

# 焊接电弧光谱信息测控技术及其应用

李俊岳, 杨运强, 李 桓, 张晓因, 杨立军

(天津大学材料学院, 天津 300072)

**[摘要]** 焊接电弧中含有丰富的光谱信息, 利用这些信息对焊接电弧这一复杂的物理现象进行测试(或称诊断)和控制, 是提高和发展焊接技术的一种非常有效的方法, 具有重要的理论和实际意义。文章论述了这方面研究的进展, 阐明了电弧光谱信息的测控原理, 介绍了电弧光谱信息在电弧诊断, 电弧气氛监控, 弧焊区成像, 特别是近年来在脉冲 MIG 焊熔滴过渡控制等方面的应用情况。同时, 还介绍了这一技术在等离子体现象中的一些重要应用, 并总结出几点基本看法, 指出了它的发展方向。

**[关键词]** 光谱信息; 焊接电弧; 等离子体; 诊断; 自动控制

焊接电弧中含有丰富的光谱信息, 它是认识焊接物理过程的丰富源泉, 是控制焊接物理过程, 实现焊接自动化的先行要素, 是继电弧电信号后的新兴信号源<sup>[1,2]</sup>。

对焊接电弧测试与对一般环境的测试有很大不同, 首先, 电弧温度高, 很难进行直接测量, 一般只能进行间接测量。其次, 熔滴过渡、电源波动、气流变化等因素对电弧的扰动, 使电弧中各种被测量存在时变性, 这种时变速度往往很大, 具有随机性。第三, 电弧空间小但温度梯度大, 各种粒子成分在空间分布很不均匀。第四, 电弧所处的温度范围一般为 5000~30000K, 是一种部分电离的低温等离子体, 它的粒子中不仅有电子、离子, 还有原子和分子, 而且常常是多种元素的离子、原子和分子同时存在, 粒子成分很复杂, 被认为是最难测的温度段。所有这些给焊接电弧测试带来很大的不便, 而光谱法对克服这些困难具有很大的优越性。

## 1 电弧光谱信息的测控原理

众所周知, 焊接电弧是一种气体放电现象, 光辐射是焊接电弧最明显又是最基本的一种物理现

象。从光辐射理论可知, 电弧光辐射主要有以下过程: 运动着的电子和离子相互碰撞时电子在库仑场中加速或减速产生一种最普遍的辐射, 称之为韧致辐射(自由-自由,  $f-f$  跃迁), 表现为连续光谱辐射; 电子与离子碰撞时产生复合而产生的辐射称之为复合辐射(自由-束缚,  $f-b$  跃迁), 亦为连续光谱辐射, 产生这种辐射时, 除了释放自由电子的动能外, 还要释放电离能, 因此, 其光子能量大, 辐射波长短, 气体元素和许多金属元素的复合辐射分布在真空紫外区; 原子中处于激发态的束缚电子跃迁到较低能态时产生的辐射, 称之为束缚辐射(束缚-束缚,  $b-b$  跃迁), 表现为线光谱辐射, 不同原子或离子所具有的光谱是不同的, 同时线光谱还会受到粒子本身和其他粒子运动状态的影响而发生展宽或频移。此外还存在回旋辐射、切伦科夫辐射等<sup>[3]</sup>。焊接电弧中的熔滴、熔池和高温固态金属可看成是准黑体, 发出近似黑体的辐射。黑体辐射亦是连续谱, 它在频域上的分布服从著名的普朗克定律。

电弧中的各种辐射都有各自的特性, 各有不同的应用。其中, 线光谱应用得最多, 连续谱和谱线

[收稿日期] 2001-03-18

[基金项目] 国家自然科学基金(59975068)及天津市自然科学基金(993602911)资助项目

[作者简介] 李俊岳(1932-), 男, 广东兴宁市人, 天津大学教授, 博士生导师

展宽法也都有一定的应用。

当系统处于热力学平衡态时,对于某种粒子(如某种元素的原子)从高能级  $m$  跃迁到低能级  $n$  时,相应于某一波长的光谱发射率(或称辐射密度)  $\epsilon_{mn}$  为:

$$\epsilon_{mn} = \frac{1}{4\pi} A_{mn} n_m h \gamma_{mn} \\ = \frac{1}{4\pi} A_{mn} h \gamma_{mn} \frac{g_m}{Z(T)} n_0 \exp\left(-\frac{E_m}{KT}\right) \quad (1)$$

式(1)中:  $A_{mn}$  为从高能级  $m$  向低能级  $n$  的跃迁几率,  $g_m$  为  $m$  能级上的统计权重,  $Z(T)$  为发射该谱线的原子的配分函数,  $E_m$  为高能级  $m$  的激发能,  $n_m$  为处于  $m$  能级激发态的原子数密度,  $n_0$  为发射该谱线的原子数密度。  $K$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为温度,  $h$  为普朗克常数,  $\gamma_{mn}$  为谱线频率。其中,  $A_{mn}$ 、 $g_m$ 、 $E_m$  对确定的原子谱线有一定的数值,可在有关文献中查阅。  $Z(T)$  可通过有关式子计算得到。

当系统处于热力学平衡状态时,原子的各能态间的分布服从波耳兹曼分布;初态原子(或离子)与进一步电离时粒子间的分布服从沙哈分布;双原子分子分解为原子时粒子间的分布服从质量作用定律。

波耳兹曼分布:

$$\frac{n_m}{n_0} = \frac{g_m}{Z(T)} \exp\left(-\frac{E_m}{KT}\right) \quad (2)$$

式(2)中符号含义与式(1)相同。

沙哈分布为:

$$\frac{n_{r+1} n_e}{n_r} = \frac{2Z(T)_{r+1}}{Z(T)_r} \frac{(2\pi m_e KT)^{3/2}}{h^3} \exp\left(-\frac{E_{r+1}}{KT}\right) \quad (3)$$

式(3)中  $n_e$  为电子数密度;  $n_r$ 、 $n_{r+1}$  各为  $r$ 、 $r+1$  次电离的离子数密度,  $Z(T)_r$ 、 $Z(T)_{r+1}$  各为  $r$  次、 $r+1$  次电离离子的配分函数;  $m_e$  为电子质量;  $E_{r+1}$  为从  $r$  次到  $r+1$  次电离的电离能。其余符号含义与式(1)相同。对于一次电离,式(3)可写成:

$$\frac{n_1 n_e}{n_0} = \frac{2Z(T)_1}{Z(T)} \frac{(2\pi m_e KT)^{3/2}}{h^3} \exp\left(-\frac{E_1}{KT}\right) \quad (4)$$

对于双原子气体分子在电弧等离子体中的解离反应  $A_2 \rightleftharpoons A + A$ , 由质量作用定律有:

$$\frac{n_A^2}{n_{A_2}} = \frac{Z_A^2}{Z_{A_2}} \left(\frac{2\pi m_A KT}{h^2}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_{D,A_2}}{KT}\right) \quad (5)$$

式(5)中  $n_{A_2}$ 、 $n_A$  分别为分子和原子的数密度;

$Z_{A_2}$ 、 $Z_A$  分别为分子和原子的配分函数;  $m_A$  为原子的质量,  $E_D$ 、 $A_2$  为分子的解离能,其余符号含义与式(1)相同。

由于电弧对外表现为电中性,有准中性方程:

$$n_e = \sum_i n_i^+ + 2 \sum_i n_i^{++} + 3 \sum_i n_i^{+++} + \dots \quad (6)$$

式(6)中:  $n_i^+$ 、 $n_i^{++}$ 、 $n_i^{+++}$  各为第  $i$  种原子一次、二次、三次电离的离子的数密度;  $n_e$  为电子的数密度。

另外,等离子体内的压力服从状态方程:

$$p = \sum_j n_j KT - \Delta p \quad (7)$$

式(7)中:  $p$  为压力,  $n_j$  为电弧中第  $j$  种粒子的数密度,粒子种类包括电子、各元素的离子、原子以及分子;  $\Delta p$  为考虑到静电库仑力、电磁收缩力的压力修正值,它们各有公式可查<sup>[1-7]</sup>

由方程(1)可见,光谱发射率  $\epsilon_{mn}$  是温度  $T$  和原子数密度  $n_0$  的函数,因此,若能同时测得某元素两条谱线的发射率  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ ,利用方程(1)就可求解出电弧等离子体内某点的温度  $T$  和该元素的原子数密度  $n_0$ ,对其它元素亦是如此,可依次求得各元素的原子数密度  $n_0$ ,不过,这时对一种元素只取一条谱线就可以了。然后利用沙哈方程,准中性方程,解离方程可求出各元素的离子数密度  $n_i$ 、电子数密度  $n_e$  以及分子数密度  $n_{A_2}$ 。再利用状态方程可求出压力  $p$ 。由此可见,利用发射光谱可定量测得电弧等离子体内的各个状态参量,成为电弧光谱诊断的理论基础。进行上述工作时应注意:电弧等离子体应处于热力学平衡态(CET)或局部热力学平衡态(LET);各谱线强度必须是同时同点测得的,谱线的冻结速度应足够快。

由方程(1)~(7)可见,光谱发射率  $\epsilon_{mn}$  不仅与温度  $T$  和原子数密度  $n_0$  相联系,而且通过各个方程与其它各种粒子数密度及压力  $p$  相联系,即光谱强度与电弧这一热力学系统内的全部基本状态参量有关,是它们的函数。因此,将电弧光谱强度作为信息利用时,则电弧内的各种状态变化都可通过这一信息得到反映,使光谱信息成为反映电弧过程的最丰富的信息源。

利用光谱信息测控焊接电弧的技术基础是借助光谱仪将电弧光辐射分解为光谱,选择出特征谱线,再依靠光谱强度与电弧等离子体内部的温度、粒子浓度和成分等因素的关系来反映和测定电弧内部的物理状态和过程,然后将所测的结果作为控制

信号实时反馈到控制系统，对电弧过程进行控制。前一步为测试（或称诊断），后一步为自动控制。图 1 是光谱测控装置的原理图。与现有其他方法相

比，光谱法具有以下一系列优点：信息丰富，灵敏度高、选择性好，响应速度快，无介入性、抗干扰能力强，时空分辨率高等。

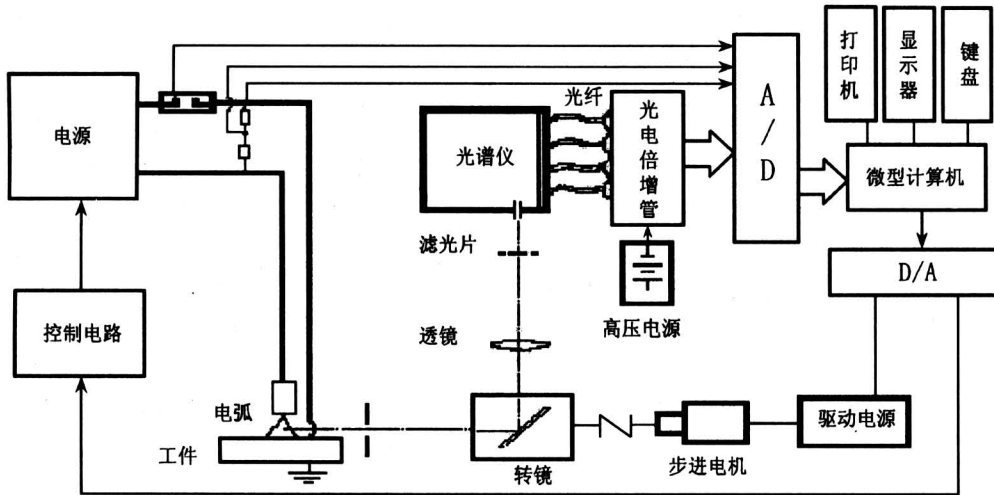


图 1 电弧光谱测控装置的原理图

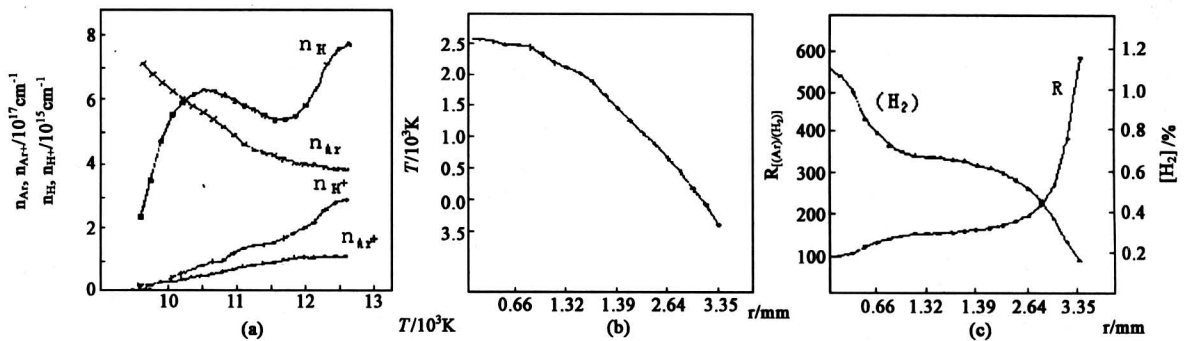
Fig.1 Diagram of the experimental apparatus for arc spectral measurement and control

## 2 电弧光谱的研究应用情况

### 2.1 在电弧温度、成分、浓度等测试方面的应用

20 世纪 60 年代，Griem 等人从量子理论和统计力学的角度，系统地阐述了定量光谱测试的理论<sup>[6]</sup>，提供了关于原子和离子的跃迁几率、谱线强度、展宽和位移等详细数据，并给出了理论模型的实用判据及各种诊断方法的应用实例，从而使等离子体光谱诊断法在理论和实验上都日趋成熟。近年来，光谱诊断在实验技术和测试装置上均有了较大的改善。计算机控制的光电直读式诊断装置和一些专用设备的出现，不仅提高了光谱信息在时空上的分辨率，而且增强了数据处理能力。在焊接技术方面，电弧光谱测试技术的研究起步于 60 年代，现在已取得很大的进展，在许多方面都得到了应用。据文献<sup>[7]</sup>介绍，早在 60 年代，E.A.Smars 就根据氩的激发和电离产生的谱线，确定铝极 MIG 焊电弧温度。Smars 还对铁极 MIG 电弧做了测温研究，发现其轴向温度为 8 000 K。70 年代以来 H.Ton 用光谱法研究 MIG 等离子体的电弧温度和成分。进入 80 年代以来，文献<sup>[2, 4, 8]</sup>对焊接电弧光谱诊断进行了较为系统的研究，获得了对

电弧等离子体具有局部热力学平衡及光学薄性质的认识。建立了电弧光谱诊断装置，分别对 TIG 焊，MIG 焊电弧的温度场、压力场和混合气体电弧成分分布进行了测定。提出了多线光谱测试法，解决了多成分电弧、最难测温度区、多参数同时测定的问题。图 2 是文献<sup>[2]</sup>利用光谱法所测得的 Ar + H<sub>2</sub> 电弧的温度与成分分布，并由此开发出电弧中有害氢的实时监控法。文献<sup>[9]</sup>研究了氩-氮电弧的热特性，指出这种电弧所具有的高热、高能量密度的现象、机理及其应用价值，为在实际生产中应用这种电弧提供了理论指导。文献<sup>[10、11]</sup>开展了对焊接电弧紫外辐射的研究并初步获得了紫外辐射光谱在频域和空域上的分布特征，进行了焊接生产安全防护方面的探索。文献<sup>[12]</sup>开展对水下焊条电弧温度和成分的光谱测试，获得了该电弧温度和其气氛中氢氧组分浓度的物理参量，指出水下焊条电弧气氛中的氢的浓度可高达 50%，难以用常规手段通过提高焊条药皮中的氧来抑制氢，并解释了水下电弧焊缝熔宽窄熔深大的原因是由于氢和水对电弧的压缩。以上可见，通过电弧光谱测试不但使我们加深了对电弧的认识，而且能指导我们对相关焊接产品的开发。



(a) - 不同温度下各种粒子数密度  $n$  的分布; (b) - 沿半径方向的温度  $T$  的分布;  
 (c) - 沿半径方向的氢氢浓度比值  $R$  和氢当量浓度  $[H_2] \%$  分布;

图2 利用光谱法所测得的 Ar + H<sub>2</sub> 电弧的温度与成分分布

Fig.2 Temperature and component distribution for Ar + H<sub>2</sub> welding arc

## 2.2 在焊接电弧气氛实时测控方面的应用

电弧气氛测控是电弧光谱测试技术最直接的应用。J.E.Shea 等利用氢光谱实时监控焊接电弧中的氢污染以控制焊缝金属中的氢和氢气孔<sup>[13]</sup>，美国军队结构工程研究实验室 (CERL) 的 D. R. Blackmon 等人利用光导纤维束收集电弧 300 ~ 1200nm 的电弧光并传导至光谱仪入口狭缝，在光谱仪出口狭缝处接收光谱信息，分辨率大约 0.06nm。然后进行高速 A/D 转换并送计算机进行分析处理<sup>[14,15]</sup>。利用这些光谱信息就可以进行焊接实时控制；亦可以将这些数据存储起来以备今后的进一步分析处理。使用这一技术，可以检测出含量小于 0.25% 的电弧氢，大大地减小了由于电弧氢而引起的开裂。同时只要电弧在燃烧，利用相同的方法，就可以检测氩弧焊时氩气的流量，而不致于由于氩气流量变化而引起气孔等缺陷。第三种应用是可以实时检测药芯焊丝焊接时药粉的不连续；在此之前，只能通过破坏性试验才能检测。

文献 [4] 研制了一种能监测焊接电弧中氢污染的小型仪器，通过滤光片（即特定波长的光谱窗口）来接收所需要的辐射光谱信号，实时分析监控焊接电弧中的氢。当电弧中氢的浓度超过一定值时，自动报警并发出调整电弧气氛的控制信号，达到焊接电弧气氛自动测控的目的（参见图 3）。

## 3 焊接电弧光谱测控技术在弧焊视觉成像和焊缝跟踪上的应用

文献 [16] 对电弧辐射的空间分布特性进行了

调查（图 4）。由图可见，弧焊区的线光谱辐射由保护气体粒子和金属蒸气粒子的谱线组成，各线光

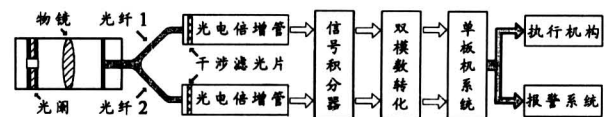


图3 焊接电弧氢污染光谱监控器的原理图

Fig.3 Principle of hydrogen pollution detection and control instrument of welding arc

谱在电弧空间出现的位置存在着显著的不同，氩原子谱线贯穿电弧上下空间，在电弧中部强度最大，电弧上下部分强度明显减小；氩离子谱线仅出现在电弧上部电弧弧心区域；金属谱线主要出现在电弧下部靠近熔池的电弧空间。文献 [17] 亦得出类似的结果（参见图 5）。电弧光谱的这种分布情况，使利用电弧光谱研究弧焊视觉成像和焊缝跟踪成为可能。文献 [16, 18, 19] 等通过测试和分析焊接电弧各区域不同谱线发光情况，选择了特定的光谱窗口，调节电弧各部分光强，使摄像机能避开强烈的弧柱弧光，获得熔池和焊缝图像。文献 [20] 通过对电弧光谱进行机器人弧焊视觉跟踪研究，得到了最佳的窄带，应用于弧焊机器人的视觉系统中，取得了初步的研究成果。1987 年，美国麻省理工学院 E.W.Kim 等利用双单色仪对 TIG 焊电弧 408 ~ 730 nm 区域进行了研究，找出了几个所谓光谱盲区的光谱窗口，并对这些窗口进行了摄像<sup>[21]</sup>。结果表明，对 He 保护的 TIG 电弧几乎看不到电弧，但 Ar 保护的电弧仍有较强的弧光。

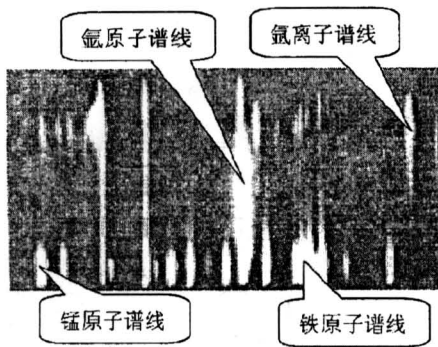


图 4 TIG 焊电弧光谱图

Fig.4 spectral picture of TIG welding arc

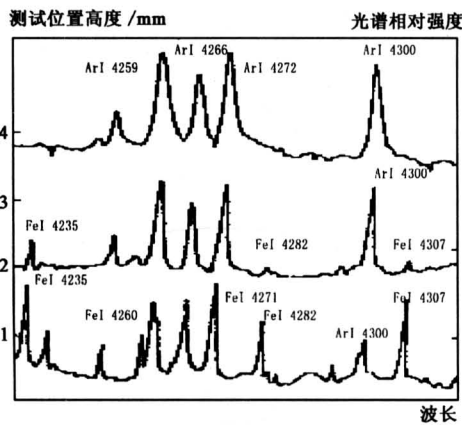


图 5 TIG 焊电弧中各谱线强度的空间分布

Fig.5 Spectral space distribution of various component in TIG welding arc

### 4 焊接电弧光谱测控技术在焊接熔滴过渡精确控制中的应用

过去 MIG 和 MAG 焊中主要是控制焊接电流和电压这两个工艺参数，熔滴过渡状态只是间接地粗略确定，为实现对熔化极脉冲气体保护焊熔滴过渡的精确控制（如 1 脉 1 滴等），焊接研究者相继开发了协同控制法、电弧音频控制法，电弧弧光光强控制法等，但由于焊接电弧的复杂性，都难以得到精确的控制。文献 [22~26] 对焊接电弧光谱信息进行了深入的研究，提出了光谱法控制脉冲 MIG 焊熔滴过渡的方法。

光谱法控制熔滴过渡这一思想最先见于文献 [8]，笔者在利用光谱光电测试法观察自由过渡 MIG 焊熔滴过渡时发现，电弧电压、焊接电流波形变化不大，很难从电信号中判断熔滴过渡频率，但观察光谱信号时发现铁和氩谱线强度除了随电源而波动外，还存在准周期性的起伏变化（图 6），变化幅度平均值均在 40% 以上。文献 [25] 再一次证实各种气保护焊的熔滴过渡中，即使在电流和电压波形总体平稳的高频过渡的射流过渡中也都存在随熔滴过渡出现的呈显著脉动的电弧光谱信号（图 7）。

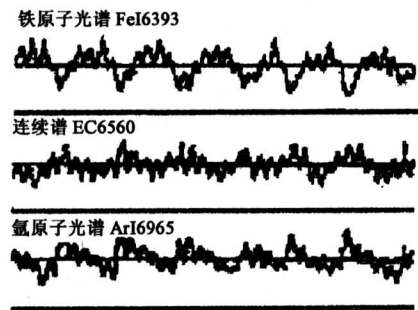
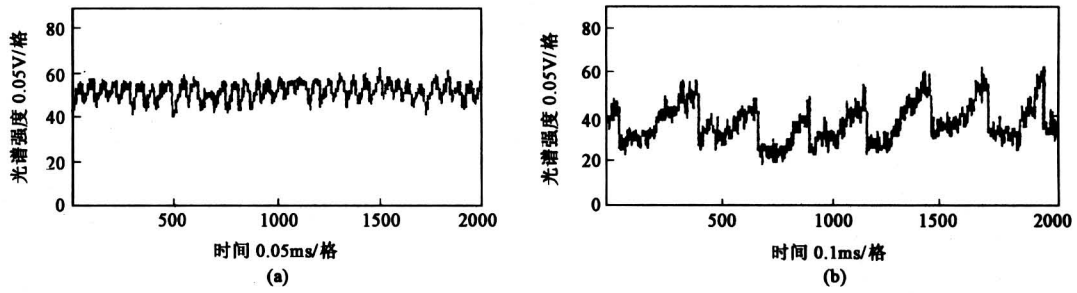


图 6 MIG 焊电弧光谱的时域分布<sup>[8]</sup>

Fig.6 spectral distribution with time of MIG welding arc

文献 [22、26] 对脉冲 MIG 焊的光谱信息进行了深入的研究，取得高品质的反映脉冲 MIG 焊的光谱信号（图 8）。从图 8 可见，不论是 1 脉 2 滴或是 1 脉 3 滴，光谱信号波形均呈现大幅度的脉动，清晰，易于识别。可以说，电弧光谱信号在反映熔滴过渡方面具有比电弧电信号、光强信号更为优越的信号品质，它不仅可检测熔滴短路过渡，而且可有效地检测自由过渡（射滴过渡、射流过渡以及脉冲过渡）。文献 [27] 通过利用微机控制的光谱光电采集系统与同步高速摄影配合进行实验，证明了光谱谱线波形脉动确是熔滴过渡的反映，两者之间存在明显的对应关系。文献 [26] 在前面研究的基础上提出了脉冲 MIG 焊 1 脉 1 滴（1 峰 0 基）熔滴过渡的光谱控制法，建立了一套脉冲 MIG 焊熔滴过渡的光谱检测与控制装置，以此对脉冲 MIG 焊熔滴过渡进行控制，控制效果很好。图 9 为 1 脉 1 滴光谱控制结果的波形。如果能对此系统小型化，那么，这种方法大有推广应用价值。



37V, 220A, Ar: 16L/min, 焊丝 H08: 直径 1.0mm

28V, 160A, Ar+CO<sub>2</sub>: 20L/min, 焊丝 H08: 直径 1.0mm

(a) 射流过渡

(b) 射滴过渡

图7 不同工艺条件下熔化极电弧特征谱线信号的波形

Fig.7 Characteristic spectrum waveform of MIG/MAG welding arc under different welding condition

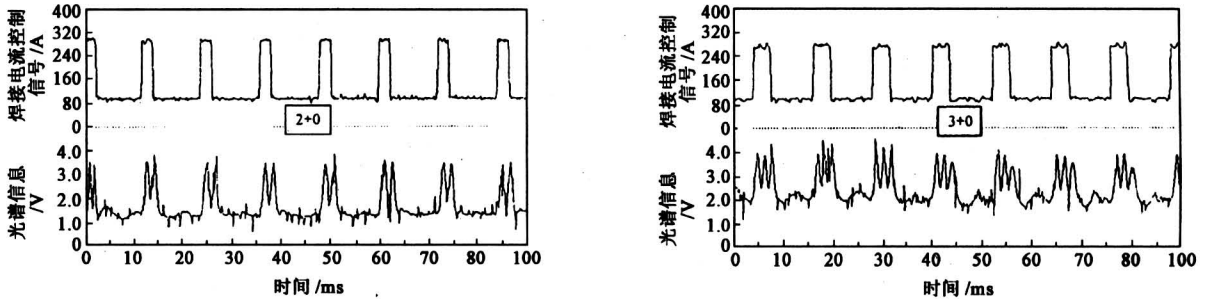


图8 脉冲MIG焊熔滴过渡的光谱信号

Fig.8 Spectral signal of droplet transfer in P-MIG welding

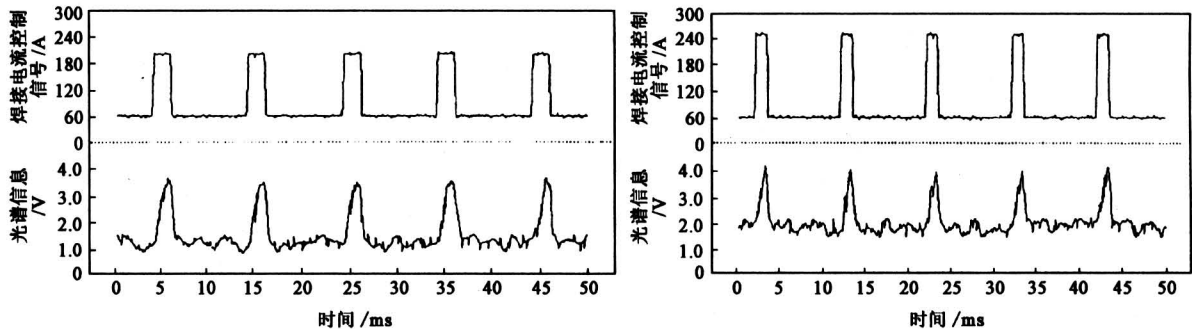


图9 脉冲MIG焊熔滴过渡1脉1滴光谱控制结果的波形

Fig.9 Experiment waveform of one droplet per pulse transfer controlled by spectrum in P-MIG welding

### 5 电弧光谱测控技术在等离子技术上的应用

在信息材料工业中,为了得到高纯度的高熔点物质,如硅、钨晶体等,先通过一般冶金方法冶炼得到一定纯度,然后再采用等离子弧重熔方法得到纯度更高的这些物质,称为等离子提纯法。由于无

法在重熔时实时知道其纯度,以至要通过多次重熔,多次检测,才能达到预期的质量要求,生产率很低。文献[28]通过对提纯炉中等离子气氛的发射光谱进行分析,找出几根强度足够大的谱线作为检测线,同时,其连续谱背景及其近旁的其它元素谱线也较小(邻线干扰小),利用电弧光谱测控原理确定电弧中杂质的含量,达到了实时控制其冶金

质量，实现一次性提纯，大大提高了这类物质生产效率并降低了生产成本。

文献 [4] 利用光谱法对纯氩保护碳极等离子堆焊电弧特性进行了研究，结果发现，碳极等离子弧光谱主要成分为氩（保护气体）和来自阴极的碳。通过选用 2 条氩原子谱线和 1 条碳原子谱线并对电弧不同高度上 3 个截面进行扫描，测得碳极等离子弧 75% 以上电弧空间温度在 1 200 K 等温线以下，图 10 为碳极堆焊等离子弧的光谱诊断结果。实验测得电弧轴向和径向上温度梯度都相当小，尤其在距阳极（工件）位置，在直径为 8 mm 范围内，电弧中心与边缘温度差仅 120 K/mm 左右。在 8 mm 范围内，堆焊基体表面上电流密度和电弧压力分布显得非常均匀。同时发现，对于用纯碳电

极，在焊接规范较小时，碳的光强信号随时间发生有规律的涨落（图 11），而氩谱线光谱信号并未出现大的波动，说明此时电弧温度的时间分布是稳定的，而碳光谱的时间分布说明，在此过程中发生了由于碳的输运而导致的电弧中碳的浓度变化。碳弧中碳的这种浓度起伏与阴极斑点运动密切相关，当电弧能量进一步提高时，浓度起伏消失，表明，用碳极等离子堆焊温度分布平缓，有效地改善了电弧的柔性和能量输送的均匀性，对粉末堆焊过程非常有利。并且在采用较大焊接规范或利用含芯碳极作电极时较易建立均匀成分的堆焊过程，从而使碳极等离子弧作为粉末堆焊热源的一个国家发明专利在理论上得到充分的解释。

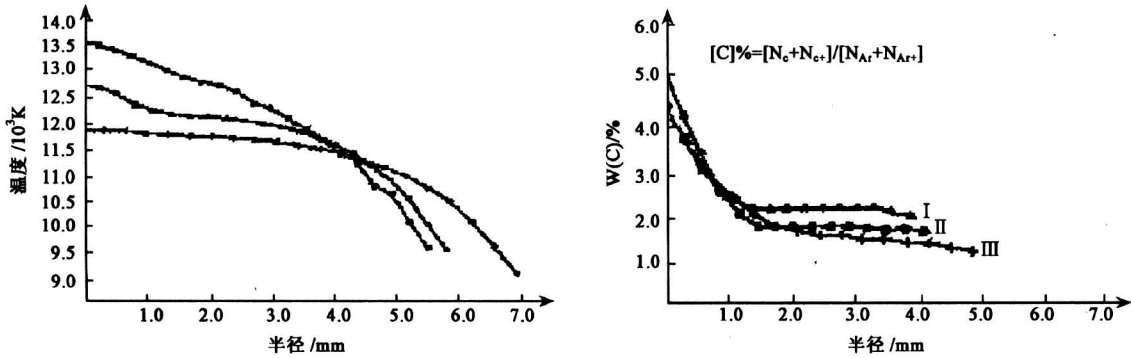


图 10 碳极堆焊等离子弧的光谱诊断结果

Fig.10 Spectral diagnosis result of plasma arc with carbon electrode

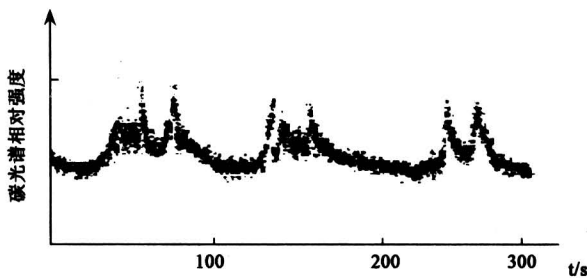


图 11 碳极堆焊等离子弧碳光谱强度的时间分布  
Fig.11 Distribution of carbon spectrum intensity with time in carbon electrode plasma arc

文献 [29] 利用 Stark 谱线展宽法测量水下等离子弧的电子密度，以判断它是否满足局部热力学平衡 (LTE)，结果见表 1。该文献给出了等离子

弧达到 LTE 的临界电子密度为  $(6.0 \sim 9.0) \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ 。满足 LTE 的电流下限为 150 A；以电弧轴线为心，半径 2.5 mm 的范围内达到 LTE；随着电流增加，满足 LTE 的范围会略有扩大。并指出，在满足 LTE 的范围内，采用光谱诊断水下等离子弧是可行的。

以上几个例子说明，电弧光谱信息测控技术已在等离子技术和在激光加工等离子体中获得应用。随着等离子技术和激光技术的发展，相信今后会得到更多的应用。

### 6 结论

电弧光谱信息技术以光谱学和等离子体物理学为基础，综合两者中相关的物理方程，形成了它可进行定量计算的用光谱法诊断焊接电弧等离子

论基础。

表1 利用 Stark 谱线展宽法测量水下等离子弧电子密度的结果<sup>[29]</sup>

Table 1 Electron density of the underwater plasma arc measured by Stark spectrum widening method

截面位置	测量位置 /mm	250 A		200 A		150 A	
		Stark 展宽 $\Delta\lambda_{1/2}^s/\text{nm}$	电子密度 $n_e/\text{m}^{-3}$	Stark 展宽 $\Delta\lambda_{1/2}^s/\text{nm}$	电子密度 $n_e/\text{m}^{-3}$	Stark 展宽 $\Delta\lambda_{1/2}^s/\text{nm}$	电子密度 $n_e/\text{m}^{-3}$
A-A	1.0	11.828	$4.02 \times 10^{23}$	9.360	$2.83 \times 10^{23}$	5.743	$1.36 \times 10^{23}$
	2.5	10.202	$3.22 \times 10^{23}$	8.572	$2.48 \times 10^{23}$	5.515	$1.28 \times 10^{23}$
	3.5	6.373	$1.59 \times 10^{23}$	4.772	$1.03 \times 10^{23}$	3.779	$0.73 \times 10^{23}$
B-B	1.0	6.664	$1.70 \times 10^{23}$	6.533	$1.65 \times 10^{23}$	4.641	$0.99 \times 10^{23}$
	2.5	7.050	$1.85 \times 10^{23}$	6.453	$1.62 \times 10^{23}$	6.048	$1.47 \times 10^{23}$
	3.5	4.152	$0.83 \times 10^{23}$	3.848	$0.75 \times 10^{23}$	3.639	$0.69 \times 10^{23}$

光谱强度与电弧这一热力学系统的全部基本状态参量有关,是它们的函数,因此,从热力学角度说明,电弧内的各种状态变化都可通过光谱信息得到反映,使光谱信息成为最丰富的信息源。

电弧光谱信息技术已在焊接过程的研究和控制中得到了多方面的应用,现在正向着设备小型化和焊接在线应用方向发展。

焊接电弧是一种非常复杂多变的低温等离子体,有广泛的代表性,有关它的光谱测控技术对其它学科有较大的参考价值,目前在等离子体技术和激光加工技术中已得到一定的应用,未来在其他领域(如新材料制取和航空航天技术等)也会有用,有广阔的发展前景。

#### 参考文献

- [1] Li Junyue, Song Yonglun. Spectral information of arc and welding automation[J]. *Welding in the world*, 1994, 34(9):317~324
- [2] Li Junyue, Song Yonglun. Measurement of hydrogen in a welding arc[J]. *Welding research abroad*, 1989, 35(6、7):2~6, and *Welding international*, 1988, (12):1122~1126
- [3] 金佑民. 低温等离子体物理基础[M]. 北京:清华大学出版社, 1983
- [4] 宋永伦. 焊接电弧等离子体的光谱诊断及其应用的研究[D]. 天津大学博士学位论文, 1990
- [5] 李俊岳, 韦福水, 宋永伦, 等. 焊接电弧氢的测试法的研究[J]. *焊接学报*, 1987, 8(3):123~132
- [6] Griem H R. *Plasma Spectroscopy*[M]. New York: McGraw-Hill, 1964
- [7] Lancaster J F. *The Physics of welding*[M]. International institute of welding, Pergamon press, 1986
- [8] 苏跃珍. 熔化极气体保护焊电弧的光谱诊断[D]. 天津大学硕士学位论文, 1988
- [9] 李桓, 李俊岳, 李益山, 等. 钨极氩-氮电弧的高热特性[J]. *焊接学报*, 1993, 14(2):125~131
- [10] 韩国明, 李俊岳, 吴钊, 等. 焊接电弧紫外光谱的分布特征[J]. *焊接学报*, 1999, 20(4), 138~145
- [11] 李研. TIG 电弧紫外辐射的研究[D]. 天津大学硕士学位论文, 1992
- [12] 王国荣, 刘世明, 宋永伦. 水下焊条电弧温度与成分的光谱诊断[C]. 1993 年全国焊接年会论文, 1993
- [13] Shea J E, Gardner C S. Spectroscopic measurement of hydrogen contamination in welding[J]. *Welding International*, 1988, (12):1122~1126
- [14] Blackmon D R, Kearney F W. A real time approach to quality control in welding[J]. *Welding Journal*, 1983, 62(8): 37~39
- [15] Blackmon D R, Hock V F. An opto-electronic technique for identify weld defects in real time[J]. *Sample Quarterly*, January, 1984
- [16] 杨运强. 弧焊区光谱特征及其在弧焊视觉传感法上的应用[D]. 天津大学硕士学位论文, 1990
- [17] Song Yonglun, Yang Yunqiang, Li Junyue. Some physical properties of aluminum welding arc[C], collection of papers of Sino-Japanese conference on light mater welding, 1990, june 5~9, Tianjin, China, 210~216
- [18] 宋永伦, 李俊岳. 弧焊区图像信息的光谱传感技术[J]. *焊接学报*, 1992, 13(2): 127~132
- [19] Song Yonglun, Li Junyue. Spectral image method for joint tracking in arc welding[J]. *China Welding*, 1993 (2): 150~154
- [20] 吴仁育, 王国栋, 李晓奇. 机器人电弧焊图像视觉跟踪系统[C]. 1993 年第七届全国焊接学术会议论文集(第六册), 283~287



- [21] Kim E, W. Visible light emission during gas tungsten arc welding[J]. *Welding Journal*, 1987, 66(12): 369~377
- [22] 李俊岳, 杨立军, 胡胜钢, 等. 脉冲 MIG 焊熔滴过渡光谱信息的研究[J]. *中国工程科学*, 2000, 2(7): 76~83
- [23] 柳刚, 李俊岳, 李桓, 等. 焊接电弧光谱的分布特征[J]. *机械工程学报*, 2000, 36(5): 58~61
- [24] 柳刚, 李俊岳, 杨运强, 等. 熔化极气体保护焊熔滴过渡光谱信号的品质[J]. *天津大学学报*, 33(4): 474~478
- [25] 柳刚, 李俊岳, 李桓, 等. 以电弧光谱信号传感 MIG/MAG 焊熔滴过渡的工艺适用性[J]. *机械工程学报*, 2000, 36(10): 50~53
- [26] 胡胜钢. 脉冲 MIG 焊熔滴过渡光谱控制法的研究[D]. 天津大学博士学位论文, 1999
- [27] 柳刚, 李俊岳, 杨立军, 等. 熔化极气体保护焊电弧光谱信号脉冲特征的本质[J]. *焊接学报*, 2000, 21(1): 34~36
- [28] Amouroux J. The plasma process control by emission spectroscopy in the case of the purification of metallurgical grade silicon[C]. *Proceedings of the international conference on plasma science and technology*, 1986, Beijing, China, 226~231
- [29] 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

## Technology of Measurement and Control by Welding Arc Spectral Information and Its Application

Li Junyue, Yang Yunqiang, Li Huan, Zhang Xiaonan, Yang Lijun

(*Faculty of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

[**Abstract**] Welding arc is full of spectral information. Studying and utilizing the information to diagnose and control the welding arc is the most effective way to develop and improve the welding technology. Furthermore, it can be used to study and control other relative physical phenomena (such as gaseous plasma, laser processing plasma, underwater plasma arc, etc.). It is of great theoretical and practical significance. This paper has summarized the developing situation of the research on this field, expounded the principle of measurement and control by welding arc spectral information, described the application situation of welding arc spectral information, for example, the arc diagnosis, monitoring of arc atmosphere, imaging of arc welding region and control of droplet transfer in pulsed MIG welding, etc. At the same time, the authors have also introduced the application of arc spectral information in the development of plasma technology, such as in the development of plasma torch with carbon electrode and in the judgement of local thermodynamic equilibrium of underwater plasma arc. At last the authors have put forward some points of basic view on the technology and pointed out its developing direction.

[**Key words**] spectral information; welding arc; plasma; diagnosis; automation