

# 活性剂等离子弧焊焊接电弧的光谱与热分析

柴国明, 朱轶峰

北京航空制造工程研究所, 高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024

**摘要** 针对活性剂等离子弧焊焊接过程, 利用光谱分析方法对活性剂等离子弧焊焊接电弧进行光谱分析, 采用红外热像伪着色法测定活性剂等离子弧焊焊接电弧温度场, 并建立活性剂等离子弧焊焊接电弧热流密度径向分布模型, 对焊接电弧的成分及焊接电弧温度场进行了研究。研究表明, 常规等离子弧焊焊接电弧以氩原子和氩一次电离离子的谱线为主, 金属蒸气谱线不突出, 焊接电弧以气体粒子为主, 属于气体电弧; 活性剂等离子弧焊焊接电弧的光谱中氩原子及氩一次离子谱线的辐射强度增强, Ti, Cr, Fe 金属谱线大量涌现; 活性剂等离子弧焊焊接电弧的温度分布比较紧凑, 温度场外形窄, 温度分布范围较集中, 电弧径向温度梯度较大; 电弧径向温度分布呈现正态 Gauss 分布模式。

**关键词** 活性剂等离子弧焊; 焊接电弧; 光谱分析; 温度场

**中图分类号**: TG456 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)04-1141-05

## 引言

活性化焊剂在增加焊接熔深、提高焊接效率方面有明显效果。如果将活性化焊剂应用到等离子弧焊焊接过程中, 发展前景较为广泛。多年来对活性化焊剂主要是在 TIG 焊方面开展研究, 而对于将活性化焊剂在其他焊接方法中的研究虽然也有但是并不是很深入<sup>[1-9]</sup>。

焊接电弧的弧光信息能够反映电弧等离子体的状态, 光谱分析方法<sup>[10-16]</sup>为电弧研究提供手段, 早期的焊接过程电弧光谱研究主要是从电弧防护的角度出发。随着研究的深入, 人们逐渐认识到焊接电弧光谱中存在大量的焊接过程信息, 可以被用来进行焊接过程的测控。焊接电弧光谱信息目前的主要应用领域包括<sup>[10]</sup>: 用光谱法诊断 TIG 和 MIG/MAG 焊电弧的温度场, 测定等离子体温度<sup>[11]</sup>; 应用于图像传感方面<sup>[12, 13]</sup>; 气体成分及浓度测定与控制(可参见天津大学宋永伦的论文, 1990); TIG 焊弧长测控和 MIG 焊控制熔滴过渡<sup>[14]</sup>(还可参见杨永强的论文(2002, 天津大学)); 在水下焊接及在水下等离子体等领域的应用<sup>[15]</sup>。

目前, 关于活性剂等离子弧焊焊接电弧光谱及热特性方面的研究比较薄弱。在实际应用中, 难免会因缺乏理论依据而产生一定的盲目性, 没有办法提供更加有效的指导, 从而影响了这种技术的发展和推广。因此, 开展活性剂等离子弧焊焊接电弧光谱及热特性的研究, 从本质上认识活性剂等离

子弧焊焊接技术的机理, 为活性剂等离子弧焊焊接技术的工程应用提供理论借鉴, 无疑具有十分重要的理论研究意义和广阔的工程应用价值。针对活性剂等离子弧焊焊接电弧的光谱分布和温度分布进行研究, 为广泛应用活性剂等离子弧焊焊接技术进行理论铺垫。

## 1 试验材料与条件

焊接试验所用材料为 SUS304 不锈钢, 化学成分如表 1 所示。采用恒流特性等离子弧焊焊接电源进行焊接。所有焊接试验采用的焊接参数完全一致, 电流 100 A、钨极直径 4.8 mm、等离子气流量 2.5 L · min<sup>-1</sup>、保护气流量 10 L · min<sup>-1</sup>、钨极内缩量 2 mm、钨极尖角 30°、焊枪喷嘴距工件 5 mm。为了保证试验结果的准确性和可比性, 在每条焊缝焊接之前, 均重新研磨电极呈标准形状, 调整电弧至标准长度, 保证每条焊缝均在统一规范条件下焊接。

Table 1 SUS304

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.05	0.43	0.87	0.03	0.002	8.19	18.14

活性剂的主要成分为 TiO<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub> 和 CaF<sub>2</sub> 等。试验前, 将活性剂粉末, 用丙酮调和成溶液, 然后用扁平毛刷均匀地将其涂敷在试板上, 在涂敷过程中尽可能地保证涂

收稿日期: 2009-01-10, 修订日期: 2009-04-20

基金项目: 武器装备重点基金项目(614010)和高能束流加工技术重点实验室基金项目(41318.5.1.9)资助

作者简介: 柴国明, 1978 年生, 北京航空制造工程研究所, 高能束流加工技术重点实验室高级工程师 e-mail: chaiguoming@sohu.com

敷的均匀性。

## 2 光谱分布采集及分析

焊接电弧的光谱分析与诊断是电弧物理基础研究中的一项重要内容。焊接光谱信息的采集和分析采用图 1 所示的采集系统进行,系统主要由接收光路、影像光谱仪、CCD 光谱探测器、光谱探测控制器和主控计算机构成。影像光谱仪 SP556 焦距为 500 mm,内置三片衍射光栅,刻痕密度分别为 150, 1 200 和 2 400  $\text{g} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。仪器内部配有以 32 位微处理器为核心的步进电机控制系统,控制光栅的转动以实现波长扫描,并通过 RS232 及 IEEE488 总线与外部设备接口,实现数据的相互传递。入射狭缝配有测微丝杆,狭缝宽度连续可调。入射光通过外接收光路从入射狭缝进入影像光谱仪,在影像光谱仪内部完成准直、色散分光和聚焦,最后在出射端口形成焦平面,焦平面上呈现出一段波长区间的光谱影像信息。CCD 光谱探测器配接在影像光谱仪出射端口,经过系统调试后,影像光谱仪输出光谱影像的焦平面正好与 CCD 光谱探测器的像素面阵表面重合。CCD 像素面阵为  $1024 \times 128$ ,单元像素尺寸为  $24 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$ 。光谱测试系统的接收光路是电弧辐射光进入光谱仪必经的第一道环节,其主要作用在于完成从电弧至光谱仪辐射光线的传输。根据不同的试验要求,接收光路的构成可简可繁。若只测试电弧空间某一体元的发射光谱,或将电弧简化为点光源处理,此时,接收光路的组成较为简单,通常采用一个聚焦透镜和一根石英光纤传光束即可;若需要同时监测电弧空间不同位置体元的发射光谱,这时,对于接收光路的设计和制造必然要提出较高的要求。接收光路主要由光学透镜组、成像接收组件、石英光纤传像束和位置微调机械组件构成。等离子弧 1 的辐射光经变焦镜头 2 和双胶合正透镜 3,在成像接收组件的接收屏 4 上成 1:1 的实像,采用双胶合正透镜可以对轴上及近轴点校正球差和色差。成像接收组件由接收屏 4 和传像束接收端头 5 组成,在接收屏的中心线位置利用线切割获得  $10 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$  的取像狭缝。采用了线形石英光纤传像束将透过接收屏的电弧辐射光传输到光谱仪的入射狭缝。接收端头与接收屏紧密相连,接收屏的取像狭缝正对应着接收端头中一字排列的光纤,出射端头排列的光纤对应着光谱仪的入射狭缝。

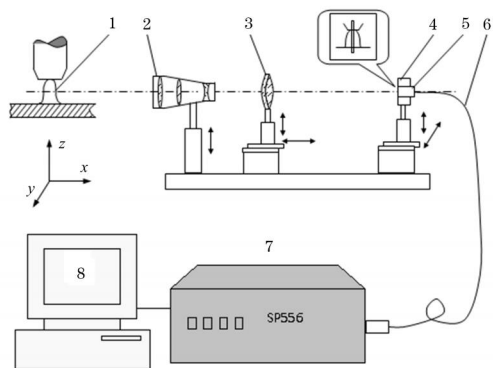
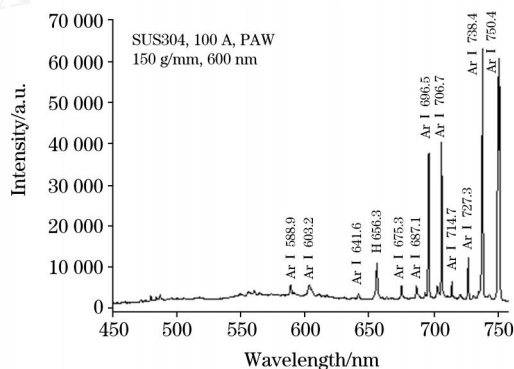


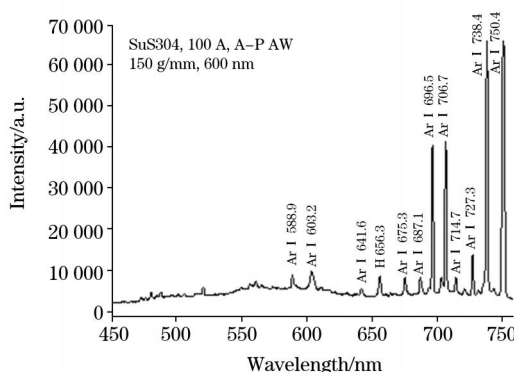
Fig 1 Collect system

### 2.1 等离子弧整体光谱分析

若将焊接电弧简化为点光源处理,接收光路可以采用一个聚焦透镜和一根石英光纤传光束构成,此时,光谱测试系统接收的是整体电弧的发射光谱,如图 2 所示,该图显示了实际焊接条件下等离子弧的整体发射光谱,被焊材料板厚 4 mm,采用了  $150 \text{ g} \cdot \text{mm}^{-1}$  的光栅,在可见光光谱段 (450 ~ 750 nm),整体弧光光谱分布的基本规律是在较低的连续谱上叠加许多线谱,线谱辐射强度的最高部分在 700 ~ 750 nm 的范围内,以氩原子谱线居多,氩原子谱线相对辐射强度值较高;此外,明显可以看出,在可见光范围 (380 ~ 760 nm),等离子弧的整体光谱以氩原子和氩一次电离离子的线谱辐射为主,尽管工件材料处于熔化焊接状态,金属蒸气的谱线却并不突出,整体电弧光谱的测试结果表明:实际焊接时,等离子弧的成分以气体粒子为主,属于气体电弧。



(a) 常规等离子弧焊



(b) 活性剂等离子弧焊

Fig 2 Macro-character of spectra radiation for activating flux plasma arc

此外,由图对比可见,在 600 nm 以上谱段,加入活性剂后,光谱辐射特征没有明显变化;而在 600 nm 以下谱段,加入活性剂后,等离子弧光谱辐射的细微特征还是有区别的,尤其在 400 ~ 500 nm 的区间,但是需要采用分辨率更高的光栅。

### 2.2 活性剂等离子弧焊过程光谱测试分析

为了更精确捕捉活性剂等离子弧焊接过程的光谱辐射的特征,采用了高分辨率光栅,焊接过程中连续多幅采集光谱辐射强度的实验方法。典型的试验结果如图 3 所示。

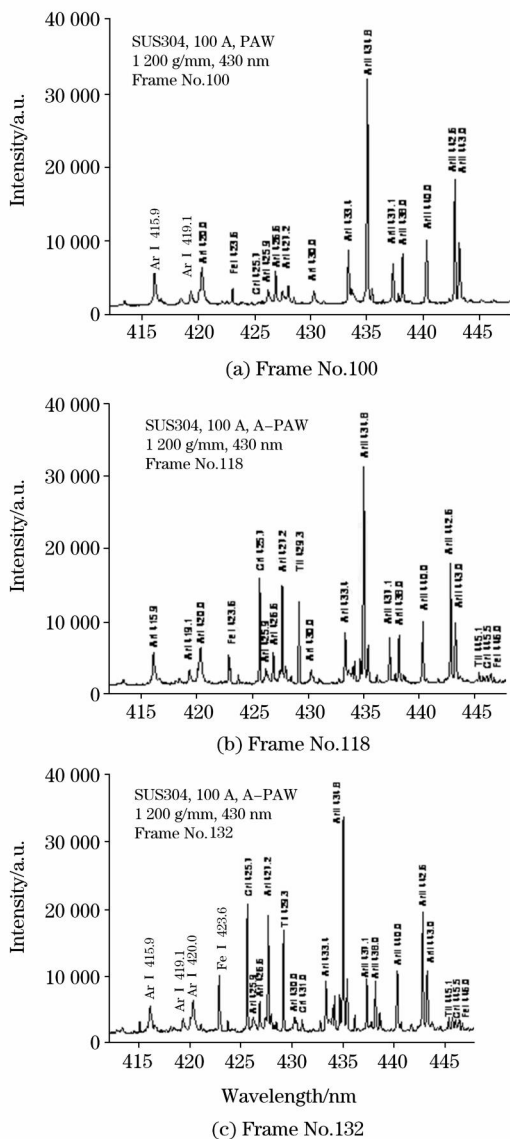


Fig 3 Character of spectra radiation in activating flux plasma arc welding process

图 3(a) 所拍摄的谱线是未涂敷活性剂区域的焊接电弧谱线，图 3(b) 和图 3(c) 所拍摄的谱线是进入到涂敷活性剂区域的焊接电弧谱线。由图可见，活性剂的加入，在 412 ~ 448 nm 波长段，等离子弧发射光谱发生了明显的变化，不仅氩原子及氩一次离子谱线的辐射强度产生了变化，金属谱线也大量涌现，如 Ti, Cr, Fe 等。

### 3 电弧温度场的测量及其结果分析

采用红外热像法实时测量活性等离子弧焊接电弧温度场，被焊材料板厚 2 mm。红外热像仪采用 A GA780 热像仪，该设备包括红外探测器、红外信息处理器、显示器和录像机等。在测量温度前，采用工程标定法<sup>[1]</sup>对测温仪进行温度标定。测量时为了使摄取的图像清晰，在红外摄像机前配置了两块红外滤光片，同时通过加滤光器组滤掉电弧光的干扰。

活性剂等离子弧焊接电弧温度场的红外取像是从水平位置直接将摄像机对准电弧，所摄取的图像信号通过 A/D 转换，经图像卡在计算机上进行取像、消除噪声、均匀量比、伪着色等处理，最终获得了所测焊接温度场的图像。不添加活性剂等离子弧焊接温度场如图 4(a) 所示<sup>[9]</sup>。图 4(b) 为同样条件添加活性剂等离子弧焊接温度场<sup>[9]</sup>。

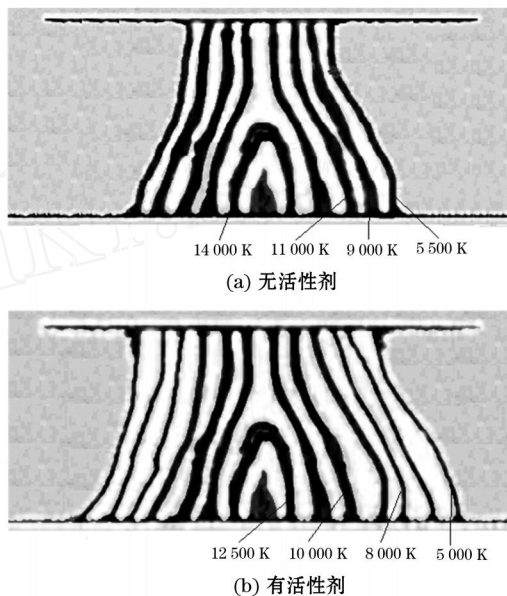


Fig 4 Plasma arc welding temperature field in activating flux and without activating flux

从图 4 明显可见，与常规等离子弧焊接电弧相比，活性剂等离子弧焊接电弧的温度分布比较紧密，外形较窄，分布范围较集中，电弧中心区温度较高，电弧径向梯度比较大。常规等离子弧焊接电弧温度场外形宽，温度分布比较分散，电弧中心区域的温度并不是很高，电弧径向的温度梯度比较小。但这两种焊接电弧温度场的本质特征无明显区别（如电弧中心区温度都比外缘高），沿焊接电弧中心线，温度场对称分布；在电弧水平面各个径向上温度梯度相等，其等温线为一组同心圆。研究表明，添加活性剂后的等离子弧焊接电弧温度分布曲线下的面积并不改变，即添加活性剂后的等离子弧焊接电弧的总能量不变，这从另一个侧面证实了添加活性剂并不增加等离子弧焊接电弧的总能量，只改变了等离子弧焊接电弧的热量分布。

当活性剂的涂敷量变化时，保持其他焊接条件不变，在距离钨极 2 mm 处，焊接电弧中心线的水平剖面上温度分布曲线如图 5 所示，因为电弧温度场对称分布，绘图时取其一半即可。

从图 5 可知，当活性剂的涂敷量增加时，等离子弧焊接电弧温度分布更加紧密，中心区域的温度升高，电弧影响区域减小，焊接电弧径向温度梯度增大。

在活性剂涂敷量一定时，变化焊接电流，保持其他焊接条件不变，得到活性剂等离子弧焊接电弧水平剖面上的温度分布曲线如图 6 所示。

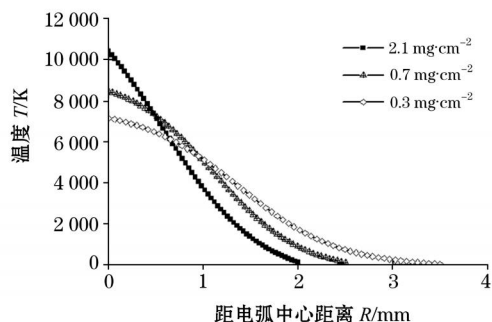


Fig 5 The arc in activating flux plasma arc welding for horizontal section temperature field

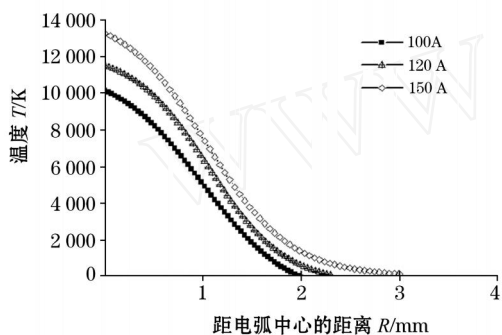


Fig 6 The arc in activating flux plasma arc welding for horizontal section temperature field

从图 6 可知,当活性剂等离子弧焊接电流增大时,焊接电弧的温度升高,焊接电弧的温度梯度增大,影响范围增大,温度分布曲线下所围的面积增大,表明活性剂等离子弧焊接电弧的热量增加;同时焊接电流的增大使活性剂的作用更明显,但焊接电弧温度分布的特征不变。综上所述,焊接电流的增大使活性剂等离子弧焊接电弧的总能量增加,但并不改变其电弧热流的分布特征。

根据焊接电弧温度场与热流密度的紧密联系<sup>[17]</sup>,以普通焊接电弧热流密度分布模型为基础,建立活性剂等离子弧焊接电弧热流密度的 Gauss 正态径向分布模型。

$$q(r)_{\text{arc}} = \frac{KP}{2q} \exp(-Kr^2) \quad (1)$$

$$P = \alpha UI \quad K = \frac{A}{2q} \quad (2)$$

式中  $q(r)_{\text{arc}}$  为焊接电弧热流密度,  $K$  为热流集中系数,  $P$  为焊接电弧有效热功率,  $R$  为某点的径向距离,  $U$  为电弧电压,  $I$  为焊接电流,  $\alpha$  为焊接电弧功率有效利用系数,  $A$  为热流集中系数常数,  $q$  为热流分布参数,  $q$  定义为热流密度衰减至最大值的 5% 时的径向距离。

活性剂等离子弧焊接电弧热流密度的 Gauss 正态分布与普通等离子弧焊接电弧热流密度的 Gauss 正态分布不同。活性剂等离子弧焊接电弧热流密度的 Gauss 正态分布的热流集中系数要大于普通等离子弧焊的热流集中系数,即电弧热流分布参数  $q$  较小。同时热流集中系数中的常数  $A$  也不一样。在以上研究条件下,活性剂等离子弧焊接电弧热流分布模型<sup>[6]</sup>为

$$q(r)_{\text{arc}} = \frac{4\alpha UI}{2q} \exp\left(-\frac{Ar^2}{2q}\right) \quad (3)$$

## 4 结 论

(1) 加入活性剂后,低分辨率光栅观察在 600 nm 以上波段,加入活性剂后,光谱辐射特征没有明显变化;在 400 ~ 500 nm 的区间弧光谱辐射的细微特征有区别,但并不明显,需要采用分辨率更高的光栅。

(2) 高分辨光栅连续观察,进入到涂敷活性剂区域后,焊接电弧谱线在 412 ~ 448 nm 波长段,氩原子及氩一次离子谱线的辐射强度增强, Ti, Cr, Fe 金属谱线大量涌现。

(3) 红外热像法实测的活性剂等离子弧焊接电弧的温度场显示,沿焊接电弧中心线其温度场对称分布;与普通等离子弧焊接电弧相比,活性剂等离子弧焊接电弧的温度分布比较紧凑,温度场外形窄,温度分布范围较集中,电弧径向温度梯度较大。

(4) 当活性剂的涂敷量增加时,焊接电弧的温度分布更加紧凑,电弧中心区温度升高,电弧热影响范围增大,电弧径向温度梯度降低;焊接电流增大时,活性剂等离子弧焊接电弧温度升高,电弧总热量增加,但并不改变电弧热流分布的本质特征,其电弧径向温度分布呈现正态 Gauss 分布模式。

(5) 根据焊接电弧温度的分布规律,建立了活性剂等离子弧焊接电弧热流密度径向 Gauss 正态分布模型

$$q(r)_{\text{arc}} = \frac{4\alpha UI}{2q} \exp\left(-\frac{Ar^2}{2q}\right) \quad (3)$$

## 参 考 文 献

- [ 1 ] PATON B E. Automatic Welding, 1974, 27(6) : 1.
- [ 2 ] LUCAS W, HOWSE D. Welding and Metal Fabrication, 1996, 3(1) : 11.
- [ 3 ] PAULO J. J. of Materials Processing Technology, 2000, 9: 260.
- [ 4 ] LIU Feng-yao, LIN San-bao, YANG Chun-li, et al(刘凤尧,林三宝,杨春利,等). Transactions of the China Welding Institution(焊接学报), 2002, 23(2) : 5.
- [ 5 ] ZHANG Rui-hua, FAN Ding(张瑞华,樊丁). Transactions of the China Welding Institution(焊接学报), 2003, 24(1) : 85.
- [ 6 ] CHAI Guo-ming, ZHU Yi-feng, ZHANG Hui(柴国明,朱轶峰,张慧). Chinese Journal of Mechanical Engineering(机械工程学报), 2005, 41(10) : 170.
- [ 7 ] WU Ming-liang, YU Shu-rong, ZHANG Guo-jin, et al(吴明亮,余淑荣,张国锦,等). Hot Working Technology(热加工工艺), 2006,

- 35(15) : 36.
- [ 8 ] LIU Li-ming , ZHANG Zhao-dong , SHEN Yong (刘黎明, 张兆栋, 沈 勇, 等). Acta Metallurgica Sinica (金属学报), 2006, 42 (4) : 399.
- [ 9 ] CHAI Guo-ming , ZHANG Hui (柴国明, 张 慧). Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica (航空学报), 2008, 29(1) : 192.
- [10] Li Junyue , Li Zhiyong , Li Huan , et al. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 17(2) : 315.
- [11] JIANG Li-pei , ZHANG Jia-ying , LI Hong-hui (蒋力培, 张甲英, 李鸿辉). Transactions of the China Welding Institution (焊接学报), 2001, 22(3) : 1.
- [12] Sforza P, De B D. NDT & E International, 2002, 35: 37.
- [13] YAN Zhi-hong , ZHANG Guang-jun , QIU Mei-zhen , et al (闫志鸿, 张广军, 邱美珍, 等). Transactions of the China Welding Institution (焊接学报), 2005, 26(2) : 37.
- [14] HAN Guo-ming , WU Zhao , LIU Gang (韩国明, 吴 钊, 柳 刚). China Mechanical Engineering (中国机械工程), 2000, 11(4) : 446.
- [15] PAN Cun-hai , DU Su-mei , LI Heng , et al (潘存海, 杜素梅, 李 桓, 等). Chinese Journal of Mechanical Engineering (机械工程学报), 1997, 33(5) : 12.
- [16] WU Rong , LI Yan , ZHU Shun-guan , et al (吴 蓉, 李 燕, 朱顺官, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2008, 28(4) : 731.
- [17] ZHANG Wen-yue (张文钺). Weld Heat Transfer Theory (焊接传热学). Beijing : China Machine Press (北京: 机械工业出版社), 1987.

## Spectra and Thermal Analysis of the Arc in Activating Flux Plasma Arc Welding

CHAI Guo-ming , ZHU Yi-feng

National Key Laboratory for High Energy Density Beam Processing Technology , Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute , Beijing 100024 , China

**Abstract** In activating flux plasma arc welding the welding arc was analyzed by spectra analysis technique , and the welding arc temperature field was measured by the infrared sensing and computer image technique. The distribution models of welding arc heat flow density of activating flux PAW welding were developed. The composition of welding arc affected by activated flux was studied , and the welding arc temperature field was studied. The results show that the spectral lines of argon atom and ionized argon atom of primary ionization are the main spectra lines of the conventional plasma welding arc. The spectra lines of weld metal are inappreciable in the spectra lines of the conventional plasma welding arc. The gas particle is the main in the conventional plasma welding arc. The conventional plasma welding arc is gas welding arc. The spectra lines of argon atom and ionized argon atom of primary ionization are intensified in the activating flux plasma welding arc , and the spectra lines of Ti , Cr and Fe elements are found in the activating flux plasma welding arc. The welding arc temperature distribution in activating flux plasma arc welding is compact , the outline of the welding arc temperature field is narrow , the range of the welding arc temperature distribution is concentrated , the welding arc radial temperature gradient is large , and the welding arc radial temperature gradient shows normal Gauss distribution.

**Keywords** Activating flux PAW welding ; Welding arc ; Spectra analysis ; Temperature field

(Received Jan. 10, 2009 ; accepted Apr. 20, 2009)