

DOI: 10.3901/JME.2009.04.197

# 基于电弧光谱的钢熔化极惰性气体 保护焊质量判识\*

李志勇<sup>1</sup> 丁京滨<sup>1</sup> 李 桓<sup>2</sup> 杨立军<sup>2</sup>

(1. 中北大学焊接研究中心 太原 030051;  
2. 天津大学材料学院 天津 300072)

**摘要:** 通过对熔化极惰性气体保护电弧焊(MIG 焊)电弧光谱分布进行采集, 研究其光谱分布的基本特征, 并基于光谱分布的分析, 通过预设干扰因素, 对不同特征谱段光谱信号随焊接过程的变化进行采集, 寻求 MIG 焊接质量在线光谱测控的理论依据和工程实现。研究表明, MIG 焊电弧光谱在不同谱段存在金属谱线和 Ar 谱线聚集区。在不同弧长下的不同熔滴过渡形态, 其光谱信号在特征谱段得到明显反映, 电流变化引起的焊道变宽也有很好的特征信号; 不同干扰因素引起的焊接缺陷, 在焊接电弧光谱信号不同谱段的分布和变化规律不同, 通过对特征谱段信息的采集, 可以获得关于焊接过程信息的特征信号, 从而实现对 MIG 焊接质量的分类判识。

**关键词:** 电弧光谱 干扰因素 熔化极惰性气体保护电弧焊 焊接质量

**中图分类号:** TG422

## MIG Welding Quality Diagnose Based on Arc Light Spectrum

LI Zhiyong<sup>1</sup> DING Jingbin<sup>1</sup> LI Huan<sup>2</sup> YANG Lijun<sup>2</sup>

(1. Welding Research Center, North University of China, Taiyuan 030051;  
2. School of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract:** Through collecting MIG welding arc light spectrum of steel, the basic characteristic of the spectrum distribution is studied. Based on the analysis, special spectral zones are selected for collecting the light spectral signal of welding process with preset disturbance factors. The studies aim to acquire the theory base of online welding quality test and control based on arc light spectrum and its application. The results show that there are aggregation zones of metal spectral line and Ar spectral line in different spectral zones. The different transfer mode of welding droplet in different arc length have characteristic signal in the special spectral zone. The bead broadening caused by welding current variation also has good characteristic signal. The welding defect caused by different disturbance factors has its signal characteristic in different spectral zone. Through collecting the light spectral signal of welding arc in the special zone, information related to the welding quality can be acquired to realize classification and identification of MIG welding quality.

**Key words:** Arc light spectrum Disturbance factor MIG welding Welding quality

## 0 前言

焊接电弧的弧光信息能够反映电弧等离子体的状态, 早期的焊接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

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。目前主要应用领域有: 用光谱法诊断钨极惰性气体保护电弧焊(TIG)和熔化极惰性气体保护电弧焊/活性气体保护电弧焊(MIG/MAG)电弧的温度场<sup>[1]</sup>; 光谱理论应用于图像传感来提高图像品质及获得必要信息<sup>[2]</sup>; 气体成分及浓度测定与控制等方面<sup>[3]</sup>; 在 TIG 焊弧长测控<sup>[4]</sup>和在 MIG 焊中控制熔滴过渡<sup>[5]</sup>; 在水下等离子体局

\* 国家自然科学基金(50505048)和天津市应用基础研究(07JCYB JC04400)资助项目。20080618 收到初稿, 20081123 收到修改稿

部热平衡判定等特定领域<sup>[6]</sup>。

由于 TIG 焊电弧稳定, 其电弧光谱信息基本不受熔滴过渡引起波动的影响, 容易在焊接过程测控中实现特征信息的获取<sup>[7]</sup>, 所以研究者针对此进行了较详尽的理论和应用研究<sup>[8]</sup>, TIG 焊的弧长测控是光谱信息较成功的应用范例。

相对而言, 除了由于熔滴过渡引起的电弧光谱的波动现象, 被成功地用来进行 MIG 焊熔滴过渡的控制外, MIG 焊光谱信息的应用受到了较大限制, 这与两个方面的因素有关系: MIG 焊电弧光谱中含有大量的金属谱线, 关于它的谱线分布基础研究还不全面深入; 焊接过程中, 由于熔滴过渡带来的谱线在较大范围内波动, 电弧光谱信息远不如 TIG 焊稳定, 影响了在焊接过程测控上的推广应用。

MIG 焊作为在现代生产中具有实际应用价值的焊接方法, 其焊接质量的测控非常重要, 随着对高效高质焊接的要求, 研究者对于焊接自动化生产中由于干扰因素带来的焊接质量问题越来越重视<sup>[9-10]</sup>; 由于传统的电信号在检测中存在一定的局限性, 如对 MIG 焊中的喷射过渡, 电信号在测控中的信噪比不高; 而光谱信号在此方面有独到的优势<sup>[11]</sup>。如果能将 MIG 焊的光谱信息与焊接质量直接联系起来, 获取能反映焊接过程的特征光谱谱段, 实现 MIG 焊焊接质量的光谱判识, 有重要工程意义。

## 1 试验条件及方法

焊接光谱信息的采集和分析采用图 1 的采集系统进行, 系统使用荷兰 Advantes 公司的 Avaspec-2048FT-2 光纤式数字光谱仪采集光谱信息, 光纤双通道输入, 可以对 200~1 100 nm 波段范围的光谱进行采集, 分辨率达 0.3 nm, 盔甲包装的 Y 字形光纤保证了光谱信号的同步同点采集; 除可以实现光谱谱段的频域采集外, 还可实现多达 8 个特征谱段积分强度的同步采集, 便于信息的融合和特征信号的提取。焊接电源使用时代的 NB-500 气保焊机,

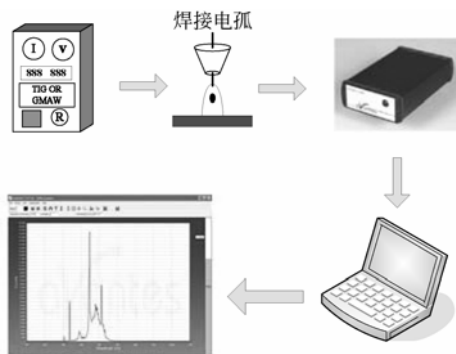


图 1 光谱采集系统示意图

纯氩保护, 焊丝为 H08Mn2Si, 直径为 1.2 mm。试验采用的焊接电流为 160~190 A, 弧压 29~30 V, 标准气流量 20 L/min。

## 2 光谱分布分析及特征谱段的选取

为了进行特征谱段的选取, 首先要对 MIG 焊电弧中各个谱段的辐射进行研究, 结合谱段的特点, 将采集到 200~1 100 nm 谱段的光谱信息分为四个谱段进行分析: 200~450 nm, 450~650 nm, 650~780 nm, 780~1 100 nm(图 2、3)。整个光谱辐射呈现出在连续辐射基础上存在大量线谱辐射。一些研究者将众多线谱归结为频移和展宽的结果<sup>[12]</sup>, 但详尽资料表明这些谱线主要为 Fe 谱线。

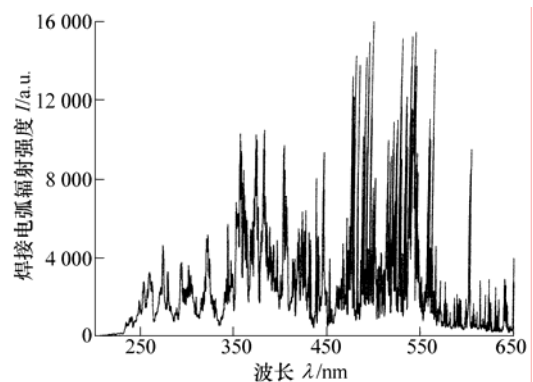


图 2 MIG 焊电弧 200~650 nm 的光谱分布

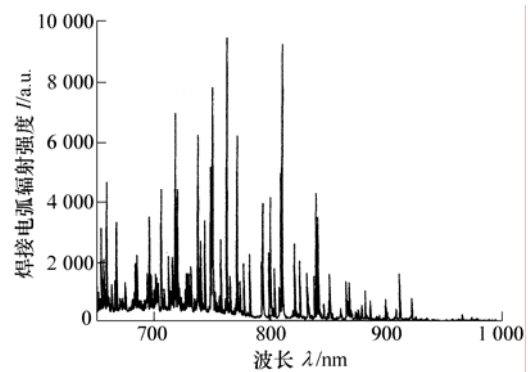


图 3 MIG 焊电弧 650~1 000 nm 的光谱分布

图 2 中, 在 230~350 nm 的光谱分布的主要辐射谱线有 Fe II 274.648、Fe II 274.698、Fe I 321.0 的聚集区、344.061 nm、344.099 nm 的 Fe I 谱线等, 在 350~450 nm 的强谱线有 373.486 nm、373.713 nm 的 Fe I、382.042 9 nm、382.117 8 nm 的 Fe I 等, 而 230 nm 以下的辐射相对较弱, 进入真空紫外区, 在空气中迅速被吸收, 对实际测控没有现实意义。

图 2 中的 450~650 nm 谱段, 可看出在 470~500 nm、500~550 nm 间存在两个密集的强谱线聚集谱段, 在此区间的主要 Fe 谱线有 492.050 5 nm、495.76 nm、526.657 9 nm、526.954 1 nm、537.149 3

nm、561.565 2 nm 等。560 nm 附近也存在一个强谱线区。在 570~650 nm 间，除了 600 nm 的相对强谱线外，谱线辐射都较少，很多研究者将这些线谱较弱的区域用来进行焊缝跟踪和熔池图像传感，以提高图像质量，取得了较好的效果。

图 3 给出了 650~1 100 nm 间的辐射谱线，这个区间的辐射明显弱于 470~570 nm 间的强辐射区。除了金属谱线外，在 750 nm 之后出现了 ArI 谱线，在 780~900 nm 间存在大量的 ArI 谱线，而在 900 nm 后，除了在 910 nm 和 920 nm 左右的 Ar 谱线外，基本没有明显的线谱，并且辐射较小，以黑体辐射为主。

通过 MIG 焊电弧光谱的基本辐射分析，根据各个区段的辐射特点，设定下表中 7 个特定谱段，进行特定焊接过程在各个特征谱段信号响应的采集试验，实现焊接过程光谱信息判识的研究。

表 焊接过程采集试验中预设的特征光谱谱段 nm

F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
230	350	500	570	615	750	900
~300	~450	~550	~590	~680	~850	~1 000

### 3 焊接过程特征及干扰因素在特征电弧光谱谱段的响应

试验采用平特性匹配等速送丝，利用电弧的自调节作用实现焊接过程。在焊接时，由于焊接过程本身的不确定干扰因素和人为干扰因素，会造成焊接过程的不稳定，如果能够对过程中的干扰因素及焊接质量进行判识，对于焊接质量的在线检测和控制是非常重要的。

#### 3.1 不同熔滴过渡形态在光谱信息中的反映

焊接过程 1 采用焊接电弧电压 29.5 V，设定焊接电流为 180 A，此参数选择的目的是为了更方便研究不同过渡形态的光谱反映。

各个谱段的信号变化如图 4 所示，在焊接过程中可看到中间存在一个明显的辐射强度区，此区间的信号在 F4~F7 的特征很明显，对应图 5 可以看出，在焊道中存在一个明显的焊道变宽，在观察电流信号时发现，此瞬时存在一个电流突然增大区，电流上升至 300 A，造成明显的辐射增强。对曲线的两个不同时间段的光谱信号放大表明，其在对应谱段的变化规律存在明显不同。反映了过渡形态的差别。

图 6 对应的 6~9 s 信号段，焊接过程弧长在波动过程中较短，存在瞬时短路，但由短路造成的飞溅较小，此时电弧的光谱信号变化存在以下特征：在 250~300 nm 段，瞬时短路造成电弧的闪动存在

明显的辐射信号；随波长的增大，由于基本辐射的增强，在 350~450 nm、500~550 nm、570~590 nm、615~680 nm 谱段，特征信号并不明显；在 750~850 nm 对应的 Ar 谱线聚集区，瞬时短路造成的电弧辐射能量减小，Ar 谱线强度相应减少，呈现出与 250~300 nm 段相似的波动信号。在 900~1 000 nm 谱段，由于存在两条 Ar 谱线，所以表现出相似的信号特征，但由于线谱不如 750~850 nm 密集，所以信噪比较 750~850 nm 差。

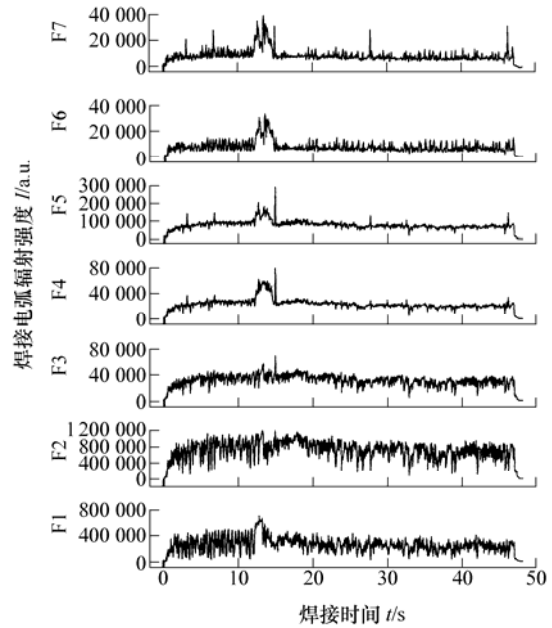


图 4 焊接过程 1 对应各特征谱段光谱信号



图 5 焊接过程 1 焊道照片

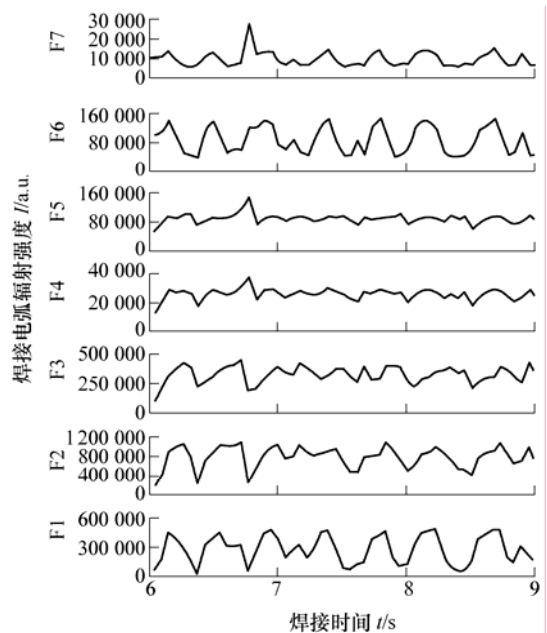


图 6 6~9 s 焊接过程 1 对应的光谱信号

图 7 对应的信号段的焊接过程弧长在波动过程中较长,以射滴过渡为主,此时电弧的光谱信号变化与图 6 存在明显不同,主要有以下特征:由于电弧较长,没有短路造成的明显电弧闪动,所以在不同谱段都有较强的辐射强度,而对应图 6 的 250~300 nm 在瞬时短路时辐射强度接近零,二者存在明显不同。图 7 中,250~300 nm 的特征信号段,对射滴过渡中熔滴过渡的特征信号不明显,而在 350~450 nm、500~550 nm 两个线谱辐射较强的特征谱段,熔滴过渡特征信号明显,研究者在这两个谱段选取特征谱段作为熔滴过渡测控的谱段,取得了较好效果<sup>[5]</sup>。在图 7 中,另一个值得注意的现象是随着金属谱线密集区 350~450 nm、500~550 nm 光谱信号的波动,750~850 nm 对应的 Ar 谱线密集谱段,信号呈现出规律的反向波动特点,这与喷射过渡时,熔滴过渡瞬时造成电弧中存在大量金属气氛,明显降低电弧气氛的电离度,使 Ar 的辐射减少有关。这一区间电弧信号波动的特点与图 6 完全不同。

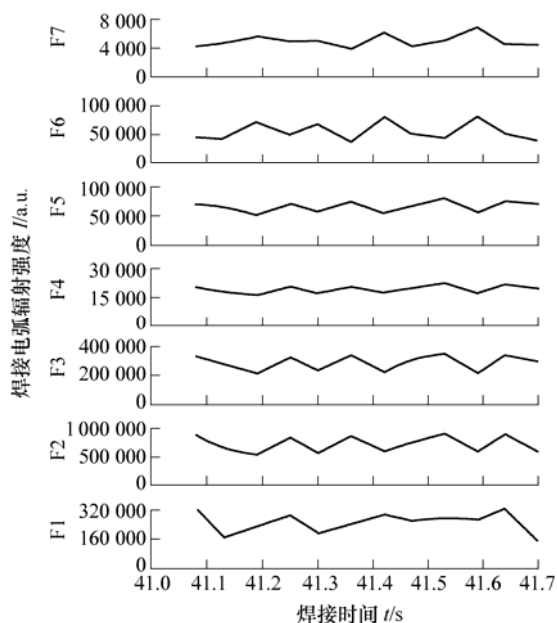


图 7 41~42 s 焊接过程 1 对应的的光谱信号

通过图 6、7 可以看出,焊接过程中由于电弧弧长的波动造成熔滴过渡形态的变化,可从电弧光谱信息中得到准确判识,对于瞬时电流的变化造成焊道宽度变化,也可从焊接过程光谱信息中得到准确判识。

### 3.2 不同干扰因素在光谱信号中的反映

第 3.1 节的研究表明,正常焊接过程中一些轻微扰动造成的熔滴过渡形态,焊道成形可以在焊接电弧光谱信息中得到很好的反映。但实际焊接过程中,由于外界干扰和一些不可预测的因素,焊接过

程稳定性会受到很大影响,造成明显的焊接质量问题,这些焊接缺陷的检测及其影响因素判识,对于焊接过程的自动化生产非常重要。

通过引入干扰因素,造成焊接缺陷,并对焊接过程的光谱信息进行采集,研究不同干扰因素的光谱信息特征。图 8 为焊接过程 2 的光谱信号变化,图 9 为对应焊缝照片。在焊道上存在两个明显的成形不良区,但引起原因不一样,在前段,通过改变焊道表面状态,预制第一个干扰因素,在焊道后段,通过人为侧吹风,造成焊接过程不稳定,引起缺陷。两者造成的焊接缺陷相似,但干扰因素完全不同。

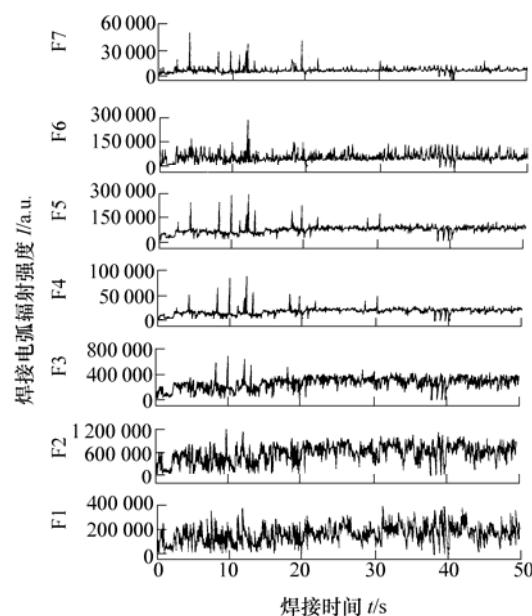


图 8 焊接过程 2 对应各特征谱段光谱信号



图 9 焊接过程 2 焊道照片

通过图 8、9 可以看出,在对应的缺陷段,光谱信号明显不同。在第一个干扰因素段(图 10),特征信号在 570~590 nm、615~680 nm、900~1 000 nm 谱段的信号特征最明显,出现明显异于正常焊接过程辐射的峰值,上述谱段不存在明显线谱聚集,而在其他线谱聚集区(无论是金属谱线还是氩谱线),特征信号受到较强谱线辐射的影响,信噪比不太好。结合焊接过程,分析产生上述特征信号的原因:由于预制了焊接表面状态异常干扰因素,不利于正常焊接过程,焊接时存在明显的爆炸飞溅过程,此爆炸飞溅造成了电弧辐射异常,基本辐射明显增强,在没有线谱的区域产生明显的特征信号,可以据此对焊接过程进行判识;实际上,在正常焊接过程中,由于自调节作用引起的弧长波动较大

时，也会瞬时出现爆炸过渡，带来上述缺陷，图5中前段出现的表面气孔，也可在对应谱段看到类似特征信号。

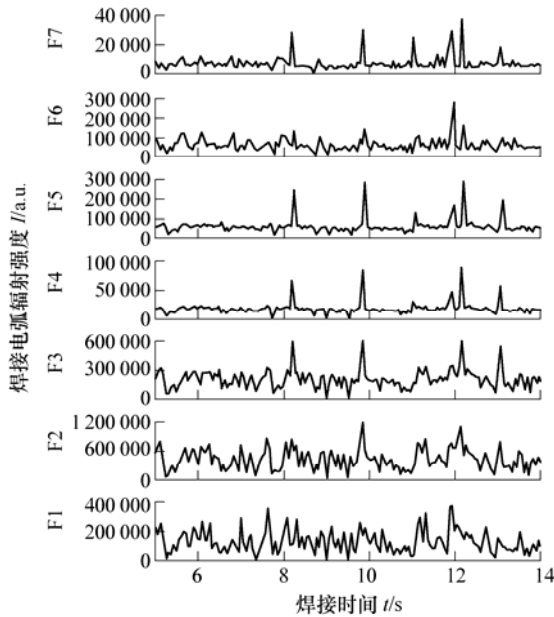


图10 5~14 s焊接过程2对应的光谱信号

在第二个干扰因素段(图11)，可以看出特征信号明显不同，在各谱段都发生了辐射规律性的缩小波动，在铁谱线密集的区段，缩小后又恢复到正常值，而在750~850 nm Ar谱线密集谱段，缩小后，再次恢复时存在一个向上脉冲，结合干扰因素分析产生上述特征信号的原因，由于外界侧吹风干扰，造成电弧中金属气氛、保护气体气氛迅速减少，引起电弧不稳定，辐射瞬时减少；等到电弧重新瞬时引燃时，金属蒸汽浓度很难在瞬时增加到一个较大值，所以辐射在此谱段仅恢复到正常值，而氩气流

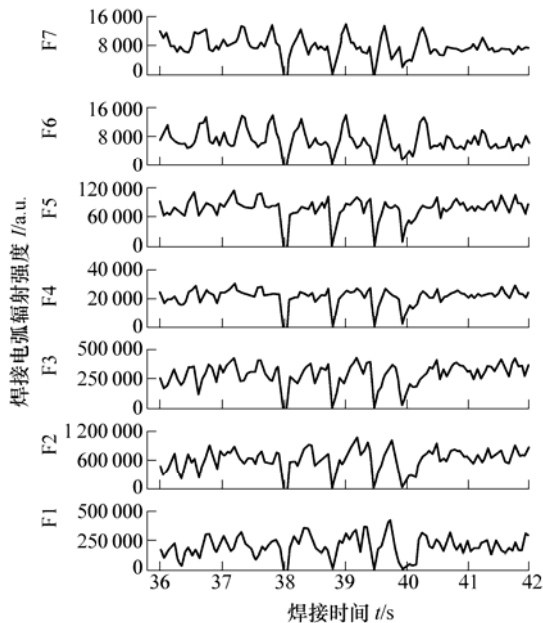


图11 36~42 s焊接过程2对应的光谱信号

量保持不变，瞬时恢复，根据第3.1节关于熔滴过渡的分析，金属气氛浓度的相对减少会使氩线谱辐射增加，图11所以存在一个向上的脉冲峰值。

通过对上述焊接过程干扰因素及其光谱特征信号的分析表明，不同干扰因素造成的焊接缺陷的光谱特征信号存在明显不同，可以据此对焊接过程质量实现分类辨识。

### 4 结论

(1) MIG焊接电弧光谱分布在不同谱段存在较大差别，金属谱线的最强区间出现在470~500 nm、510~550 nm间，在750~900 nm对应谱段以Ar I谱线为主；除了线谱聚集区外，还存在一些线谱影响较弱的区间，如570~590 nm、615~680 nm、900~1 000 nm。

(2) 弧长波动引起的不同熔滴过渡形态在光谱信息中能够得到明显反映。短路过渡的最好响应区间在250~300 nm、750~850 nm间，射滴过渡的最好响应区间在350~450 nm、500~550 nm、750~850 nm间。

(3) 干扰因素在光谱信号中能够得到反映。对于焊件表面状态变化引起的爆炸过渡，辐射信号在对应光谱信号得到明显反映，信噪比最好的响应谱段为570~590 nm、615~680 nm、900~1 000 nm等线谱较少的区间；对于由于侧吹风带来的干扰因素，在各谱段都有明显的特征信号，其中750~850 nm存在不同的信号特点；不同干扰因素在特征谱段的反映具有自身特点，可据此对干扰因素进行辨识。

### 参 考 文 献

[1] 蒋力培, 张甲英, 李鸿辉. 双波长滤光片式红外测量焊接温度场系统[J]. 焊接学报, 2001, 22(3): 1-4.  
JIANG Lippei, ZHANG Jiaying, LI Honghui. A real-time infrared measurement system of welding temperature field with the dual-wavelength type optical filter[J]. Transactions of the China Welding Institute, 2001, 22(3): 1-4.

[2] 闫志鸿, 张广军, 邱美珍, 等. 脉冲熔化极气体保护焊熔池图像的检测与处理[J]. 焊接学报, 2005, 26(2): 37-40.  
YAN Zhihong, ZHANG Guangjun, QIU Meizhen, et al. Monitoring and processing of weld pool images in pulsed gas metal arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institute, 2005, 26(2): 37-40.

- [3] 宋永伦. 焊接电弧等离子体的光谱诊断及其应用的研究[D]. 天津: 天津大学, 1990.  
SONG Yonglun. Spectroscopic study and its application in welding arc plasma[D]. Tianjin: Tianjin University, 1990.
- [4] LI Pengjiu, ZHANG Yuming. Robust sensing of arc length[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001, 50(3): 697-704.
- [5] 杨运强. 熔化极脉冲焊熔滴过渡的光谱在线传感与控制的研究[D]. 天津: 天津大学, 2002.  
YANG Yunqiang. The online sensor and control research of the GMAW-P droplets transfer's spectrum[D]. Tianjin: Tianjin University, 2002.
- [6] 潘存海, 杜素梅, 李桓, 等. 水下等离子弧局部热力学平衡态的判定[J]. 机械工程学报, 1997, 33(5): 12-16.  
PAN Cunhai, DU Sumei, LI Huan, et al. Judgement local thermodynamic equilibrium of underwater plasma arc[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1997, 33(5): 12-16.
- [7] PATRIZIA S, DARIO D B. On-line optical monitoring system for arc welding[J]. NDT&E International, 2002, 35(1): 37-43.
- [8] LI Pengjiu, ZHANG Yuming. Analysis of an arc light mechanism and its application in sensing of the GTAW process[J]. Welding Journal, 2000, 79(9): 252-260.
- [9] 李志勇, 王宝, 宋丽, 等. 干扰因素下药芯焊丝CO<sub>2</sub>气保焊接过程特征电信号的提取与分析[J]. 焊接, 2007 (1): 25-27.  
LI Zhiyong, WANG Bao, SONG Li, et al. Analysis on characteristic electrical signal of CO<sub>2</sub> shielded FCAW process with external disturbance[J]. Welding & Joining, 2007 (1): 25-27.
- [10] MIRAPEIX P B, GARCIA A, COBO A, et al. Real-time arc-welding defect detection and classification with principal component analysis and artificial neural networks[J]. NDT&E International, 2007, 40(4): 315-323.
- [11] LI Junyue, LI Zhiyong, LI Huan. Basic theory and method of welding arc spectrum information[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 17(2): 315-318.
- [12] AGAPION G, KASIOURAS C, SERAFETINIDES A A. A detailed analysis of the MIG spectrum for the development of laser-based seam tracking sensors[J]. Optical & Laser Technology, 1999, 31(2): 157-161.

---

作者简介: 李志勇, 男, 1972 年出生, 博士, 副教授。主要从事焊接电弧物理及其测控方面的研究。发表论文 18 篇。

E-mail: lizhiyong@nuc.edu.cn