电流; 光谱仪为普林斯顿 ACTON Spectrapro 2750i 型光谱仪及其配套设备, 可对电弧进行静态和动态的谱线拍摄, 特别是其出色的动态谱线捕捉功能, 可以对极短时间内的(实用上可达微秒级)的瞬态信号进行捕捉, 大大有利于电弧动态过程(例如交流电弧过零过程)的信号捕捉; 双透镜光学系统可使弧光均匀、稳定地进入光谱仪狭缝, 有利于数据观测的稳定性; 电弧同步触发器协调诊断系统各部分同步工作; 数据分析、处理系统选用了 DELLWHL 型工作站, 配合专业数据处理软件和自行

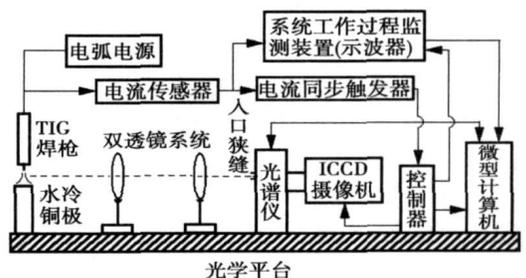


图 1 焊接电弧发射光谱诊断系统

Fig. 1 Welding arc emissive spectrum observation system

开发的谱线分析程序,对所测得的数据进行分析处理.

以上主要装置,再加上其它相关器件,如焊枪、铜极及其水冷装置、光阑及其它相关光学器件等,就组成了本诊断系统.

1.2 基于时控一统计平均的动态诊断方法

系统所采用的光谱仪可以捕捉到微秒级时间长度的光谱信号,即每次采样中,所抓取的光谱信号可表征微秒级时间长度内的电弧物理状态信息,所以该光谱仪具有极高的时间分辨率,这对于观测电弧的动态过程是非常有利的.但是由于系统数据处理、传输等因素的影响,光谱仪连续拍摄的速度受到很大限制,导致连续拍摄的时间间隔较大(约 60 ms).所以,该光谱仪不能直接用于动态电弧的连续诊断.为了对交流电弧光谱进行连续的动态诊断,必须对光谱仪的拍摄时序采取特殊的控制方法.

图 2 给出了 4 个完整的工频交流 TIG 焊电弧工作周期.假设对电弧的观测从第一个周期 T_1 开始,连续拍摄 N 个交流电弧周期,每个周期只拍摄一次,则获得 N 张光谱.交流电弧周期设为 T ,拍摄延时步长 δ 设为 $T/(N-1)$, t_0 为电流过零同步电路的固有延时(常数).第 1 张光谱的拍摄时间在 t_0 (T_1 周期内);第 2 张光谱的拍摄时间在 $T+t_0+\delta$ (T_2 周期内);第 3 张光谱的拍摄时间在 $2T+t_0+2\delta$ (T_3 周期内);以此类推,拍摄第 n 张光谱的时间为 $(n-1)T+t_0+(n-1)\delta$ 处, $1\leq n\leq N$.拍摄时刻如图 2 中箭头所示.根据这一时序控制,当拍摄到第 n 张光谱时,其拍摄时间在 $(n-1)T+t_0+(n-1)\delta$ (在第 n 个周期内).然后将上面获得的 N 张光谱按拍摄得时间顺序排列起来,正好得到一个完整交流周期的光谱信息.显然,拍摄的张数越多,即 N 值越大,拍摄延时步长 δ 越小,所组合起来的谱线排列越密,越能完整地反映一个交流周期的光

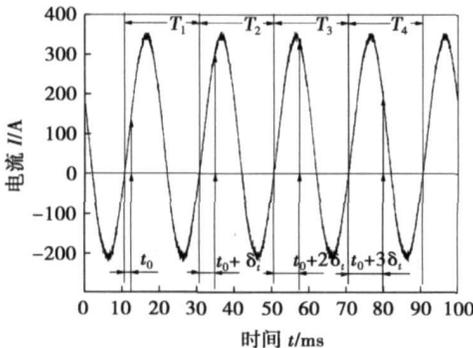


图 2 交流电弧动态测试的时序控制示意图

Fig. 2 Diagram of time-control method applied to AC dynamic arc observation

谱信息,但是 N 越大,拍摄时间也越长,因此, N 的取值要适当.另外,需要注意的是图中的延迟 t_0 是由交流电弧过零同步电路的固有延迟决定的,这一延迟时间的测定及其影响在后面专门讨论.显然,上述拍摄时序控制方法要求交流电弧信号要有严格的周期性.通过示波器的观察(图 2 中的电流波形即为实际的工频正弦交流电弧波形),在试验中,交流电弧的周期稳定,满足这一要求.

为了提高该试验方法的可靠性,还需对上述时序控制方法做进一步的改进.改进方法如下:从第一个交流周期 T_1 开始连续拍摄 M 个周期,拍摄时刻都在每个周期的 t_0 处, M 次拍摄结果的平均值,作为第一次的拍摄结果;然后从 $M+1$ 个周期开始又连续拍摄 M 个周期,每次拍摄的时刻都在相应电弧工作周期的 $t_0+\delta$ 处, M 次拍摄结果的平均值,作为第 2 次的拍摄结果;以此类推,从 $(n-1)M+1$ 个周期开始在每个周期的 $t_0+(n-1)\delta$ 处连续拍摄 M 次的平均值作为第 n 次拍摄的结果, $1\leq n\leq N$;与上面的方法一样,将 N 次拍摄的平均结果按拍摄时间地顺序排列起来即可得到一个完整交流周期的光谱信息.显然, M 值取得越大,获得的数据统计意义越明显,但是拍摄的时间也越长,因此, M 值也应适当选取.试验证明,采用上述改进后时控一统计平均方法,可大大减少测试数据的分散性,提高了测试结果的可重复性.图 3 为采用以上方法获得的结果.

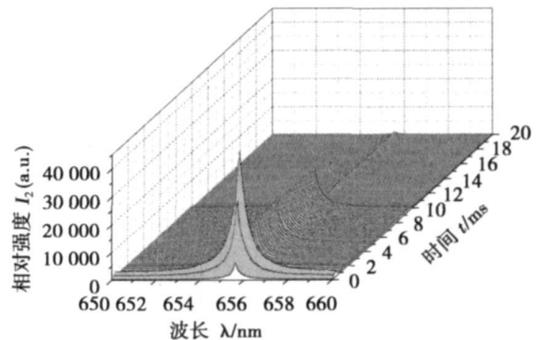


图 3 采用时控一统计平均方法观测直流脉冲电弧

Fig. 3 Result of time-control & statistic-average method applied to DC pulse arc observation

1.3 过零触发电路的硬件延迟及其影响

在上述基于时控一统计平均的动态诊断方法中,确定谱线拍摄时刻的时间基准是至关重要的.为此,采用滞回比较电路设计了电流过零触发器,该过零触发器在交流电弧过零时刻输出触发脉冲给光

谱拍摄控制器, 再由该控制器根据事先设定的时控一统计平均方案控制光谱的拍摄. 显然, 过零触发器的转换速度影响其过零触发输出的延迟, 对其进行精确的测定具有重要意义. 对于交流 TIG 电弧 (图 4), 测得过零触发信号的相对于电流过零的延迟为 $10 \mu\text{s}$, 经多次测定, 这一硬件延迟为一恒定值, 因此在谱线拍摄的时间控制中可以予以补偿, 消除过零触发电路的硬件延迟给时间控制带来的误差, 从而确保谱线拍摄控制的时间基准的准确性.

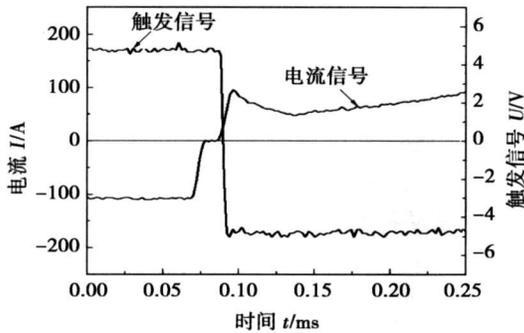


图 4 过零触发器硬件延迟的测定

Fig. 4 Check on hardware delay of current cross-zero trigger circuit

2 应用实例

2.1 观测交流电弧过零前后 Ar 原子激发温度

2.1.1 交流电弧过零中心波长位移量的变化

应用文中所建立的电弧光谱动态诊断系统, 可以观测到交流电弧氩特征谱线中心波长位移量的时间变化, 特别是其过零过程中的变化. 例如对 $100 \text{ A} / 50 \text{ Hz}$ 方波交流电弧进行观测, 分别测得电弧氩特征谱线 ArI 425.936 nm 在过零前 (EN)、过零时段 (即电流反相切换时段, 这一时段定为 $35 \mu\text{s}$)、过零后 (EP) 其中心波长位移量的平均值 (图 5).

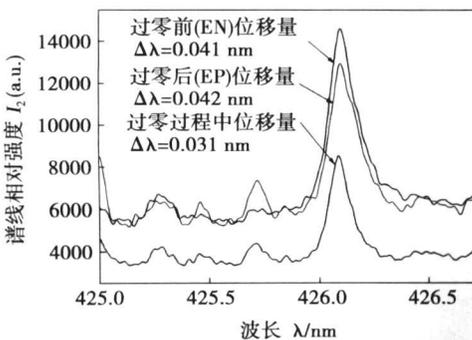


图 5 交流电弧 ArI 425.936 nm 位移量的变化

Fig. 5 ArI 425.936 nm in AC arc

2.1.2 交流电弧过零氩原子激发温度的观测

Griem 理论基于量子力学碰撞近似模型, 可以计算某些重元素 (如 Ar) 的电子碰撞增宽 w ($1/2$ 半宽度) 和位移 d , 用准静态的近似计算了由离子引起的增宽和位移, 其结论为

$$W \approx [1 + 1.75\alpha(1 - 0.75R)] w$$

$$D \approx [d/D \pm 2.00\alpha(1 - 0.75R)] w$$

式中: W 为重元素孤立谱线总宽度; D 为谱线总位移量; R 为德拜屏蔽参数; α 为离子增宽参数^[3].

根据 Griem 理论, 氩原子谱线位移量在 16000 K 以下区域是温度比较灵敏的函数, 但当谱线位移量小于 0.001 nm 时, 受到光谱观测分辨率的限制, 再测量存在困难, 所以谱线位移法只适合测量 $9000 \sim 16000 \text{ K}$ 温度范围, 而在文中焊接电弧的实际观测中, 氩谱线中心波长位移量动态变化通常在 $0.01 \sim 0.05 \text{ nm}$ 之间, 因此谱线位移法适合于焊接电弧的温度观测. 基于上述相关理论, 根据图 5 氩特征谱线观测数据, 测算出交流方波电弧过零前后及过零时段的氩原子激发温度 (表 1).

表 1 各时段氩原子激发温度

Table 1 Ar atom excitation temperature

时段	ArI 425.9 nm 位移量 $\Delta\lambda / \text{nm}$	氩原子激发温度 $T_{\text{exc}} / \text{K}$
过零前 (EN)	0.041	10 500
过零时段	0.031	9 500
过零后 (EP)	0.042	10 550

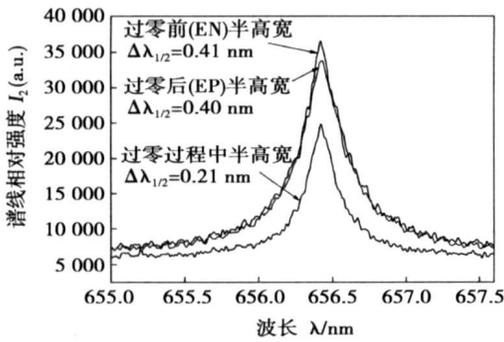
2.2 观测交流电弧过零前后电子数密度

2.2.1 交流电弧过零 H α 半高宽度的变化

作为文中电弧光谱动态诊断系统的另一典型应用, 对交流电弧过零 H α 线半高宽的变化进行了观测. 为便于观测, 在氩弧中混入 1% 的氢作为示踪原子, 同样, 对 $100 \text{ A} / 50 \text{ Hz}$ 方波交流电弧进行观测, 分别测得 H α 线过零前 (EN)、过零时段、过零后 (EP) 半高宽度的平均值, 如图 6 所示.

2.2.2 交流电弧过零电子数密度变化的观测

在焊接电弧等离子体中, 光子的辐射受到周围离子和自由电子微电场的作用, 相应谱线产生斯塔克展宽效应. 根据斯塔克展宽理论, 谱线的展宽基本取决于等离子体的电子密度, 与温度的函数关系较弱, 且与等离子体是否处于热力学平衡 (LTE) 状态无关^[4]. 采用氩原子谱线的斯塔克展宽测量电子密度是一种常用方法, 该方法对电子密度测量的有效范围达 $10^{20} \sim 10^{23} \text{ m}^{-3}$ ^[4]. Griem 等人^[4] 用量子理论计算氩的斯塔克展宽效应产生的谱线轮廓半高全

图 6 交流电弧 H α 线的变化Fig 6 H α line broadening in AC arc

宽 $\Delta\lambda_{1/2}$ 与电子密度 μ 的关系, 即

$$\Delta\lambda_{1/2} = C(N_e, T_e) \mu^{2/3} \text{ (nm)}$$

式中: 系数 $C(N_e, T_e)$ 可根据文中试验条件在文献 [4] 中查得。

在焊接电弧的工作条件下, 引起谱线展宽的除了斯塔克效应之外, 还包括多普勒 (Doppler) 展宽、仪器展宽等其它的谱线展宽效应。在电弧发射光谱谱线的多普勒展宽不大于 $0.05 \text{ nm}^{[5]}$; 通过冷光源标准氢灯可确定光谱系统的仪器展宽; 对其它展宽可忽略不计。所以, 用上述方法测得谱线展宽, 在后续的电子密度计算中应扣除这两类影响较大的展宽值而对 $\Delta\lambda_{1/2}$ 作出必要的修正。

根据上述原理和图 6 中的数据, 可以得到交流电弧过零前后及过零时段的电子数密度 (表 2)。采用文中的动态光谱诊断系统和方法, 还可对各类焊接电弧的近工件区、近电极区的特征谱线进行分区观测, 获得电弧空间不同区域的热力学参数的时间

表 2 各时段电子数密度

Table 2 Average electron density of each period

时段	半高宽 $\Delta\lambda_{1/2}/\text{nm}$	电子数密度 $\mu/10^{22}\text{m}^{-3}$
过零前(EN)	0.41	3.44
过零时段	0.21	1.64
过零后(EP)	0.40	3.43

变化特征, 这些研究内容都将在后续工作中展开。

3 结 论

(1) 基于现代增强型 CCD 光谱观测装置, 采取文中提出的时控—统计平均方法, 实现了焊接电弧发射光谱连续的动态观测。

(2) 基于上述系统及方法, 观测到交流动态电弧特征谱线半高宽度和中心波长位移量变化的时间特征。

(3) 根据 Griem 理论, 对交流电弧电子数密度和氩原子激发温度等热力学状态参数的时间特征进行观测, 测得 100 A 方波交流电弧过零前 (EN)、过零后 (EP) 电子密度及氩原子激发温度基本相等, 分别为 $3.44 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$, 10 500 K, 而过零时段的电子数密度及氩原子激发温度都出现下跌, 分别跌至 $1.64 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$, 9 500 K。

参考文献:

- [1] 宋永伦. 焊接电弧等离子体的光谱诊断法及其应用的研究 [D]. 天津: 天津大学, 1990.
- [2] 徐晨明. 氩氦电弧的光谱诊断及其应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
- [3] 王鸿章. 谱线位移法测定等离子体射流的温度 [J]. 光学学报, 1982, 2(1): 72—78.
Wang Hongzhang. Spectral shifting applied to plasma temperature diagnosis [J]. Transactions of the China Optics Institution, 1982, 2(1): 72—78.
- [4] Griem H R. Spectral line broadening by plasmas [M]. New York: Academic, 1974.
- [5] 胡坤平, 宋永伦, 夏源, 等. 交流 TIG 电弧的过零过程及其状态特征 [J]. 焊接学报, 2006, 27(12): 20—24.
Hu kunning, Song Yonglun, Xia Yuan, et al. AC TIG arc's current cross-zero and its characteristic [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(12): 29—33.

作者简介: 胡坤平, 男, 1970 年出生, 博士研究生. 主要从事焊接电弧物理及热处理过程控制方面的研究. 发表论文 4 篇。

Email: hkp@emails.bjtu.edu.cn

edge image. The weld seam center is picked up accurately by scanning the weld seam's left and right feature points after edge detection. In order to reduce tracking error, the coordinates offset of each small segment in weld track is divided into fifty parts at the same time, an effective robot tracking control program is presented. The tracking experiment of sidelong S-shape weld seam line showed that it can satisfy tracking demand under normal conditions.

Key words: vision sensing; underwater welding; image processing; weld seam tracking

Microstructure observation and analysis of resistance spot welded joints of electrolytic cobalt starting sheet and lifting ear

ZHOU Xiaoling¹, LIU Chen², CAO Baoguo², GU Yonggang² (1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Yunnan 650093, China; 2. Jinchuan Group LTD, Jinchang 737100 Gansu, China). p37-41

Abstract In this study, commercially pure cobalt starting sheet and lifting ear with the same material were welded by resistance spot welding at different welding parameters. The microstructural measurements of welded joints had been investigated metallographically. The influence of several welding steps on the phenomena of parallel slipping bands, cross slipping bands and recrystallization in columnar grains had been analyzed and discussed. The result showed that, when the base metal is pure metal, proper low supercooling on the front of solid/liquid interface and low nucleation make the columnar grain easier to form; the applied electrode pressure during cooling process was mainly responsible for the formation of slip bands in the columnar grains. The larger the electrode pressure, the denser the slip bands; there are uncompleted dynamic recrystallization in the deformed columnar grains, parallel and crossing slip lines take the role of the growth steps of new crystal nucleation and growth.

Key words: electrolytic cobalt; resistance spot welding; microstructure; slip band; recrystallization

Finite element simulation on the effect of welding residual stress on the metal dusting corrosion of welded joint

HU Guiming, ZHOU Changyu, ZHANG Guodong, CHEN Cheng, LEI Na (School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China). p42-46

Abstract: Metal dusting is a phenomenon of high temperature corrosion, which occurs in carburizing environment. The first step of this corrosion is the diffusion of carbon towards metal matrix. A coupling calculating method on carbon diffusion has been developed based on the finite element program. By this method, the effect of welding residual stress on the carbon diffusion was numerically simulated for the as-welded condition and operation condition of the tube in heating furnace. The diffusion without the effect of stress was also taken into account and compared with those under residual stress. The results show that the highest welding residual stress gradient is near the heat-affected zone (HAZ), and the peak value of carbon

concentration exists near this zone. Also the low carbon concentration valley exists at the both sides of the peak value, which is caused by the diffusion of carbon to the high stress zone. In operation conditions, stress relaxation will happen and the effect of residual stress is decreased, which can delay the metal dusting corrosion of the tube. But the influence of the residual stress still exists, the zone near the weld of the tube should be inspected carefully during the inspection period.

Key words: metal dusting; high temperature corrosion; coupling; welding residual stress; finite element simulation

Welding arc emissive spectrum dynamic diagnosis and its application

HU Kumping, SONG Yonglun, XIA Yuan, CHEN Zhixiang (School of Mechatronics, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China). p47-50

Abstract Emissive spectrum diagnosis is important to study welding arc phenomenon. Limited by experimental condition in the past, the knowledge of spectrum dynamic diagnosis is not enough and most of the diagnosis results come from stable TIG arc. In this paper, based on modern ICCD spectrum instrument, a new type of arc spectrum dynamic diagnosis system is established and a new diagnosis method based on time-control and statistic-average is developed to observe AC dynamic welding arc continuously. The half-height width and wavelength shifting of AC TIG arc spectrum line can be observed, furthermore electron density and Ar atom excitation temperature can be obtained. This dynamic observation is quite significant to study the time-characteristic of arc (especially alternative current arc).

Key words: AC dynamic arc; emissive spectrum; dynamic diagnosis; time-control and statistic-average method

Comparative analysis on predictions of the geometric form of laser cladding

ZHAO Hongyun, YANG Xianqun, Shu Fengyuan, XU Chunhua, WU Jianqian (School of materials science and engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, Shandong China). p51-54, 59

Abstract A comparison between the analytical methods of multiple linear regression analysis (MLRA) and genetic algorithm optimizing neural networks was made for predicting the geometric form of laser cladding. The corresponding relationship between main processing parameters (laser power, scanning velocity and powder mass flow rate) and the geometric form of clad (cladding width, height and depth of the penetration into the substrate) was affirmed. The result proved the feasibility of using MLRA to predict the geometric form of laser cladding and the average relative error of five test values was 2.49%. In comparison, the former is convenient in application by which functional relationship between parameters such as width, height and depth of the penetration and so on. While the latter produces a better precision and a visible function relationship with a more complex operation process. Often the MLRA method is usual-