

焊接电弧电离区域与边界的诊断

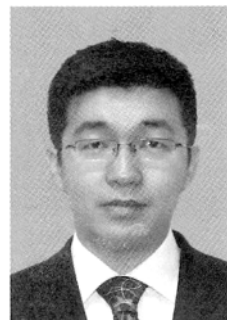
肖天骄, 宋永伦, 李超, 闫思博

(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

摘 要: 焊接电弧是一种以气体放电实现电热转换的热源, 其电离区域的尺度以及有效作用范围与其能量密度的分布有直接的对应关系。采用发射光谱诊断法, 通过对电弧径向的氩原子和氩离子谱线强度的定量检测, 获得了电弧内气体电离区域和气体原子激发辐射边界的尺度。克服了以往摄像手段由于曝光因素而无法定量观测电弧的问题, 并将电弧光谱边界测定方法应用于脉冲电弧的观测, 对电弧导电的物理概念以及电弧热源的建模等提供了认识的依据。

关键词: TIG 焊; 电弧边界; 电离区域; 电弧形貌; 光谱诊断

中图分类号: TG403 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2013)04-0043-05



肖天骄

0 序 言

焊接电弧因其高温、高辐射的特点, 难以直接对其观测。而光辐射是焊接电弧基本的物理现象^[1], 对电弧进行发射光谱的诊断, 为电弧电离区域及尺度的研究提供了一个有效的途径。

焊接电弧的光辐射主要来源于两个方面: 其一是气体重粒子在高温下受激发产生光量子辐射, 即电子在原子或离子的不同能级之间跃迁, 得到的是线光谱; 其二是电子与重粒子的碰撞辐射光量子, 包括自由-自由跃迁的韧致辐射和自由-束缚跃迁的复合辐射, 得到的是连续光谱。对于由氩气作为保护气体的 TIG 焊接电弧, 能够按不同的光谱辐射来源对应电弧空间的性质, 实现电弧电离区的离子辐射信息和电弧弱电离区原子辐射信息的检测。

以往对电弧的各电离区域一直未有准确的定义和解释。对其深入的认识, 不但可以在物理概念方面明确电弧的导电机理, 为不断发展的焊接电弧热源模型的建立^[2]、电弧等离子体的仿真等研究提供依据, 还可以在对等离子体电、热状态参数进行径向分布的 Abel 逆变换时, 减少由于边界值的测定误差而影响计算结果准确性^[3]。

文中结合前人研究经验, 采用发射光谱诊断方法对焊接 TIG 电弧的电离区域进行观测, 提出了一种电离区域与电弧边界的定量检测方法。

1 图像法观测焊接电弧的局限性

1.1 对电弧宏观形貌的影响因素分析

利用摄像手段观察电弧宏观形貌图像的方法广泛应用于焊接电弧现象的研究中^[4]。同时亦通过采用不同波长的窄带干涉滤光片, 观察电弧内的层次和焊接过程中电弧现象的变化^[5]。但是, 由焊接电弧的拍摄所得到的电弧形态并不能反映电弧内各区域的范围。电离区域范围会随着拍摄条件(曝光时间、光圈大小、滤光片选择等)的改变而发生变化。近年来国内外已有不少研究者对采用图像获得的电弧形貌以及分析的误差做了深入的论证。文中以直流 100 A 电弧摄像拍摄结果为例, 对比了加入滤光片(中心波长 484.4 nm, 带宽 10.1 nm)前后的拍摄效果。随曝光时间在 200 ~ 600 μ s 范围内变化的观察结果如图 1 所示, 可以发现电弧的内外层电离区域均随曝光时间的提高而有所增加。

滤光片的选通带宽也对电弧摄像结果有着重要作用。加入滤光片后观察到的电弧形态与直接拍摄的结果在电弧内部层次的表现上会有较显著的不同(图 2)。而且对于电弧形态的定量认知上, 也存在较大的差异。在不加入滤光片观测电弧时, 可以观察到电弧在空间内覆盖了更大的区域。另外, 对所选滤光片的透过光谱波段的不同也直接影响电弧的形态。选用蓝紫波段和红光波段观察到的电弧形态存在明显的电弧覆盖范围的变化, 所以传统的图像法难以定量测定电弧电离区域与电弧的边界, 需要提出新的测定方法。

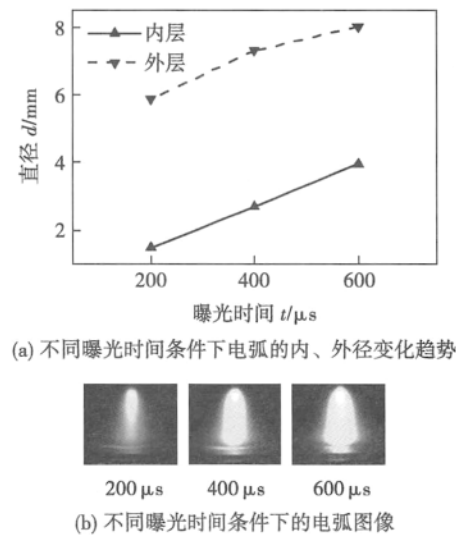


图 1 曝光时间与电弧边界的关系

Fig. 1 Relationship between exposure time and determination of arc edge

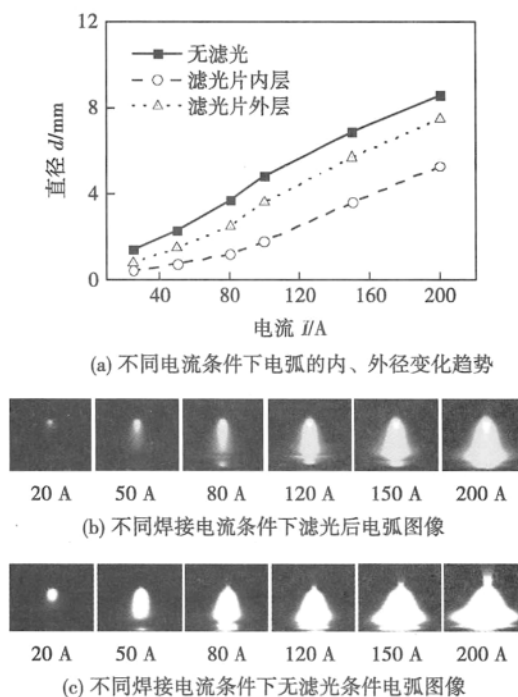


图 2 焊接电流与电弧边界变化关系

Fig. 2 Effect of welding current on arc edge

1.2 摄像法对电弧电离区域的定性分析

摄像方法是从电弧形貌与发光轮廓的宏观图像上获取电弧的各尺度信息,根据视觉观察对电弧边界做出测量。在相同的拍摄条件和曝光参数设置的前提下,仅能够定性分析某一因素改变而引发的电弧内各区域变化的趋势。图 3 为加入滤光片的条件下,焊接电流为 100 A 时焊接电弧光谱观测获得包含三条 ArII 谱线和一条 ArI 谱线的电弧图像,该光

谱窗口的光强最大通过率为 73.3%,电弧的其它光谱信息均被抑减。

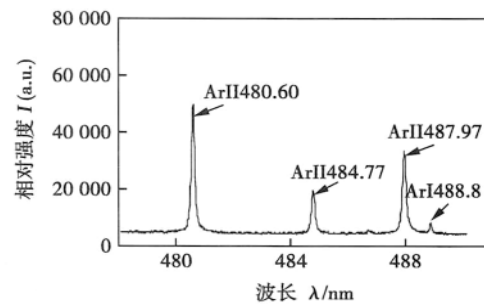


图 3 弧光通过滤光片后的谱线信息

Fig. 3 Spectrum information with filter

在试验中观察到了直流 25 ~ 150 A 范围内随电流升高,电弧形貌及轮廓也随之外扩。加滤光后的图像使电弧内外层区域及边界的差别变得较为显著(图 3)。在滤光片加入前后,电弧形貌随焊接电流变化的整体趋势相同,在滤光片加入后电弧的层次更为清晰,易于辨认电弧的轮廓变化。

2 光谱手段测定电弧电离区域

2.1 光谱诊断电弧电离区域谱线的选择

根据以往对 TIG 电弧观测与分析的基础,氩电弧等离子体内存在许多条能观测到的氩一次和二次谱线。在进行电弧各电离区域的检测时,需要考虑谱线的强度和信噪比,这是选择谱线灵敏度的主要方面。经 TIG 电弧试验条件下的观测,ArI 430.0 nm 和 ArI 696.5 nm 两条谱线具有相近的检出边界,能够检测电弧边界。同时参考氩离子谱线的分布、展宽和位移^[6],经比较与验证后选用 ArII 480.6 nm 的谱线对电弧内电离区域检测。谱线信息见表 1^[7]。其中 ArI 430.0 nm 因其随脉冲电弧变化明显而用于对脉冲电弧边界的诊断。

表 1 光谱诊断选用谱线信息

Table 1 Spectrum information for spectrum diagnose

谱线	波长 λ /nm	激发电位 E /eV
ArI	696.5	13.32
ArI	430.0	14.50
ArII	480.6	19.22

2.2 电离区域光谱测定方法

试验中的 TIG 电弧采用直流正接方式,由 Miller-Aerowave-300 焊接电源对其供电。焊枪固定在十

字滑台上以满足扫描电弧时轴向和径向的移动。电弧弧长为4 mm,钨极直径3.2 mm,钨极尖角 30° ,阳极材料选用4 mm厚不锈钢,高纯氩气保护,气体流量8 L/min。光谱采集系统包括光学透镜、美国AC-TON公司的光谱仪SpectrPro2750i(含ST-433型光谱仪控制器及PI-MAX增强型CCD)、光谱信号同步触发装置和数据采集分析装置。电弧信息采集系统如图4所示。

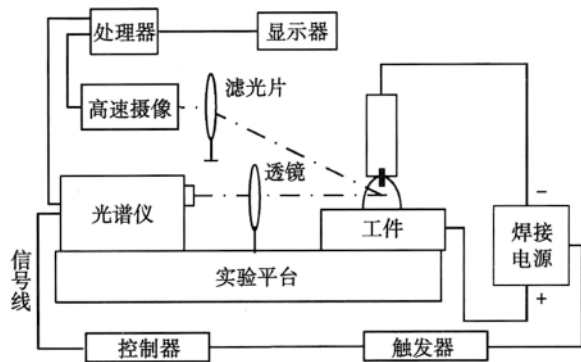


图4 焊接电弧信息采集系统

Fig. 4 Arc signal acquisition system

在光谱诊断电弧电离区域过程中,电弧检测位置选定于钨极尖端下方2.0 mm的径向截面,此观测位置能够尽量减少两电极金属蒸汽对检测过程的影响,检测扫描的位置见图5的虚线段,其中径向扫描精度为0.2 mm,焊接电流选用直流100 A。

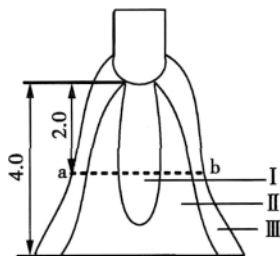


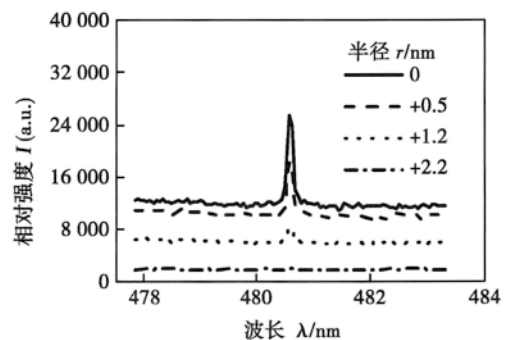
图5 电弧的光谱信息检测位置(mm)

Fig. 5 Partitions and measuring position of arc ion region size

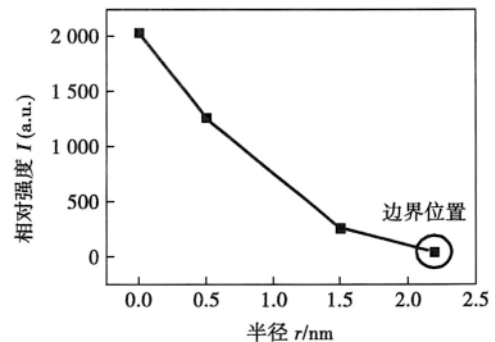
在图5所示电弧光谱测定位置进行水平扫描,根据电弧等离子体轴对称的性质,轴线中心位置的谱线累积发射单元及其积分强度均达到最大值;随着半径增加,在检测方向上的累积光强将逐步下降,因此试验中对电弧各区域边界的检出限值是以小于该谱线中心位置强度的10%作为判据。即在区域I内可检测到的氩离子谱线在物理意义上表征为部分氩原子受到激发而发生电离;在区域II和III,由于

激发条件的限制而未形成可测的氩离子数密度,但仍有相当数量的电子与氩原子在碰撞中实现能量传递,一方面激发了氩原子内电子跃迁导致的光辐射,另一方面产生了韧致辐射和复合辐射。

焊接电流为100 A时的电弧电离区域光谱测定的结果如图6、图7所示。光谱诊断发现,表征电弧电离区域的ArII谱线强度随着与电弧中心轴线距离增加而逐渐变弱;当二次谱线消失后,ArI谱线仍然在区域II和III内存在,直至ArI谱线完全消失即认定为电弧的放电边界。



(a) ArII 480.6 nm谱线随半径的变化



(b) ArII 480.6 nm谱线强度随半径的变化

图6 ArII 480.6 nm谱线强度测定结果

Fig. 6 ArII 480.6 nm spectrum intensity

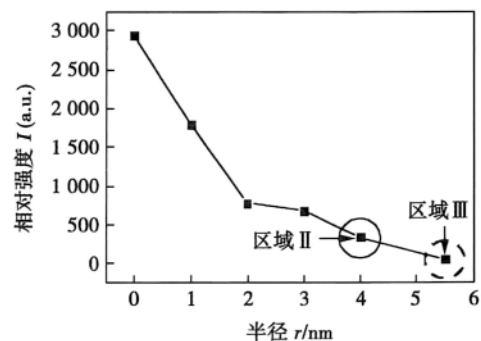


图7 ArI 696.5 nm谱线强度测定结果

Fig. 7 ArI 696.5 nm spectrum intensity

2.3 直流电弧电离区域的光谱诊断结果

根据上节对电弧电离区域的检测分析,测得各电流下的电离区域(表2),其随焊接电流的变化趋势见图8。在25~150 A的电流范围内,氩的一次和二次谱线的检出边界均随焊接电流的升高而增大。两者上升趋势相似,但随着电流值的升高,区域I和II的差值增加。内外径差值的变化说明焊接电弧随电流的增加,整个电弧的放电半径增大。但是作为核心导电通道的区域I的范围并非与电弧整体等量增长,说明电弧等离子体内高温区范围随电流的变化小于外层低温区的变化。此现象亦能解释为:当电流增大时电弧的“自磁收缩”效应会有所增强。

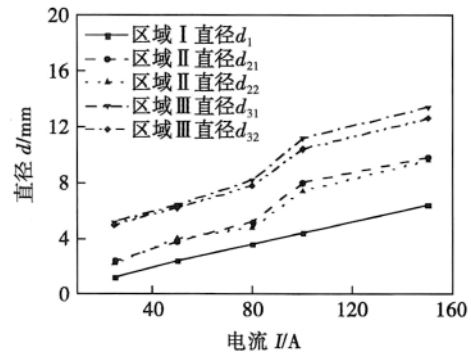


图8 光谱诊断方法测定的电弧电离区域随电流变化的趋势
Fig. 8 Effect of current on ion region of arc acquired by spectrum diagnose

表2 光谱诊断方法测定电弧电离区域随电流变化结果

Table 2 Effect of current on diameter of arc ion region acquired by spectrum diagnose

焊接电流 I/A	区域 I 直径 d_1 /mm (ArII 480.6 nm)	区域 II 直径 d_{21} /mm (ArI 696.5 nm)	区域 II 直径 d_{22} /mm (ArI 430.0 nm)	区域 III 直径 d_{31} /mm (ArI 696.5 nm)	区域 III 直径 d_{32} /mm (ArI 430.0nm)
25	1.2	2.4	2.2	5.2	5.0
50	2.4	3.8	4.0	6.4	6.2
80	3.6	5.2	4.8	8.2	7.8
100	4.4	8.0	7.4	11.2	10.4
150	6.4	9.8	9.6	13.4	12.6

2.4 脉冲电弧电离区域的光谱诊断结果

脉冲电弧与稳态电弧不同,因为焊接电流随时间周期性变化,故其电弧等离子体的状态也随焊接时间的改变而呈周期性的变化。

待测脉冲电弧的工艺参数设定如下:直流正接,方波脉冲频率为100 Hz,其中,峰值电流100 A,基值电流50 A,占比比50%。

脉冲电弧电离区域的诊断分别选用 ArII 480.6 nm, ArI 430.0 nm 作为测定谱线,这两条谱线更有利于观测基值和峰值差距较大的动态电弧电离区域的变化。脉冲电弧的光谱信息检测采用触发控制,光谱仪接入外触发信号,曝光时间设定为1 ms,触发时刻每次延时1 ms,采集10次信息后即可测定100 Hz 电弧内峰值和基值各五个时刻的谱线信息。测定位置为钨极下方距离钨极尖端水平2.0 mm处,与前述光谱测定稳态电弧的位置相同。水平扫描得到谱线检出变化。

这种观测方法可以对焊接电流处于峰值时刻和基值时刻电离区域动态变化的测定。测定结果见表3,电离区域随脉冲电弧的波形变化而改变,峰值阶段电离区域大于基值阶段,外径的变化相对明显。电离区域变化的周期与脉冲周期一致。说明脉冲工艺条件下,由于TIG电弧的峰值阶段电流较高,电弧空间的能量变化更为显著。

表3 光谱诊断方法测定脉冲电弧电离区域直径

Table 3 Effect on diameter of pulse arc acquired by spectrum diagnose

测定阶段	区域 I 直径 d_a /mm	区域 II 直径 d_b /mm	区域 III 直径 d_c /mm
峰值阶段	4.8	8.2	10.8
基值阶段	3.6	4.4	6.4

3 误差分析和讨论

3.1 误差来源及影响

电离区域诊断的误差主要来源于以下两个方面。一方面由于电弧自身辐射的波动,这会导致电弧电离区域测定的误差。即使是观测稳态电弧,其光辐射的波动也是一直存在的。波动的幅度较小,约在1%~2%之间,在后期的数据处理中,对测定结果影响较小。另一方面是测量装置,对电弧光谱扫描位置为0.2 mm/步,并以小于中心位置谱线强度的10%作为边界的判据。由此对电弧各边界的观测精度带来的最大误差为0.2 mm。

3.2 电弧区域诊断的验证

在焊接保护气内加入5%含量(体积分数)的氢气,利用H α 谱线信息验证电弧边界光谱诊断方法的可行性。图9所示分别为中心位置,以及三个导

电区域的边界位置的 Ha 谱线。计算各条 Ha 谱线的 Stark 展宽,根据 Stark 展宽与电子密度的关系式,得到各区域边界位置的电子密度,见表 4。

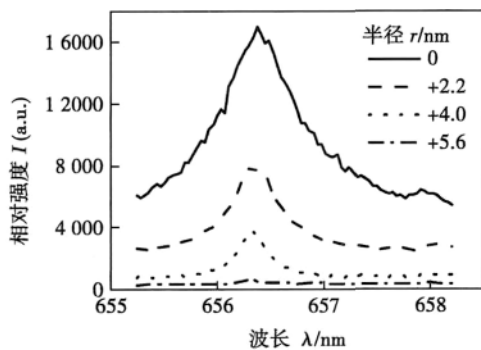


图9 各电弧区域边界位置 Ha 谱线测定结果

Fig. 9 Ha spectrum line of ion region locations

表4 电弧中心及各区域边界位置的电子密度

Table 4 Electron density of arc center and regional boundary locations

半径 r/mm	电子密度 $N_e/10^{22} \text{ m}^{-3}$	梯度 $/10^{25} \text{ m}^{-4}$
0	12.0	—
2.2	6.24	2.62
4.0	2.04	2.22
5.6	0.881	0.72

根据已有文献资料,一定温度下氩氢混合等离子体内各组分数密度^[8]与电导率、电流密度的计算公式为^[9]

$$\sigma = \frac{3.85 \times 10^{10}}{T^{0.5}} \times \frac{N_{A+}}{N_{A+}Q_i + \sum N_A Q_A} \quad (1)$$

$$j = \sigma E \quad (2)$$

式中: σ 为电导率; T 为温度; N_{A+} 为离子数; N_A 为离子总数; Q_i 、 Q_A 分别为电子和离子、电子和原子的碰撞截面; E 为电弧的电场强度; j 为电流密度。经试验测定,电场强度为 7.4 V/cm。进而得到电弧各区域的平均电流密度以及试验条件下直流 100 A TIG 电弧内各区域的电流均值(表 5)。

表5 各电离区域内的平均电流密度及通过的电流

Table 5 Average current density and current passing through of different ion region

电离区域	电流密度 $J/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	流过电流 I/A
I	604.4	50.9
II	177.5	34.5
III	44.9	12.0

表5 结果定量地反映了电弧各区域的电、热状

态及其差异,电弧中心的电离区域 I 通过的电流最大,导电能力最强,是电弧内能量传递的主通道。

4 结 论

(1) 提出了用光谱诊断方法对电弧内各辐射区域及其边界的定量检测。克服了以往采用摄像方法观测电弧只能对电弧形貌做出定性分析的局限性和较大的不确定性。

(2) 利用光谱诊断方法有效测定了试验条件下直流电弧和动态脉冲电弧各区域及边界的尺寸,并从气体放电的机理上解释了电弧内区域的物理意义。

(3) 利用保护气体中加入微量氢气对电弧区域与边界的光谱诊断方法做了验证,所测得电弧各区域的电子密度和电流密度的分析,有助于对电弧各区域的电热状态及其差异的认识。

参考文献:

- [1] 李俊岳,宋永伦,李 桓,等. 焊接电弧光谱信息的基本理论和基本方法[J]. 焊接学报,2002,23(12): 5-8.
Li Junyue, Song Yonglun, Li Huan, et al. Basic theory and method of welding arc spectrum information [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(12): 5-8.
- [2] 赵 明,武传松,赵朋成,等. GTAW 熔池形状数值模拟精度的改进[J]. 焊接学报,2006,27(3): 17-20.
Zhao Ming, Wu Chuansong, Zhao Pengchen, et al. Improvement on numerical simulation precision of GTAW weld pool geometry [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(3): 17-20.
- [3] Petrasso R, Gerassimenko M, Seguin F H, et al. Soft x-ray imaging instrument for the Alcator A tokamak [J]. Review of Scientific Instruments, 1980, 51(6): 585-591.
- [4] 薛家祥,张丽玲,刘 晓,等. TIG 焊视觉图像的二值形态学分析[J]. 焊接学报,2005,26(6): 25-27.
Xue Jiaxiang, Zhang Liling, Liu Xiao, et al. Morphological analysis of charge coupled device image of tungsten inert-gas welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(6): 25-27.
- [5] Tsukamoto S. High speed imaging technique Part 2-High speed imaging of power beam welding phenomena [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2011, 16(1): 44-55.
- [6] Chowdhury S S. Measurement of the shift-to-width ratio of Ar II 4806 Angstrom [J]. Journal of Physics B, 1969, 2(10): 1090-1093.
- [7] 光谱线波长表[M]. 北京: 中国工业出版社,1971.
- [8] 宋永伦. 焊接电弧等离子体的光谱诊断方法及其应用的研究[D]. 天津: 天津大学,1990.
- [9] Chapman S. The mathematical theory of non-uniform gases [D]. Cambridge University Press, London, 1952.

作者简介: 肖天骄,男,1985 年出生,博士研究生。主要从事焊接电弧等离子体物理及焊接质量控制方面的研究。发表论文 2 篇。
Email: frank1985319@163.com

of welding torch and the change of arc length was deduced , and a mathematical model was established for the arc length. Considering the characteristics and complexity of welding arc signal , the Gabor wavelet filter was used to eliminate the noise interference , and the feature vector was extracted from the sample data after filtering , and the dimension of data was reduced. The classifier of welding torch attitude according to the principle of Euclidean distance , real-time identification of the spatial attitude of welding torch was conducted with the steepest descent method of model parameters. The results show that the algorithm for recognition of spatial attitude of welding torch with swing of rotating arc sensor was simple and provided theoretical basis for improving the precision of welding seam tracking.

Key words: spatial attitude; welding torch; rotating arc; arc sensor; welding seam tracking

Low temperature sintering-bonding through in-situ formation of Ag nanoparticles using micro-scaled Ag_2O composite paste

MU Fengwen¹ , ZOU Guisheng¹ , ZHAO Zhenyu¹ , WU Aiping¹ , YAN Jiuchun² , Y. Norman Zhou^{1,3} (1. Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology (Ministry of Education) , Department of Mechanical Engineering , Tsinghua University , Beijing 100084 , China; 2. State Key Laboratory of Advanced Welding & Joining , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China; 3. Department of Mechanical and Mechatronics Engineering , University of Waterloo , Waterloo N2L 3G1 , Canada) . pp 38 - 42

Abstract: In order to reduce the cost of using Ag nanoparticle paste as bonding materials in electronic packaging , micro-scaled Ag_2O powders were mixed with triethylene glycol (TEG) to form a paste to replace the Ag particle paste. The reaction mechanism of in-situ formation of Ag nanoparticles , the sintering characteristics of micro- Ag_2O paste at low temperature , and the bonding of Ag-coated Cu bulks using this paste were investigated. The results reveal that the Ag_2O particles in the paste were more easily transformed into Ag nanoparticles than micro- Ag_2O itself , and with increasing the sintering temperature , more Ag nanoparticles formed and grew larger by sintering , accompanied with some gaseous products which could escape easily. The effect of sintering-bonding time on the strength of joints fabricated at 250 °C under a pressure of 2 MPa was analyzed. The average shear strength of the joints increased with sintering-bonding time and reached about 24 MPa when the sintering-bonding time was 5 min. And the microstructure of the fractured surface and the cross-section of typical joints made at 250 °C under 2 MPa were also examined.

Key words: silver oxide; in-situ formation; Ag nanoparticles; sintering bonding

Diagnosis of welding arc ionization region and boundary

XIAO Tianjiao , SONG Yonglun , LI Chao , YAN Sibao (School of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology , Beijing University of Technology , Beijing 100123 , China) . pp 43 - 47

Abstract: Welding arc , as a heat source , converts electric energy to heat energy by gas discharging , and the scale of the arc ionization region as well as the effective range of the arc determines the distribution of its energy density. In this paper , the quantitative detection of argon atoms and argon-ion line intensity were achieved by emission spectroscopy diagnostic method , and the arc ionization region and the gas atom excitation radiation boundary scale were obtained. The measurement not only overcame the problem that the arc could not be quantitatively tested with camera due to exposure factors , but also could be used for observation of pulsed arc. The results provide the basis for better understanding arc physics and modeling the arc.

Key words: tungsten inert gas welding; arc boundary; ionization region; arc geometric pattern; spectroscopy diagnostic

Corrosion and wear behavior of wire-arc sprayed Ni-based coatings

ZHAO Xiaozhou¹ , ZHOU Zheng¹ , HE Dingyong¹ , ZHAO Qiuying² , LI Ran¹ , JIANG Jianmin¹ (1. College of Materials Science and Engineering , Beijing University of Technology , Beijing 100124 , China; 2. Postdoctoral Research Station of Mechanical Engineering , Beijing University of Technology , Beijing 100124 , China) . pp 48 - 52

Abstract: A new Ni-based cored wire was designed to prepare coatings by wire-arc spraying on SA 213-T2 substrate in order to solve the corrosion and wear problems in waste-to-energy (WTE) plants. According to X-ray diffractometry (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) analysis , the as-deposited coatings with low content of oxide phases presented uniform and dense layered structure with porosity at around 3% . The wear resistance of the designed coating , about 7 times higher than that of the substrate , was measured by a rubber wheel abrasive testing machine. Thermo-gravimetric technique was used to investigate the high-temperature corrosion behavior of the coatings in molten salt environment ($\text{Na}_2\text{SO}_4 - 10\% \text{ NaCl}$) at 800 °C in a muffle furnace. As a result , the weight gain curve of the coating followed the parabolic law and presented extremely lower corrosion rates , comparing with that of the substrate , due to the formation of Cr_2O_3 and NiCr_2O_4 oxide films on the surface which prevented the diffusion or penetrating of corrosive species. Consequently , the developed coating could provide much better corrosion resistance properties than SA213-T2 substrate.

Key words: Ni-based coating; arc spraying; microstructure; hot corrosion; wear behavior

Recognition of weld flaw based on feature fusion of ultrasonic signal and image

HU Wengang , GANG Tie (State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China) . pp 53 - 56

Abstract: Ultrasonic testing is widely applied to detect the inner flaws of materials , but it is still difficult to recognize the flaw properties. In this paper , a new method for flaw recognition based on feature fusion of ultrasonic signal and image was proposed. The detection data was used to identify the weld flaw by the data fusion of ultrasonic signal feature and morphological feature. The welds containing defects such as hole , slag , crack ,